

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

Medvegy Tibor

2017

Doktori értekezés

Különleges anyagok és multimédiás eszközök felhasználási lehetőségei a középiskolai fizikaoktatás és a természettudományos ismeretterjesztés terén

Medvegy Tibor

Témavezető: Dr. Juhász András ny. egyetemi docens

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Fizika Doktori Iskola

Vezető: Dr. Tél Tamás egyetemi tanár

Fizika Tanítása Doktori Program

Vezető: Dr. Tél Tamás egyetemi tanár



2017

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALMI ÖSSZEFOGLALÓ	1
ABSTRACT	2
1 BEVEZETÉS	3
1.1 A DOKTORI MUNKÁM TÉMAVÁLASZTÁSA	3
1.2 A DOLGOZAT FELÉPÍTÉSE	4
2 KÜLÖNLEGES ANYAGOK A KÖZÉPISKOLAI FIZIKAOKTATÁS, A TEHETSÉGGONDOZÁS ÉS A TERMÉSZETTUDOMÁNYOS ISMERETTERJESZTÉS TERÉN	5
2.1 ELEKTROREOLÓGIAI ÉS MAGNETOREOLÓGIAI FLUIDUMOK	5
2.1.1 AZ ELEKTROREOLÓGIAI FOLYADÉKOK ÉS AZ ELEKTROREOLÓGIAI HATÁS	9
2.1.2 A MAGNETOREOLÓGIAI FOLYADÉKOK ÉS A MAGNETOREOLÓGIAI HATÁS	11
2.1.3 FERROFLUIDUMOK, ER ÉS MR FOLYADÉKOK ELTERJEDT ALKALMAZÁSI	12
2.1.4 ISMERETTERJESZTŐ ELŐADÁSOK	14
2.1.5 DIÁKKÖRI FOGLALKOZÁSOK	22
2.2 „FERROFLUIDUM MAGGAL ELLÁTOTT DIFFERENCIÁL TRANSZFORMÁTOROS DŐLÉSSZÖG ÉRZÉKELŐ SZENZOR FEJLESZTÉSE” PROJEKT	28
2.2.1 FERROFLUIDUM ALKALMAZÁSA DŐLÉSSZÖG ÉRZÉKELŐKBEN	28
2.2.2 FERROFLUIDUM MAGGAL ELLÁTOTT DIFFERENCIÁL TRANSZFORMÁTOR	29
2.2.3 FERROFLUIDUM MAGGAL ELLÁTOTT TOROIDÁLIS DIFFERENCIÁL TRANSZFORMÁTOR	37
2.2.4 KÖVETKEZTETÉSEK ÉS TOVÁBBI LEHETŐSÉGEK	39
2.2.5 VERSENYEREDMÉNYEK	40
2.3 CSEPPFOLYÓS NITROGÉNT ALKALMAZÓ KÍSÉRLETEK A TERMÉSZETTUDOMÁNYOS ISMERETTERJESZTÉS TERÉN	42
2.3.1 CSEPPFOLYÓS NITROGÉN VISELKEDÉSE SZOBAHŐMÉRSÉKLETŰ KÖRNYEZETBEN	43
2.3.2 HÉTKÖZNAPI ANYAGOK A CSEPPFOLYÓS NITROGÉN HŐMÉRSÉKLETÉN	51
2.3.3 FÉMEK ÉS FÉLVEZETŐK VISELKEDÉSE A CSEPPFOLYÓS NITROGÉN HŐMÉRSÉKLETÉN	56
2.3.4 KÍSÉRLETEK CSEPPFOLYÓS OXIGÉNNEL	61
2.3.5 AZ ÉLŐ ANYAGOK ÉS A CSEPPFOLYÓS NITROGÉN	63

3 MULTIMÉDIÁS ESZKÖZÖK FELHASZNÁLÁSI LEHETŐSÉGEI A KÖZÉPISKOLAI FIZIKAOKTATÁSBAN	66
3.1 OKOSTELEFONOK A FIZIKAOKTATÁSBAN	66
3.1.1 AZ ANDROID OPERÁCIÓS RENDSZER	67
3.1.2 AZ OKOSTELEFON MINT SEGÉDESZKÖZ	68
3.1.3 AZ OKOSTELEFON MINT MÉRŐESZKÖZ	69
3.1.4 AZ ALKALMAZÁSOK BEMUTATÁSA AZ OSZTÁLYTEREMBEN	75
3.1.5 VERSENYFELADATOK OKOSTELEFONOKKAL	75
3.1.6 KÖVETKEZTETÉSEK	88
3.2 A NINTENDO WII MOTE A FIZIKAOKTATÁSBAN	89
3.2.1 A NINTENDO WII ÉS A WII MOTE	89
3.2.2 INFRAFORRÁS KÉSZÍTÉSE	91
3.2.3 CSATLAKOZTATÁS SZÁMÍTÓGÉPHEZ	93
3.2.4 A WII MOTE EDDIGI ALKALMAZÁSAI	94
3.2.5 ADATFELDOLGOZÁS	94
3.2.6 KÍSÉRLETEK A WII MOTE-TAL	96
3.3 KÖVETKEZTETÉSEK	107
4 HIVATKOZÁSOK	108
4.1 A DISSZERTÁCIÓ TÉZISEINEK ALAPJÁT KÉPZŐ PUBLIKÁCIÓK	108
4.2 A HIVATKOZOTT SAJÁT KÉSZÍTÉSŰ VIDEÓK ELÉRÉSI ÚTVONALAI	109
4.3 A HIVATKOZOTT APPLIKÁCIÓK ELÉRÉSI ÚTVONALAI	110
4.4 IRODALOMJEGYZÉK	112
MELLÉKLETEK	117
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	124
ADATLAP	125

Tartalmi összefoglaló

Doktori disszertációmban összefoglalom az elektroreológiai, illetve a magnetoreológiai folyadékok egyedülálló reológiai tulajdonságainak fizikai magyarázatait, valamint bemutatom, miként lehet szemléletes demonstrációs és mérési kísérleteken keresztül a különleges viselkedésük fizikai okait a középiskolás diákokkal megismertetni. Bemutatok egy kutatási projektet, amelyben témavezetésemmel egy középiskolás diákkal közösen egy új típusú és nagy pontosságú dőlésszög mérési eljárást dolgoztam ki. Megmutatom, hogy ezen anyagok témakörében az akár már középiskolában is végezhető kutatómunka alkalmas a középiskolás diákok érdeklődésének felkeltésére a műszaki és természettudományok iránt.

Egy másik, a fiatalok számára különleges anyag, a tudománynépszerűsítő kísérleti előadások egyik szinte elhagyhatatlan kelléke a cseppfolyós nitrogén, amelynek felhasználásával számos látványos és tanulságos kísérlet elvégezhető. Egy gyűjteményt állítottam össze, amely közel hetven, folyékony nitrogénnel elvégezhető kísérletet tartalmaz. A kísérletek mindegyikéhez videós segédanyagot készítettem, amely a kísérletet reprodukálni kívánó tanárkollegák számára nyújt segítséget a felkészülésben és a kísérletek elvégzésében.

Dolgozatomban a különleges anyagok témáján kívül multimédiás eszközök fizikaoktatásba való bevonásával is foglalkozom. Ilyenek például az okostelefonok, amelyeknek összefoglalom a fizika szakmódszertani felhasználási lehetőségeit, valamint általam kiírt mérési versenyfeladatokon keresztül bemutatom, miként lehet az okostelefonok segítségével újszerű mérési elrendezéseket összeállítani. Bemutatom továbbá, hogyan lehet egy másik multimédiás eszköz, egy igen elterjedt videojáték konzol távirányítóját nagysebességű mozgáselemző mérőeszközzé alakítani. Ezen mérőeszköz használatára szoftvert készítettem, amely az összeállított rendszer kalibrációját és az adatgyűjtést megkönnyíti az azt felhasználni vágyó fizikatanárok számára.

Kulcsszavak: fizikaoktatás, ferrofluidum, reológia, okostelefon, WiiMote

Abstract

In my dissertation, I summarize the physical explanations of the unique rheological properties of electrorheological and magnetorheological fluids, and I show methods, how to familiarize high school students with the physical causes of the behavior of these advanced products of physics and materials sciences through a series of laboratory demonstrations as well as experimental investigations. By presenting a research project, in which with a mentored high school student, we design a new type of high precision tilt measurement method, I show that the subject of these materials is suitable for attracting secondary school students to technical and natural sciences.

One of the almost unviable features of science-promoting experimental presentations is liquid nitrogen, which one can use to carry out many spectacular and instructive experiments. Until now, I have collected nearly seventy experiments with liquid nitrogen and I made a video tutorial for each of the experiments. These videos helps teachers wanting to reproduce the experiment in the preparation and carrying out experiments.

In my dissertation, besides the subject of special materials I also deal with the inclusion of multimedia tools in physics education. Such as smartphones of which I summarize the possible use in physics teaching methodology. I present through measuring competition tasks I have written, how to create novel measurement layouts using smartphones. I also show how to convert a remote control of another multimedia device, a widespread video game console to a high speed motion analyzer. I developed a software for use this tool that greatly simplifies the calibration and data collection with the assembled system for physics teachers who want to use it.

Keywords: physics education, ferrofluid, rheology, smart phone, WiiMote

1 Bevezetés

Számos szakdolgozat, konferencia, cikk és doktori értekezés foglalkozott a hazai közoktatás, köztük a fizikatanítás problémáival. Mind a hazai, mind a nemzetközi kutatások egyetértenek abban, hogy a diákok fizika iránti attitűdje igen alacsony, sok esetben éppen a tantárgyak között a legalacsonyabb (K. Papp & K. Józsa, 2000). Erre a problémára a megoldást többek között a kísérletek gyakoribb alkalmazása, a tanulók számára jól ismert és hétköznapi eszközök bevonása az ismeret-átadásba és a fizika mindennapi életben játszott szerepének tudatosítása jelenthetik.

Doktori munkám során elsősorban a középiskolás diákok fizika iránti érdeklődésének felkeltési lehetőségeivel foglalkozom. Az úgynevezett intelligens folyadékok vizsgálatán keresztül mutatom meg a középiskolás tanulóknak, milyen szoros a mindannyiunkat körülvevő technológiák kapcsolata a fizikával. Emellett a diákok számára kedves, és hétköznapiak számító multimédiás eszközök oktatásba való bevonásával törekszem a tanulók attitűdjét javítani a műszaki és természettudományok iránt.

1.1 *A doktori munkám témaválasztása*

Multimédiás eszközök oktatástechnológiai felhasználásával már az egyetemi éveim során elkezdtem foglalkozni. Egy játékkonzol, a Nintendo WiiMote felhasználásának lehetőségeit vizsgáltam az OTDK pályamunkámban, amely téma hatására később úgy döntöttem, hogy jelentkezek az Eötvös Loránd Tudományegyetem Fizika Doktori Iskolájának Fizika Tanítása Doktori Programjába, ahol az OTDK-ra való készülés során elkezdett témával állt szándékomban behatóbban foglalkozni. Mindeközben új munkahelyemen, a Pannon Egyetem Fizika és Mechatronika Intézetében megismerkedtem az úgynevezett elektro- és magnetoreológiai anyagokkal, amelyek szintén nagy hatással voltak rám. Ezen két nagy témakör köré építettem hát fel szakmai munkáim jó részét és ezért is választottam disszertációm témájaként ezeket.

1.2 A dolgozat felépítése

Ahogy a témaválasztás is indokolja, a dolgozat két nagy egységből áll. Az első rész különlegesnek tekinthető anyagok (intelligens folyadékok és a cseppfolyós nitrogén) felhasználási lehetőségeivel foglalkozik a tehetséggondozás és a tudományos ismeretterjesztés terén. Míg a dolgozat második része multimédiás eszközök (okostelefonok és játékkonzolok) mérési kísérletekben való alkalmazási lehetőségeit mutatja be. Mivel a disszertáció két központi témája nem áll szoros kapcsolatban, ezért a két részt azzal a szándékkal írtam meg, hogy azok önmagukban is követhetőek és olvashatóak legyenek.

A disszertációt igyekeztem kép- és videó anyagokkal minél bővebben illusztrálni, a dolgozatban szereplő képek és hivatkozott videók, amennyiben nincs külön kiemelve a forrásuk, mind a saját munkámat képezik.

2 Különleges anyagok a középiskolai fizikaoktatás, a tehetséggondozás és a természettudományos ismeretterjesztés terén

Körültekintve a technológia mai világában észrevehetjük, hogy a minket körbevevő mindennapos eszközök egyre "okosabbá" válnak. Az autók, a televíziók, a hűtők, a mosó- és mosogatógépek, a telefonok, a karórák, az ágyak, a fogkefék, a szemüvegek és maguk a házaink is egyre több szenzort és aktuátort¹ tartalmaznak, egyre több PC-szerű funkcionalitással bírnak. Ezek a változások nem csak az eszközeinket érintik, de a bennük használt anyagokat is. A modern anyagtudomány ezeket intelligens anyagoknak nevezi. Nehéz megfelelő definíciót találni arra, hogy mi tesz egy anyagot "intelligensé", ugyanis sok esetben a felhasználás mikéntje teszi őket azzá. Talán a legegyszerűbb módon azt mondhatjuk, hogy ezek olyan komplex anyagok, amelyek a felhasználó számára előnyösen képesek reagálni a környezetükből származó fizikai és/vagy kémiai hatásokra.

Fontos, hogy a jövő mérnökei és kutatói már a középiskolában megismerhessék ezeket a különleges tulajdonságú anyagokat, hiszen az eddigi tapasztalatok alapján ezen anyagok alkalmazásának igen széleskörű elterjedése várható.

2.1 Elektroreológiai és magnetoreológiai fluidumok

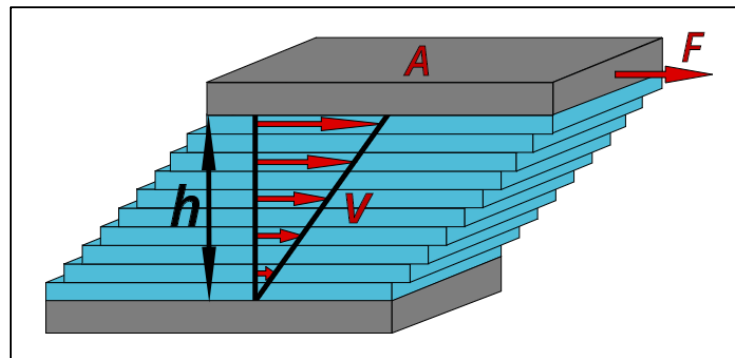
Az elektroreológiai (ER) és magnetoreológiai (MR²) fluidumok olyan különleges tulajdonsággal bíró összetett folyadékok, amelyek szerkezete átrendeződik külső elektromos- illetve mágneses terek jelenlétében. Az említett tulajdonságok szilárd testekben való megfelelőjét elektro- illetve magnetostrikciónak nevezzük. Jó példa erre a piezoelektromos jelenség, amely során bizonyos kristályokban egy meghatározott tengellyel párhuzamos nyomás hatására elektromos potenciálkülönbség lép fel. A jelenség megfordításával, tehát külső elektromos tér alkalmazásakor ugyanezen kristályban deformáció

¹ Beavatkozó elem, amely képes valamilyen irányító jelnek megfelelő hatás kifejtésére (pl. motor).

² Nem összetévesztendő a mágneses magrezonanciás képalkotás (MR/MRI) hasonló mozaikszavával.

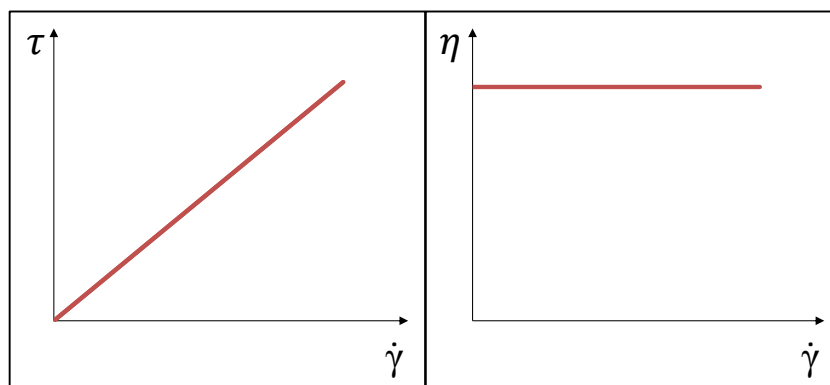
megjelenését tapasztaljuk. Az ER és MR fluidumokban e szerkezeti változások hatására akár több nagyságrenddel is megnőhet a folyadék viszkozitása. Innen ered az elnevezésük, hiszen a reológia tudományága az anyagok alakváltozásaival, illetve az alakváltozások és az azokat kiváltó hatások közötti törvényszerűségek vizsgálatával foglalkozik. Ezek a folyadékok tehát a külső elektromos vagy mágneses tér hatására megváltoztatják reológiai tulajdonságaikat.

A jól ismert Newton-féle viszkozitási törvény szerint a folyadékrétegek közötti $\tau = F/A$ nyírófeszültség egyenesen arányos a $\dot{\gamma} = \partial v / \partial h$ nyírési sebességgel (2-1.



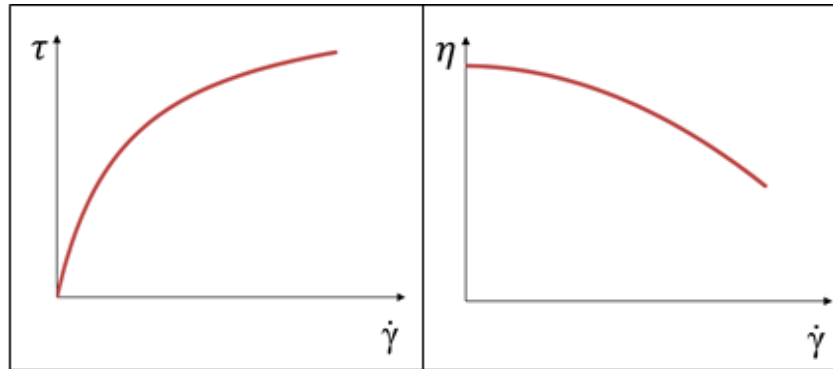
2-1. ábra: A Newton-féle viszkozitás

ábra). Az úgynevezett Newtoni folyadékok (pl. víz) $\eta = \tau / \dot{\gamma}$ viszkozitása tehát független a nyírési sebességtől, a nyírófeszültség növelésével egyenesen arányosan növekszik a nyírési sebesség (2-2. ábra).



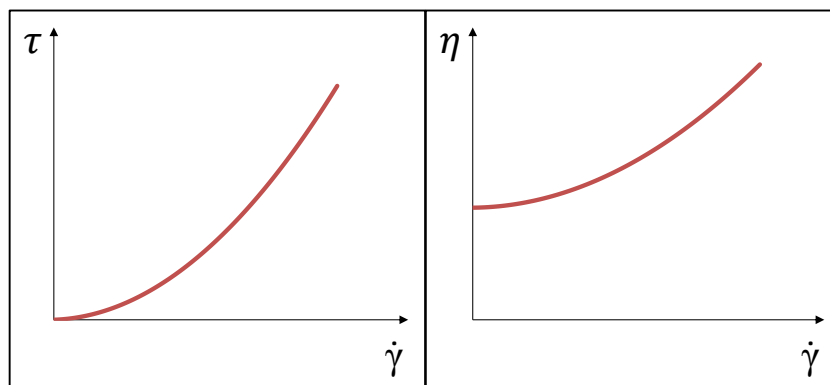
2-2. ábra: Newtoni folyadékok

Ezzel szemben a nem-Newtoni folyadékok viszkozitása erősen függ a nyírási sebességtől. Léteznek nyírásra lágyló (shear thinning, 2-3. ábra), valamint nyírásra keményedő (shear thickening, 2-4. ábra) folyadékok is. Előbbire a legismertebb példa a ketchup (a xantángumi tartalma következtében), amelynek folyása eleinte nehézkes, azonban a folyási sebesség növelésével lényegesen folyékonyabbá válik.



2-3. ábra: Nyírásra híguló folyadékok

Utóbbira a közismert keményítő és víz keverék jó példa, amely lassú alakváltoztatással szemben viszonylag csekély ellenállást tanúsít, azonban hirtelen alakváltozással szemben nagyságrendekkel nagyobb ellenállást fejt ki.

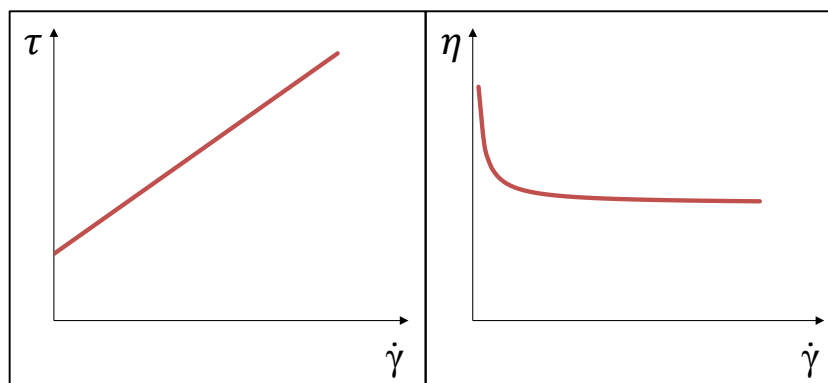


2-4. ábra: Nyírásra sűrűsödő folyadékok

A reológia iránt bővebben érdeklődőknek Radnai Gyula: Reológiai érdekességek című cikkét ajánlom figyelmébe (Gy. Radnai, 1983).

Az elektroreológiai és magnetoreológiai fluidumok különleges viselkedésének leírását az úgynevezett Bingham modell segítségével szokták végezni (I.H. Shames & F.A. Cozzarelli, 1992). A Bingham modellben a folyás megindulásához egy minimum nyírási feszültség elérése szükséges (2-5. ábra). Ennek mechanikai

analógiája egy test lecsúszása egy lejtőn, addig nincs mozgás, amíg egy értéket (tapadási súrlódás) meg nem halad a csúszást kiváltani kívánó erőhatás.



2-5. ábra: Bingham modell

A nem-Newtoni folyadékok viszkoplasztikus³ közegekre vonatkozó esetében a folyadékban ébredő nyírófeszültség a Newtoni folyadékokra vonatkozó összefüggéshez hasonlóan határozható meg, azzal a különbséggel, hogy a nyírási gradienstől függő taghoz hozzá kell adni egy állandó értéket, amely az anyag ER/MR viselkedéséből adódik. A nyírási feszültség ekkor:

$$\tau = \tau_y(\text{tér}) + \eta\dot{\gamma}$$

ahol $\tau_y(\text{tér})$ az indukáló elektromos- vagy mágneses térből származó nyírási feszültség küszöbértéke. A folyadékban az alakváltozás tehát csak egy bizonyos határfeszültség elérése után indul meg, majd utána a Newtoni folyadékokhoz hasonlóan ideálisan viszkózus jelleget mutatva folytatódik. Különböző összetételű ER/MR folyadékok azonban nyírásra híguló, illetve nyírásra sűrűsödő tulajdonságokat is mutathatnak.

Ezeknek a folyadékoknak a szabályozható viszkozitásuk miatt a modern mérnöki tudományok területén mára számtalan alkalmazása alakult ki. Felhasználják például gépjárművek lengéscsillapítójában, mosógépek rezgésének csillapítására, léptetőmotorok belengésének redukálására, fékekben, kuplungokban nyomatékátvitelre, vagy éppen az orvostudományok terén képalkotási módszereknél kontrasztanyagokként.

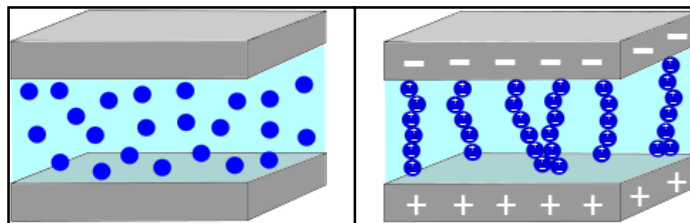
³ képlékeny-rugalmatlan anyag

Munkám során bemutatom, miként lehet szemléletes demonstrációs és mérési kísérleteken keresztül ezen anyagok különleges viselkedésének fizikai okait a középiskolás diákokkal megismertetni, valamint azt, hogy hogyan készíthetünk magunk is ezekhez hasonló folyadékokat.

2.1.1 Az elektroreológiai folyadékok és az elektroreológiai hatás

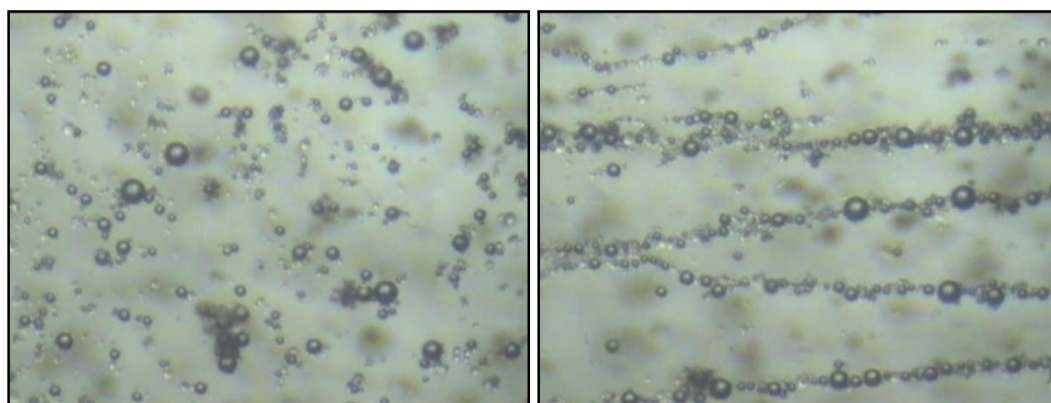
Elektroreológiai folyadékhoz juthatunk, ha ε_p dielektromos permittivitású⁴ részecskéket ε_f dielektromos permittivitású folyadékban diszpergálunk. Az elektroreológiai hatás kialakulásához szükséges, hogy $\varepsilon_p > \varepsilon_f$ teljesüljön. A gyakorlatilag gömb alakúnak tekinthető részecskék átmérője a $0,1 - 100 \mu\text{m}$ intervallumba esik. (A részecskék kiülepedését felületaktív anyagok adagolásával csökkentik.) Ha egy ilyen diszperziót külső elektromos térbe helyezünk, az elektromosságtan törvényei alapján belátható, hogy a részecskéknek a külső tér irányába mutató dipólusmomentuma indukálódik (W. Greiner, 1991). Az indukált dipólusmomentum arányos a részecskék térfogatával, ezért az nagyságrendekkel nagyobb mint a molekuláris folyadékoknál megszokott dipólusmomentumok. A dipólus-dipólus kölcsönhatás anizotrop jellegének következményeként a diszpergált részecskék igyekeznek olyan pozíciót felvenni, hogy egyik részecske indukált pozitív töltése a másik részecske indukált negatív töltése közelében helyezkedjék el. Az ilyen konfigurációk a többi lehetséges konfigurációkkal szemben energetikailag kedvezőbbek. (Az indukált dipólusmomentumokkal megfogalmazva ezt úgy is mondhatjuk, hogy a dipólusoknak energetikailag a „*nose to tail*” konfiguráció a kedvező.) Így az elektromos tér hatásideje alatt a részecskék elmozdulnak, és először párokba, láncokba majd oszlopokba szerveződnek. Az egész folyamat lejátszódásához – a konkrét fizikai paraméterek függvényében – ms-októl néhány s-ig terjedő időre van szükség. A láncok, oszlopok – dipólusmomentumaikkal együtt – a külső tér irányába mutatnak (2-6. ábra).

⁴ Megadja, hogy az anyag (szigetelő) mennyire képes polarizálódni külső elektromos térben.



2-6. ábra: Az ER folyadék részecskéinek láncosodása külső elektromos tér alkalmazásakor.

Ha ezt az anizotrop elektorreológiai folyadékot a láncokra merőleges folyási sebesség-gradiensnek tesszük ki, az a nyírási feszültség növekedését eredményezi, ami a viszkozitás több nagyságrendbeli növekedéséhez vezet (R. Nava, et al., 1997).



2-7. ábra: Szilikonolajban diszpergált üveggolyók külső elektromos tér nélkül, illetve annak jelenlétében.

Az elektromos tér kikapcsolásával a részecskék elvesztik indukált dipólusmomentumukat, és a viszkozitás az eredeti értékre áll vissza.

A 2-7. ábrán átlagosan $10\ \mu\text{m}$ -es üreges üveggolyók láthatók szilikonolajban először külső tér nélkül, majd $1600\ \text{V}/\text{mm}$ -es elektromos tér jelenlétében láncokba szerveződve. A képeken is látható jelenségre ráismerhetünk egy, a középiskolákban viszonylag gyakran előforduló kísérletben, amikor egy Van de Graaff generátor segítségével, olajrétegre szórt kukorcadarával szemléltetjük az elektromos erővonalakat. Ennek a kísérletnek a célja általában az erőtér jellemzőinek bemutatása, így a rendeződés anyagszerkezeti magyarázata sokszor elmarad. Természetesen itt is a szemcsék indukált dipólusmomentumai miatt lép fel a láncosodás.

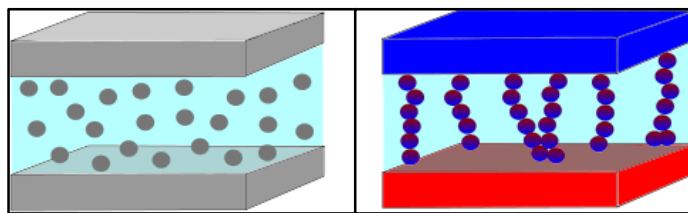
2.1.2 A magnetoreológiai folyadékok és a magnetoreológiai hatás

A magnetoreológiai folyadékok felépítésének megismeréséhez először a mágneses folyadékokkal kell foglalkoznunk. A mágneses folyadékok olyan kolloidok, amelyekben ferromágneses részecskék vannak stabilizálva. A részecskék (pl. magnetit részecskék) mágneses mono-domének, így azok permanens mágneses dipólus momentummal rendelkeznek. A gömb alakúnak feltételezett részecskék átmérője jellegzetesen a 10 – 50 nm-es mérettartományba esik. A hordozó közeg minősége alapján megkülönböztetünk vizes és szerves bázisú mágneses kolloidokat (R.E. Rosensweig, 1985). A részecskék stabilizálása felületaktív anyagok, polimerek vagy elektrolitok adagolásával történhet. Az ilyen kolloidok több tíz évig stabilak, és folyadék fázisban ferromágneses tulajdonságokat mutatnak. (Relatív mágneses permeabilitásuk⁵ jellegzetesen az $1 < \mu_r < 5$ intervallumba esik. Kis ferromágneses részecskekoncentráció esetén mágnesezettségük a Langevin-féle mágnesezettségi egyenlet segítségével írható le (R.E. Rosensweig, 1985). A mágnesesen dipoláris folyadékok az elektromosan dipoláris folyadékok polarizációjával szemben telítésig mágnesezhetők.)

Amennyiben egy μ_f mágneses permeabilitású fluidumban $\mu_p > \mu_f$ mágneses permeabilitású ferromágneses részecskéket diszpergálunk, úgy magnetoreológiai folyadékhoz juthatunk (S. Odenbach & S. Thurm, 2002). A gömb alakúnak tekinthető részecskék jellegzetes átmérője a $0,1 < d < 50 \mu m$ mérettartományba esik. A diszpergált részecskék ferromágnesesek, de méretüknél fogva több mágneses domént is tartalmaznak, így külső mágneses tér hiányában nincs eredő mágneses dipólus momentumuk. Magnetoreológiai fluidumunkat külső mágneses térbe helyezve – az elektromos folyadékok viselkedéséhez hasonlóan – a diszpergált részecskéknek mágneses dipólus momentuma indukálódik (J. de Vincente, et al., 2011). A mágneses és az elektromos dipólusok kölcsönhatását leíró összefüggések analógiája alapján, külső mágneses tér hatására az előzőekhez

⁵ A relatív permeabilitás az anyag mágneses viselkedését jellemzi, megmutatja, hogy adott H mágneses térerősség valamely anyagban hányszor nagyobb mágneses indukciót kelt, mint vákuumban.

hasonló módon értelmezhető dipólus-párok, láncok és oszlopokba tömörült láncok alakulnak ki a magnetoreológiai fluidumokban is (2-8. ábra).



2-8. ábra: Az MR folyadék részecskéinek láncosodása külső mágneses tér alkalmazásakor

A láncok kialakulása – az elektroreológiai folyadékoknál már ismertetett módon – a viszkozitás növekedését eredményezi. Ez a hatás a tér kikapcsolásával gyorsan megszűnik.

2.1.3 Ferrofluidumok, ER és MR folyadékok elterjedt alkalmazási

Ezeknek a folyadékoknak a modern mérnöki tudományok területén mára számtalan alkalmazása alakult ki. A műszaki érdeklődésű diákokkal érdemes lehet megismertetni azokat az eddig bemutatott jelenségeken alapuló eszközöket, amelyek már ma is megtalálhatók a környezetünkben, illetve azokat a jövőbeli lehetőségeket, amelyek jelenleg is aktív kutatási területek.

Steven Papell, a NASA kutatómérnöke 1963-ban folyékony rakéta üzemanyagok mikrogravitációs körülmények közötti kontrollálásának problémájának megoldását kapta feladatul. A súlytalanság állapotában a folyékony üzemanyagok hajtóműbe való irányítása komoly kihívást jelentett a NASA mérnökeinek. Papell a probléma megoldását az üzemanyagok mágneses tulajdonsággal való felruházásában látta, hiszen ez esetben erős permanens mágnesekkel, vagy elektromágnesek segítségével válna irányíthatóvá az üzemanyag.

Papell a ferrofluidumok első stabil változatát, amely kerozin alapú volt, 1964-ben szintetizálta (S.S. Papell, 1964), azonban az ötletét sosem valósították meg, mivel a NASA a szilárd üzemanyagok alkalmazása mellett döntött.

A mágneses folyadékok pályafutása azonban itt nem ért véget. Szemléltetés gyanánt álljon itt egy rövid felsorolás a ferrofluidumok széleskörű alkalmazási területeiről és jelenleg is kutatott felhasználási lehetőségeiről. Eleinte mágneses

térrel kontrollálható tömítő és kenőanyagként kezdték használni (K. Raj, et al., 1995) (K. Raj & R. Moskowitz, 1990), de azóta egyes printerek festékeiben, hangszórók lengő-tekerceinek hűtésére (S. Odenbach, 2009), illetve számtalan érzékelőben és aktuátorban is megjelentek, például hőmérséklet- és mágneses térerősség-mérő szenzorokban is (Z. Dongchen, et al., 2009) (O. Baltag & D. Constandache, 1997). Ferrofluidumok segítségével sikeresen készítettek már áramlásbefolyásoló rendszereket (B. Andò, et al., 2009), szivattyúkat (H. Hartshorne, et al., 2004), és sikeresen alkalmazták őket mikromechanikai rendszerekben is (R. Pe´rez-Castillejos, et al., 2000).

Magnetoreológiai elven működő, használat közben, néhány milliszekundum alatt szabályozható keménységű lengéscsillapítókat a katonai járművekben (pl. HMMWV) és 2002 óta a civil autóiparban is alkalmaznak (pl. Cadillac Seville STS, Audi TT és R8, Camaro ZL1, Ferrari 458 Italia...) (A.G. Olabi & A. Grunwald, 2007). ER és MR rezgéscsillapítókat mosógépekben, hangszórókban, léptetőmotorokban, de nagyobb méretekben épületek földrengésvédelmi rendszereiben is használnak.

Az ER és MR folyadékok szabályozható viszkozitása erőátviteli rendszerekben is felhasználható, kopásmentes fékek és kuplungok építhetők a segítségükkel, amelyekben a külső tér változtatása révén szabályozható az erőátvitel mértéke is. Sikeresen alkalmazzák még robotkarok tengelyeinek közös motorról való meghajtására is, így tovább csökkentve azok tömegét, aminek következtében a mozgékonyosságuk növelhető.

Az orvostudományok terén mágneses magrezonanciás képalkotási módszereknél kontrasztanyagként alkalmazzák a vízbázisú, stabilizált, biokompatibilis ferrofluidumokat. Emellett festékek és hatóanyagok mágneses térrel való célba juttatására, biokomponensek szeparációjára is sikeresen alkalmazták már a mágneses folyadékokat. Mágneses hipertermiás kezelésben – amely során tumorokba injekciózzák, majd jól megválasztott változó mágneses térrel hevítik a folyadékot, és ezen keresztül a rákos sejteket – is sikeresen használják a ferrofluidumokat (Q. A. Pankhurst, et al., 2009).

Ezekkel a különleges anyagokkal kapcsolatban nem csak külföldön, hanem hazánkban is számos intézetben végeznek kutatásokat. A Budapesti Műszaki és

Gazdaságtudományi Egyetemen Zrínyi Miklós és kutatócsoportja intelligens anyagok előállításával, valamint ferromágneses polimergélek mechanikai, termodinamikai és orvosbiológiai tulajdonságainak tanulmányozásával foglalkozik (M. Zrínyi, 1999). A Pannon Egyetemen Szalai István és csoportja mágneses és elektroreológiai fluidumok szerkezetének és fizikai tulajdonságainak vizsgálatát végzi külső mágneses ill. elektromos terekben (B. Horváth & I. Szalai, 2012). A Szegedi Tudományegyetemen pedig Tombácz Etelka és munkatársai vízbázisú mágneses folyadékok orvosbiológiai felhasználási lehetőségeit kutatják (A. Hajdú, 2010).

2.1.4 Ismeretterjesztő előadások

A hazai közoktatásban fizikatanárként és a műszaki felsőoktatásban egyetemi oktatóként eltöltött éveim során számtalan alkalommal tartottam ismeretterjesztő előadásokat középiskolás diákoknak (1. számú melléklet). Az intelligens folyadékokkal kapcsolatos előadásaimra való felkészülés során számos demonstrációs kísérletet fejlesztettem azok tulajdonságainak szemléltetésére.

Ebben a fejezetben egy középiskolai fizikaóra során bemutatható demonstrációs kísérleteket ismertetek javasolt didaktikai sorrendben haladva. A következőkben bemutatásra kerülő kísérletekről készült videókat a YouTube video-megosztón is közzétettem, az elérési útvonalak a hivatkozások között találhatóak meg.

➤ Bemelegítés - a Curie-hőmérséklet

Mágneses tulajdonságokkal rendelkező folyadékoknak az iparban számtalan felhasználási módja adódik. Azzal hogy egy folyadékot a gravitáció ellenében is mozgathatunk, vagy egy fix ponton tarthatunk könnyen létrehozható mágneses terek segítségével, igen sajtószerű alkalmazási lehetőségek előtt nyitja meg a kapukat. A hallgatóságban - ha feltesszük a kérdést, hogy hogyan juthatnánk mágneses folyadékokhoz - sok esetben felmerül egy kézenfekvő megoldás, egy mágneses anyag megolvasztása. Sajnos így nem állíthatók elő ilyen anyagok, mivel egy szilárd ferromágneses anyag a melegítése során lényegesen hamarabb éri el az ún. Curie-hőmérsékletét, amelyen elveszíti mágneses tulajdonságait, mint az olvadáspontját.



2-9. ábra: A Curie-hőmérséklet kísérleti bemutatása

A Curie-hőmérséklet elérésekor lejátszódó jelenség szemléltetésére egy igen egyszerű kísérletet mutathatunk be a diákjainknak. A kísérlethez egy nikkeldarabot – a nikkelt 358 °C -os Curie-pontja még egy gyertya lángjával is elérhető – ingaként egy vékony fémszálon felfüggesztünk, és egy mágnes segítségével a függőleges helyzetből kitérítjük úgy, hogy stabilan álljon. Nikkeldarabként akár egy 100 forintos, vagy 1-2 eurós érmét is használhatunk, azok nagy nikkeltartalma miatt. A gyertyát, vagy borszeszégőt a nikkeldarab alá helyezve azt tapasztaljuk, hogy egy bizonyos hőmérséklet elérésekor a mágnes „elengedi” az ingát (2-9. ábra) (T. Medvegy, 2013).

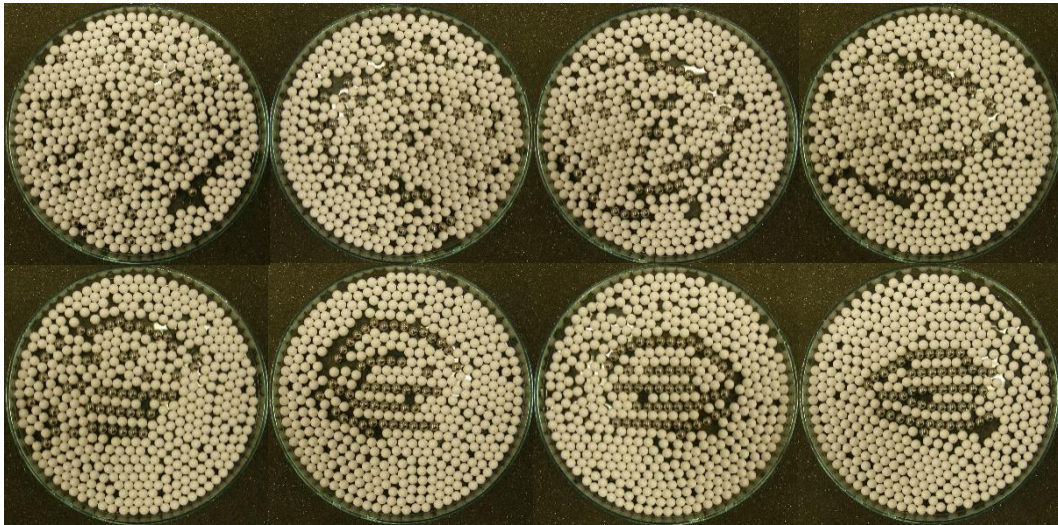
➤ **Az MR folyadékok és az MR hatás bemutatása**

Az magnetoreológiai hatás megértéséhez először a láncosodás hatásmechanizmusát kell bemutatnunk. Ehhez a jelenséghez hasonló effektussal jelenleg is találkozhatunk a középiskolákban, hiszen amikor permanens mágnesre, vagy áramjárta tekercsre vasreszeléket szórunk, ott a vasreszelék láncokba rendeződése révén tudjuk az erővonalakat szemléltetni (2-10. ábra).



2-10. ábra: Magnetit por láncosodása mágneses tér jelenlétében

A nem mágneses közegben diszpergált ferromágneses részecskék viselkedését makroszkopikus méretekben is bemutathatjuk. A 2-11. ábra 6 mm átmérőjű csapágygolyókat láthatunk szintén 6 mm átmérőjű műanyag golyókkal összekeverve.

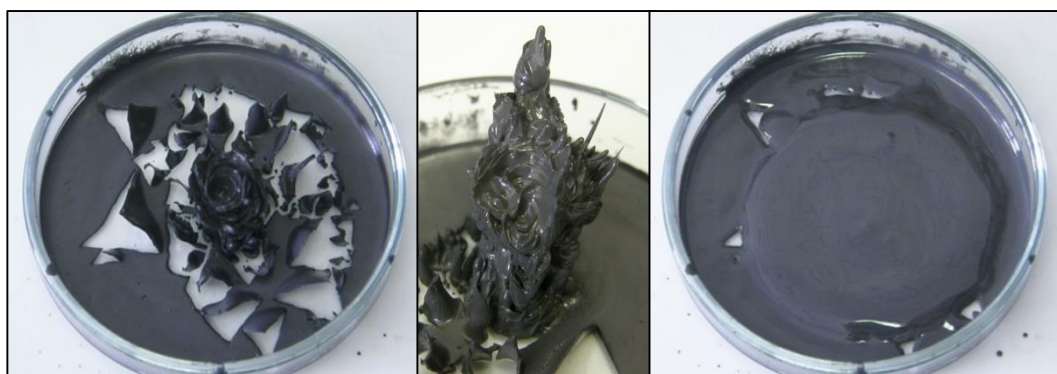


2-11. ábra: Csapágygolyók láncosodása

A kísérlet során először mágneses tér alkalmazása nélkül összekeverjük a golyókat úgy, hogy azok egyetlen rétegben homogén módon fedjék az alkalmazott edény alját. Majd egy erős neodímium mágneset helyezünk el az edény alá úgy, hogy az erővonalak a golyóréteg síkjával párhuzamosan fussanak. Enyhe rázással segítünk a golyóknak elmozdulni az eredetileg elfoglalt helyükről. A mágneses erővonalak mentén csapágygolyó párok és láncok alakulnak ki. Megpróbálhatjuk az ujjunkat az erővonalakra merőlegesen mozgatni a golyók között, majd a mágneses tér nélkül is megismételhetjük a kísérletet. Így első kézből tapasztalhatjuk meg milyen módon jön létre a viszkozitást növelő hatás a magnetoreológiai fluidumokban.

Jenei Péter a szakdolgozatában vizsgált az előzőhöz hasonló kétdimenziós modelleket (P. Jenei, 2010). Kísérletei során gyengén felmágnesezett acélgolyók és üveggolyók által alkotott homogén eloszlású kétdimenziós modellt helyezett egy rázógépre és vizsgálta a mágneses dipólusok miatt kialakult klaszterképződést a fémgolyók koncentrációjának és a rezgési intenzitás (a modellben ez a hőmérsékletnek felel meg) függvényében. A dipólusok miatt kialakuló, a fentiekben bemutatotthoz hasonló láncosodást figyelt meg, azonban a külső mágneses tér hiányában ezek a láncok szabálytalanok és elágazóak is lehetnek, illetve akár zárt hurkokat is alkothattak.

A magnetoreológiai folyadékok erős külső mágneses tér jelenlétében szinte megszilárdulnak. A 2-12. ábra erős mágneses térbe helyezett magnetoreológiai folyadékot láthatunk, amire felülről további magnetoreológiai fluidumot csöpögtetve oszlopszerű képződmények építhetők. A tér kikapcsolásával nem tartja meg alakját, hanem szinte azonnal szétfolyik (2-12. ábra) (T. Medvegy, 2012).



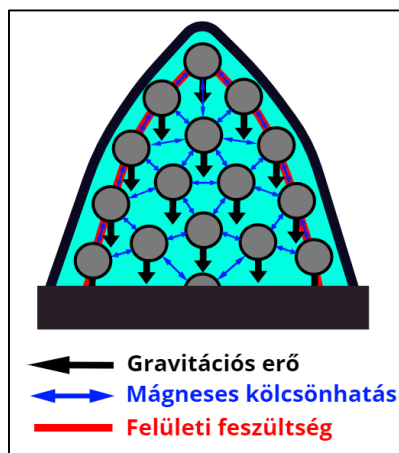
2-12. ábra: MR folyadék viselkedése külső mágneses térben

A ferrofluidumok lényegesen eltérően viselkednek mágneses tér jelenlétében. A viszkozitásuk növekedése az MR fluidumokéhoz képest lényegesen kisebb, sokkal képlékenyebbek maradnak még több száz millitesla erősségű tér jelenlétében is. Felületük azonban „tüskéssé” válik (T. Medvegy, 2012).



2-13. ábra: Ferrofluidum felszíne különböző erősségű mágneses terek jelenlétében

Ennek oka a ferrofluid mágneses részecskéinek kölcsönhatása egymással és a mágneses térrel, valamint a felületi feszültség és a gravitáció (2-14. ábra). A folyadék részecskéi igyekeznek az energetikailag legkedvezőbb pozícióba helyezkedni és e három jelenség együttes hatásának következtében egy tüskés felület alakul ki a folyadék felszínén (2-13. ábra) (R.E. Rosensweig, 1985).



2-14. ábra: A ferrofluidum tüskéinek kialakulása

Házilag csak egyszerűbb magnetoreológiai folyadékokat készíthetünk, például vas- vagy magnetit por étkezési olajjal való összekeverése révén, azonban ezekben a részecskék a felületaktív anyag hiányának következtében hamar összetapadnak (2-15. ábra).



2-15. ábra: Magnetit porból és napraforgóolajból készített mágneses folyadék egyre erősebb mágneses térben

➤ Az ER folyadékok és az ER hatás bemutatása

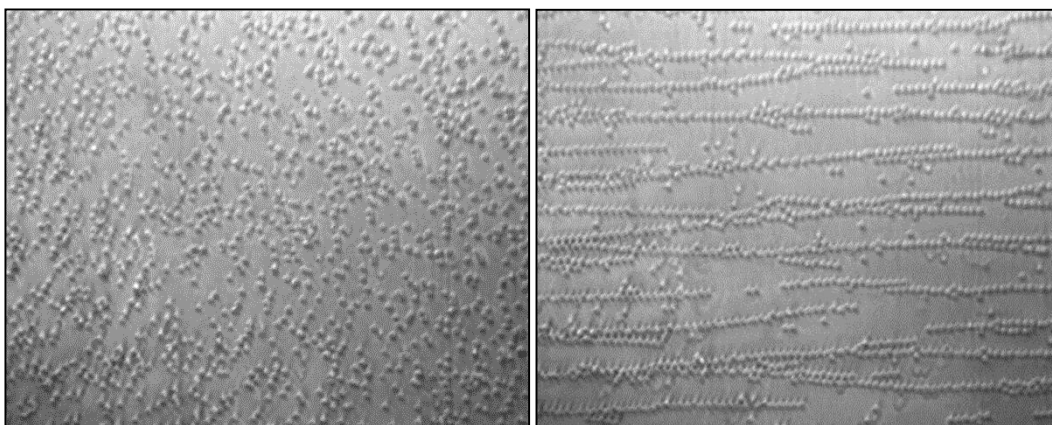
Az elektroreológiai hatás megértéséhez először a láncosodás hatásmechanizmusát kell bemutatnunk. Az elektromosságtani tanulmányaik elején járó hallgatóság számára a dielektromos polarizáció már ismert jelenség. Érdemes azonban egy percet szánni a jelenség legegyszerűbb bemutatására, és egy dörzsöléssel feltöltött vonalzó, vagy szivószál közelítésének hatását megvizsgálni apró papírfecnikre. Amennyiben lehetőségünk van rá, a hallgatóságnak érdemes pár szivószálat kiosztani, hogy ezeket a kísérleteket (valamint néhány további is) maguk is elvégezhessék.

A láncosodás jelenségére ráismerhetünk egy, a középiskolákban gyakran előforduló kísérletben, amikor egy Van de Graaff generátor segítségével, olajrétegre szórt kukoricadarával szemléltetjük az elektromos erővonalakat. Ennek a kísérletnek a célja általában az erőtér jellemzőinek bemutatása, így a magyarázat sokszor elmarad. A kukoricadarával való erővonal-szemléltetés természetesen szintén azon az irányító hatáson alapul, amelyet az elektromos tér a dielektromos polarizáció miatt elektromos dipólusokká váló kukoricadaraszemekre kifejt (2-16. ábra).



2-16. ábra: Kukoricadara láncosodása elektromos tér jelenlétében

Ennek a jelenségnek a bemutatásával már elértünk a láncosodás hatásmechanizmusának megértéséhez, hiszen a bemutatott kísérleti anyagtól az ER folyadékok csak a szemcsék sokkal kisebb mérete folytán térnek el.



2-17. ábra: Szilikonolajban diszpergált monodiszperz szilícium-dioxid golyók először elektromos tér jelenléte nélkül, majd 2500 V/mm-es tér jelenlétében

A 2-17. ábrán $5 \mu\text{m}$ -es átmérőjű szilícium-dioxid golyók láthatók $350 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ viszkozitású szilikonolajban – egy fénymikroszkóp segítségével – először külső tér nélkül, majd 2500 V/mm -es elektromos tér jelenlétében láncokba szerveződve.

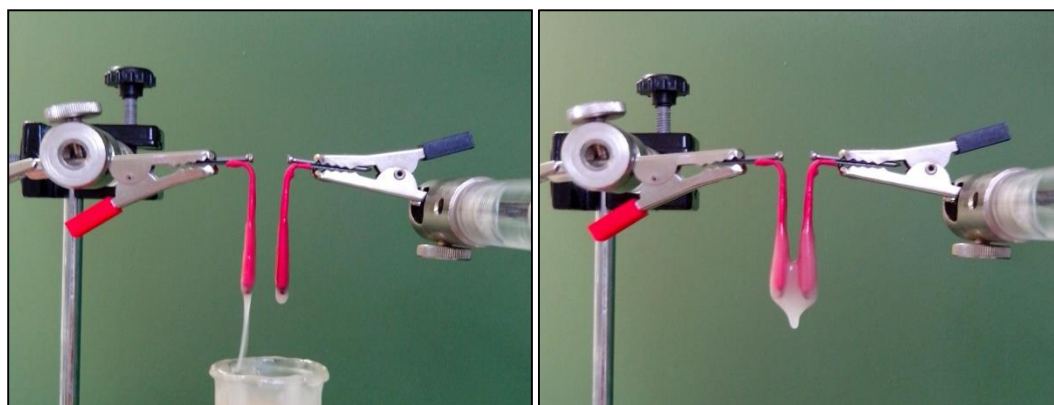
➤ **Készítsünk elektorreológiai folyadékot!**

Elektorreológiai folyadékot akár magunk is készíthetünk, ha étkezési olajba egyszerű keményítőt szórunk. Az összetevők pontos arányára nem túl érzékeny a folyadék, igyekezzünk nagyjából fele-fele arányban kikeverni. Próbaképpen az elkészített folyadékot egyik edényből egy másikba átöntve, a folyadéksugár közelébe feltöltött üveg, vagy ebonitrudat helyezve azt tapasztaljuk, hogy a folyadéksugár a feltöltött rúd felé eltérül (2-18. ábra).



2-18. ábra: Olajból és keményítőből készített ER folyadék feltöltött ebonitrúd mellett

A kísérletet önmagában olajjal elvégezve nem tapasztaljuk ezt a jelenséget, hiszen az olaj apoláris folyadék, azonban egy vízszög az ER folyadékhoz hasonlóan eltérül a polárossága folytán.



2-19. ábra: Kukoricakeményítő és napraforgóolaj elektromos tér nélkül és annak jelenlétében

A 2-19. ábrán napraforgóolajból és keményítőből készített elektorreológiai folyadékba merített, majd abból kiemelt elektródák láthatók. Az első esetben nem kapcsolunk feszültséget az elektródákra, így a folyadék azonnal kifolyik az elektródák közül, a második esetben 5000 V-os feszültséget használtunk, ekkor a

keverék a lapok között marad, onnan hosszú idő alatt sem folyik ki (T. Medvegy, 2012).

A kísérletet magunk is könnyen megismételhetjük, arra kell ügyelnünk, hogy amennyiben nem nagyfeszültségű tápegységgel (a hivatkozott videóban látható kísérlethez egy Stanford Research PS350 típusú tápegységet használtunk), hanem Van de Graaff generátorral, vagy elektromos megosztógéppel állítjuk elő a kellő feszültséget, abban az esetben a folyadékon keresztül a felhalmozott töltés gyorsan kisül, hiszen sem a generátor, sem a megosztógép nem képes néhány mA-es áramerősséget sem fenntartani. Ezért az elektródákat jól el kell szigetelnünk a folyadéktól. **Nagyfeszültségű tápegység használata esetén a kísérletet nagy körültekintéssel hajtsuk végre!** Elektródaként bármilyen fémlapot használhatunk, a közöttük lévő távolságot a felhasznált feszültségtől függően állítsuk be úgy, hogy még éppen ne üssön át! Érdeemes lehet egy egy szöveget – vagy bármilyen szigeteletlen fémdarabot – az elektródákhoz rögzíteni úgy, hogy azok éppen egy kicsivel közelebb legyenek egymáshoz az elektródáknál (lásd 2-19. ábra), így elkerülhetjük hogy egy esetleges kisülés átégesse az elektródákon lévő szigetelőréteget. (Ügyeljünk rá hogy a szögeket a lapos felükkel fordítsuk szembe egymással, hogy elkerüljük a csúcshatás okozta térerősség növekedést!)

2.1.5 Diákköri foglalkozások

Sajnos egy tanóra adta időkeret alatt hosszadalmasabb mérések elvégzése nehézségekbe ütközhet. Diákköri, szakköri foglalkozások során azonban már kicsivel több idő juthat esetleg egy-egy mérési kísérlet elvégzéséhez is, a továbbiakban ilyen elvégezhető kísérleteket mutatok be.

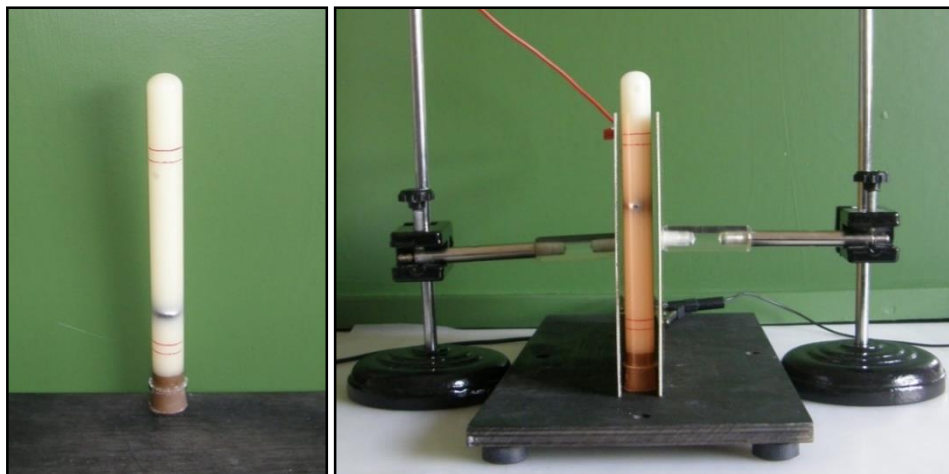
➤ **Viszkozitás mérése Höppler-féle viszkoziméterrel**

Egy szakköri foglalkozás során a már bemutatott módon elkészített elektroeológiai folyadék viszkozitásának elektromos térerősség-függését is megmérhetjük. A Höppler-féle “süllyedő golyós” viszkoziméter elvének felhasználásával mérhetjük meg az általunk készített elektroeológiai folyadék viszkozitását. A mérés során egy elektroeológiai folyadékkal töltött üvegcsőben mérjük meg, hogy mennyi időbe telik, amíg egy ismert sűrűségű és méretű üveggolyó az üvegcső egy kijelölt szintjéből egy másik, lejjebb kijelölt szintig lesüllyed. Az η (dinamikus) viszkozitás ekkor:

$$\eta = \frac{2g(\rho_b - \rho_f)r^2}{9l}t$$

ahol g a nehézségi gyorsulás (m/s^2), ρ_b a golyó sűrűsége (kg/m^3), ρ_f az ER folyadék sűrűsége (kg/m^3), r a golyó sugara (m), l a két kijelölt szint távolsága (m) és t a süllyedés ideje (s). Saját készítésű viszkoziméterrel természetesen lényegesen kisebb pontosságú méréseket végezhetünk el ezzel a módszerrel, mint egy professzionális műszerrel. Azonban maga a mérés nagyon jó lehetőséget biztosít arra, hogy a tanulók közelebbről megismerkedjenek a viszkozitás fogalmával és annak mérési módszereivel. A mérést külső elektromos tér jelenléte nélkül végezzük el először, majd ismétljük különböző térerősségek esetén. Van de Graaff generátorral, vagy elektromos megosztógéppel állíthatjuk elő a kellő feszültséget. Kalibrált elektroszkóp hiányában az alkalmazott feszültség nagyságrendileg megbecsülhető (nagy bizonytalansággal) az elektródák közelítésekor kialakuló szikrák nagyságából (~ 20 kV/cm), az eredetileg beállított elektródatávolság többszörözésével csökkenthető a térerősség nagysága (2-20. ábra). A térerősség megváltoztatásával megismételjük a kísérletet, majd grafikonon

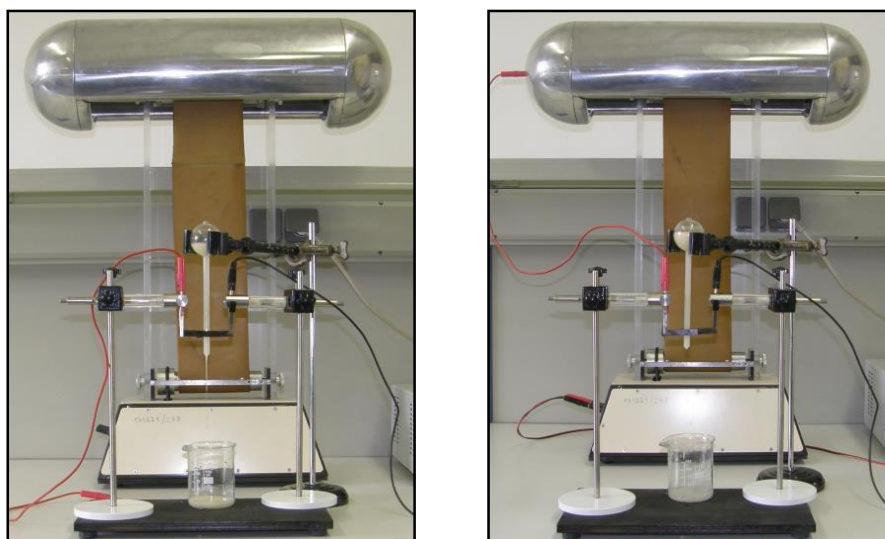
ábrázolhatjuk a süllyedési időket és a viszkozitás értékeket a térerősség függvényében. Természetesen a golyó és a tárolóedény anyagának a külső térrel való kölcsönhatása erősen befolyásolhatja a mérést, azonban ez az elrendezés kvalitatív módon szépen bemutathatja a jelenséget.



2-20. ábra: Házilag készített Höppler-féle elrendezés

➤ **Elektroreológiai folyadék áramlásának kontrollálása elektromos térrel**

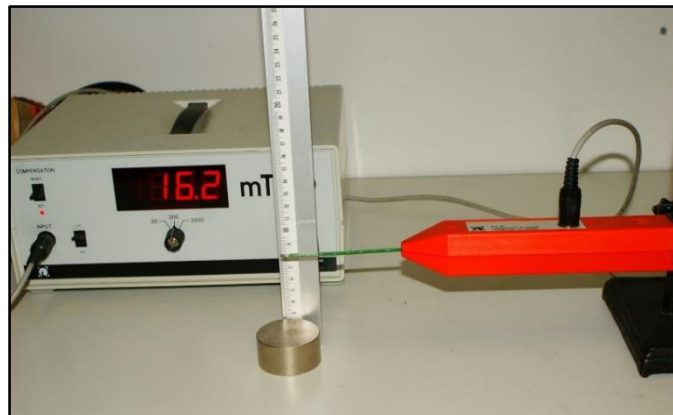
Amennyiben egy alul és felül is nyitott edénybe helyezett ER folyadékot az edény alján lévő csövön engedünk kifolyni, úgy a cső két oldalára elhelyezett elektródákra, ha feszültséget kapcsolunk, azzal lelassíthatjuk, vagy akár meg is gátolhatjuk a folyadék kiáramlását. (2-21. ábra). A mérés során határozzuk meg a kifolyás megállításához szükséges térerősséget!



2-21. ábra: Nagyfeszültséggel irányítható folyadékkiáramlás

➤ **Mérési kísérlet ferrofluiddal**

Az eddig bemutatott mérési kísérleteknél némileg hosszadalmasabb munkával (főként az adatelemzés miatt) be lehet mutatni, hogy a külső mágneses térbe helyezett ferrofluidum felszínén megjelenő tüskeszerű képződmények száma egyenesen arányos a mágneses térerősséggel (Y. Qingxin, et al., 2010).



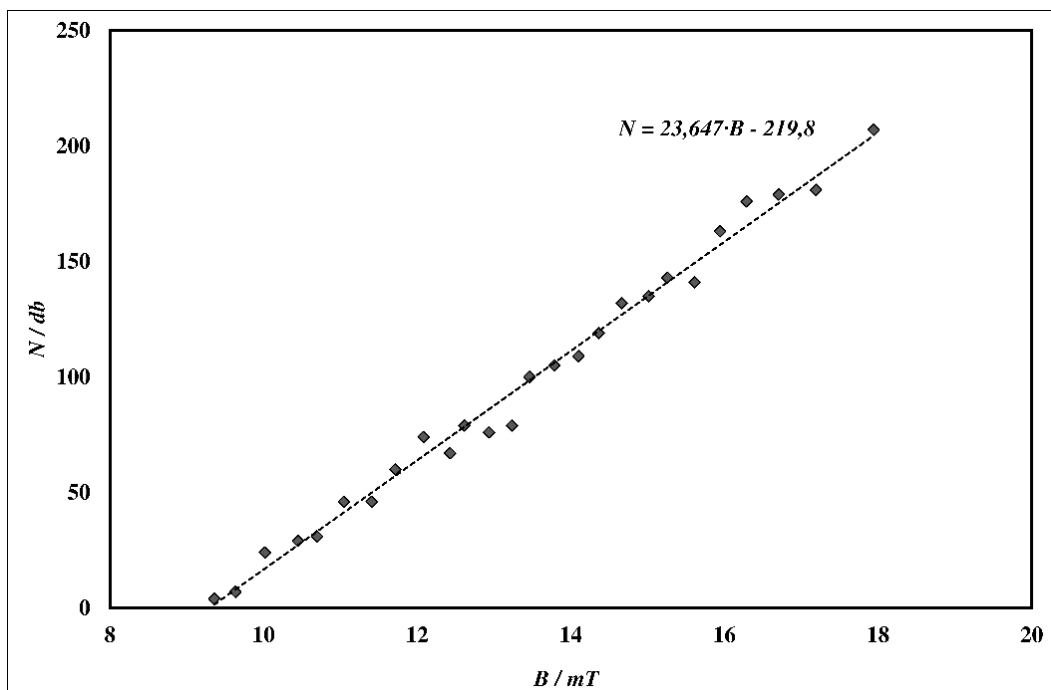
2-22. ábra: Mágneses térerősség meghatározása

A méréseket egy középiskolás tanítvánnyal, Turcsán Fruzsínával végeztük el. A mágneses térerősség meghatározására a felhasznált neodímium mágnesből különböző távolságokra egy magnetométert alkalmaztunk (2-22. ábra), azonban a mérés egy okostelefonnal is elvégezhető, a beépített három dimenziós magnetométer segítségével (T. Medvegy, 2014). A mérés elvégzéséhez egy állványzatot állítottunk fel, amelyet a rögzített helyzetű mágnesből különböző távolságokra tudtunk beállítani (2-23. ábra).



2-23. ábra: Az alkalmazott állványzat

A mérés során először a térerősség nagyságát mértük meg az állványzat helyzetének függvényében, majd a ferrofluidot az állványzaton lévő edénybe töltve csökkentettük az edény és a mágnes távolságát. Egy fényképezőgéppel fotókat készítettünk a ferrofluidum felszínéről, majd utólag minden egyes fénykép esetén megszámoltuk, hány tüskeszerű alakzat alakult ki az adott térerősség hatására (2-24. ábra).



2-24. ábra: Tüskeszám a mágneses térerősség függvényében

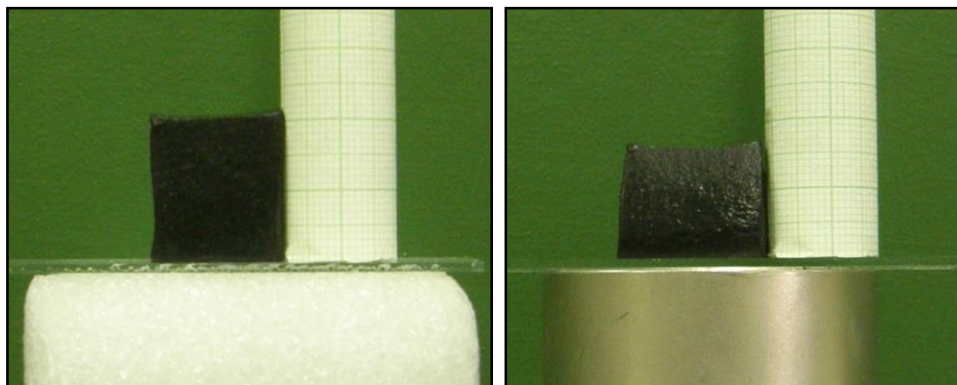
➤ Mágneses elasztomerek

A magnetoreológiai elasztomerek olyan viszkoelasztikus⁶ anyagok, amelyeknek a mechanikai tulajdonságait külső mágneses térrel lehet megváltoztatni. Az elasztomer kifejezés az elasztikus és a polimer szavak összeolvadásából keletkezett. Mágneses elasztomerek a polimer képlékeny fázisában mágneses részecskék diszpergálásával, majd a polimer kikeményítésével állíthatók elő.

⁶ képlékeny-rugalmas

➤ **Készítsünk mágneses elasztomerhez hasonló anyagokat!**

Mágneses elasztomerekhez hasonlatos anyagokat (de nem valódi elasztomereket) otthoni körülmények között is készíthetünk. Finom vas, vagy magnetit port keverjük el a kereskedelemben is kapható zselatinporral, mielőtt a forró vizet hozzáöntjük. Érdekes kevés vizet használni, így a zselatin megszilárdulása valamivel gyorsabb, ezáltal a kiülepedés elkerülhető. A gél megszilárdulása után ferromágneses tulajdonságokat mutat, alakját pedig képes megváltoztatni külső mágneses tér hatására. Az alakváltozás mértékét meghatározhatjuk az ábrán bemutatott elrendezéssel. Megmérhetjük például a relatív megnyúlást a mágneses térerősség függvényében különböző vas, vagy magnetit tartalmak mellett (2-24. ábra).

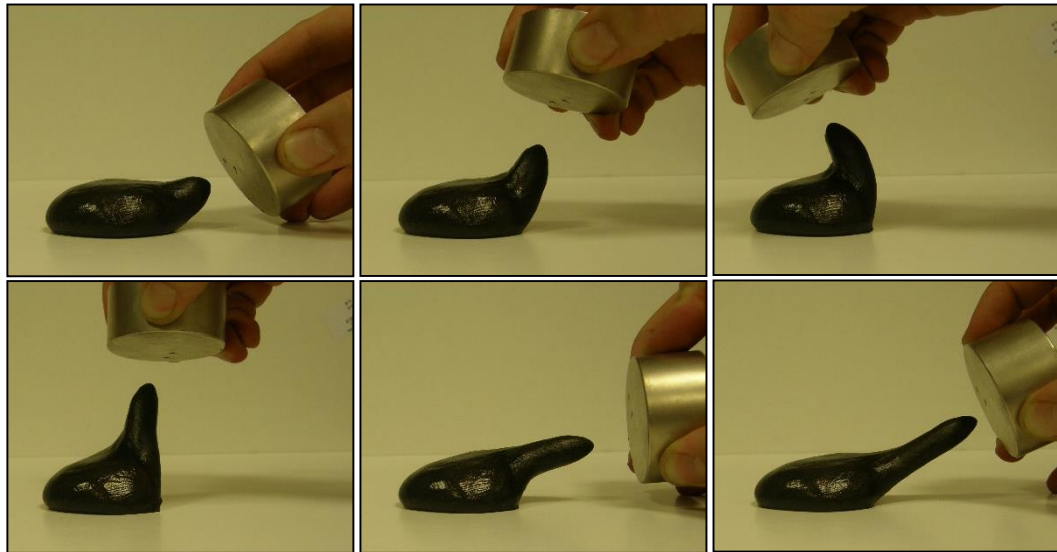


2-24. ábra: Saját készítésű mágneses zselatin mágneses tér jelenléte nélkül, majd annak jelenlétében

➤ **Mágneses gyurmalin**

A gyurmalin egy igen különleges anyag, amellyel már önmagában is sok érdekes jelenség bemutatható (A. Juhász, et al., 1984). Szilikon olajból és bórsavból állítható elő, azonban legegyszerűbben a kész termék megvásárlásával juthatunk hozzá, hiszen kereskedelmi fogalomban is kapható. Viszkoelasztikus tulajdonságokkal rendelkezik, azaz egy gyurmalinból gyúrt labda képes pattogni, hirtelen ütésnek rugalmasan ellenáll, de megfelelően nagy ütés hatására el is törhet vagy szakadhat. Magára hagyva azonban folyadékként szétfolyik (P. Tasnádi & A. Juhász, 1981) (T. Medvegy, 2017). Finom vas vagy magnetit porral való

összekeverése esetén mágneses gyurmához juthatunk (2-25. ábra), illetőleg ez a kész termék is megvásárolható.



2-25. ábra: Mágneses gyurma

2.2 „Ferrofluidum maggal ellátott differenciál transzformátoros dőlésszög érzékelő szenzor fejlesztése” projekt

A Pannon Egyetem Mérnöki Karának hagyományos nyári egyeteme minden évben megrendezésre kerül a műszaki- és a természettudományok iránt érdeklődő középiskolás diákok részvételével.

A program célja a középiskolás korosztály természettudományos és műszaki érdeklődésének és ismereteinek bővítése. Az egy hetes nyári egyetem során a diákok ízelítőt kapnak a természet- és műszaki tudományok legújabb kutatási eredményeiből és megismerhetik a kutatások korszerű eszköztárát. A gyakorlati foglalkozásokat, kísérleti bemutatókat és tudományos ismeretterjesztő előadásokat PhD hallgatók, illetve a Pannon Egyetem oktatói tartják. Az évek során számos témában tartottam ismeretterjesztő előadásokat a táborozóknak. A 2015-ös évi táborban az ER és MR folyadékokkal kapcsolatos előadásom után ismerkedtem össze egy, a téma iránt érdeklődő, akkor 16 éves középiskolás diákkal, Molnár Áronnal. Az egyik, az előadásom során említett ötlet keltette fel az érdeklődését és hamarosan közös kutatómunkába kezdtünk, amely során egy új típusú, ferrofluidum maggal ellátott differenciál transzformátoros dőlésszög- és gyorsulásérzékelő szenzort terveztünk és építettünk. A résztvevő diák a kutatási projekt összes szakaszában aktívan részt vett és rendkívül motiválttá vált a fizikai és műszaki háttérismeretek elsajátítására. A projektet diákom számos hazai és nemzetközi versenyen is bemutatta, amelyeken kiemelkedő eredményeket sikerült elérnie.

2.2.1 Ferrofluidum alkalmazása dőlésszög érzékelőkben

Dőlésszög mérésére alkalmas ferrofluidumot használó szenzorok készültek már számos kutatóhelyen. R. Olaru és munkatársa ferrofluidumban helyeztek el egy ingát, amit egy külső, tekercsek által létrehozott mágneses tér segítségével tartottak egyensúlyban, majd a tekercsáram méréséből következtek a szenzor dőlésszögére (R. Olaru & C. Cotae, 1997). Később R. Olaru egy másik munkatársával egy ferrofluidumban lebegő permanens mágnes helyzetét mérte külső tekercsek segítségével, amely helyzet a dőlésszög függvényében változott (R. Olaru & D.D. Dragoi, 2005). B. Andó és munkatársai egy vízzel töltött csőben elhelyezett egyetlen csöppnyi ferrofluid mozgásidejét mérték a cső fix pontjai

között a cső különböző szögű döntöttségei esetén (B. Andó, et al., 2012). M. Félix és munkatársai ferrofluidumra cserélték egy LVDT⁷ induktív magját, majd a mag lineáris elmozdításának hatását hasonlították össze az eredeti mag elmozdításának hatásával (M. Félix, et al., 2010). O. Baltag és munkatársai egy hengeres cellába töltöttek ferrofluidumot, majd a cella két kijelölt pontján külső tekercsek segítségével határozták meg a ferrofluidum szintjének magasságát az adott pontokban. A folyadékmagasságok méréséből következtettek a cella dőlésszögére (O. Baltag, et al., 2000).

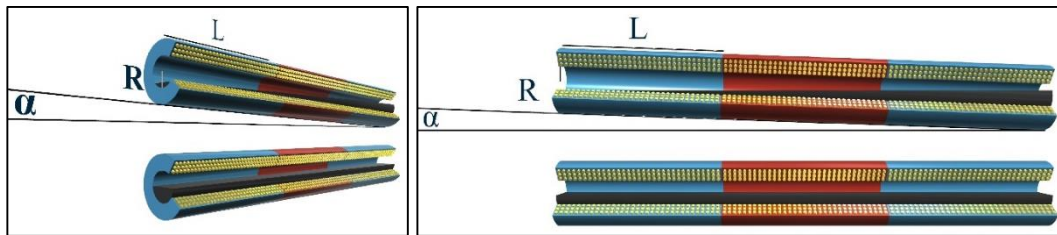
Kutatásunk célja egy teljesen új mérési eljárás kifejlesztése volt, aminek keretében egy, a fentiekhez hasonlóan ferrofluidummal működő dőlés- és gyorsulásérzékelő szenzort építettünk és teszteltük. Célunkul tűztük ki, hogy az általunk fejlesztett szenzor felbontásában és mérési tartományában felülmúlja az eddigi ferrofluidos dőlésszög-szenzorokat.

2.2.2 Ferrofluidum maggal ellátott differenciál transzformátor

A szenzor működésében egy LVDT (Linear Variable Differential Transformer) hossz menti elmozdulást érzékelő szenzorhoz hasonlít, amely egy elmozduló vasmagból és három tekercsből áll. A három tekercs egymás mellett helyezkedik el, középen a primer, kétoldalt pedig a kettő egymással ellentétes irányban tekercselt szekunder. A primer tekercset általában 1 és 20 kHz közötti frekvenciájú, 1 – 24 V-os effektív feszültségű szinusz jellel táplálják, így a vasmag pozíciójától függően különböző feszültségek indukálódnak a szekunder tekercsekben, amely feszültségek különbsége adja a szenzor kimeneti jelét. Az általunk kifejlesztett megoldásban a vasmagot egy ferrofluiddal félig megtöltött üvegcellával helyettesítettük. Az így kapott eszköz egy ferrofluidum maggal ellátott differenciál transzformátor, a továbbiakban FCDT (Ferrofluid Core Differential Transformer).

⁷ Nagy pontosságú elmozdulás érzékelésre alkalmas induktív elven működő érzékelő

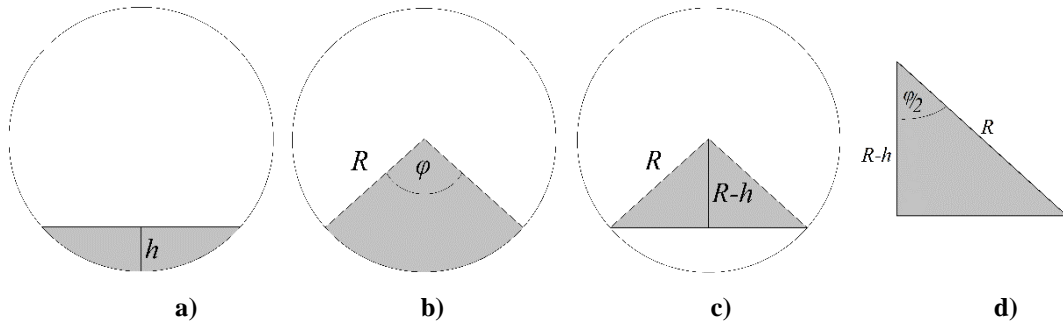
A ferrofluid a cella vízszintes helyzetében egyenlő arányban oszlik el a tekercsek által körbeölelt három térrészben. Amikor azonban valamely irányba megdöntjük, vagy gyorsítjuk a cellát a tekercsek tengelyének irányában, a három térrészben különböző mennyiségű ferrofluid található (2-26. ábra). Az eredmény az LVDT vasmagjának elmozdításához hasonlatos, a két szekunder tekercsben indukálódó feszültség megváltozik, ezáltal mérhetővé válik a cella dőlésszöge vagy gyorsulása is.



2-26. ábra: Az FCDT felépítése

A három tekercs belsejében elhelyezkedő cellát pontosan félig töltjük ferrofluiddal, ekkor a cellában $V_{pri} + V_{sec} = 3LR^2\pi/2$ folyadék található. Belátható, hogy a szenzor bármely mértékű megdöntése esetén a középső tekercsben mindig $V_{pri} = LR^2\pi/2$ térfogatnyi ferrofluidum található. A két szélső szekunder tekercs a dőlésszögtől függően osztozik a maradék $V_{sec} = V_{sec1} + V_{sec2} = LR^2\pi$ térfogatnyi ferrofluidumon.

Az első feladat a szekunder tekercsek által körbeölelt térrészben meghatározni a ferrofluidum mennyiségét a döntöttség függvényében. A keresett térfogatot integrálással határozhatjuk meg. Meg kell határoznunk, hogy a szekunder tekercs hossza mentén milyen magas a ferrofluidum szintje a cellában. Ebből meghatározhatjuk az adott keresztmetszet esetén mekkora területet tölt ki a ferrofluid, majd az L hossz menti integrálással számolhatjuk ki a teljes térfogatot. A cella bármely keresztmetszetéből az adott helyen h magasságú ferrofluid T területet tölt ki (2-27. ábrán a szürke színnel jelölt terület). A terület könnyen meghatározható, ha kivonjuk a 2-27. ábrán a jelölt $\frac{R^2 \cdot \varphi}{2}$ területből a 2-27. ábrán a jelölt $\frac{R^2 \cdot \sin \varphi}{2}$ területet.



2-27. ábra: A cella keresztmetszete

$$T = \frac{R^2 \cdot \varphi}{2} - \frac{R^2 \cdot \sin \varphi}{2} = \frac{R^2}{2} (\varphi - \sin \varphi)$$

φ szöget a 2-27. ábrán látható derékszögű háromszögre jól ismert azonosságból fejezhetjük ki:

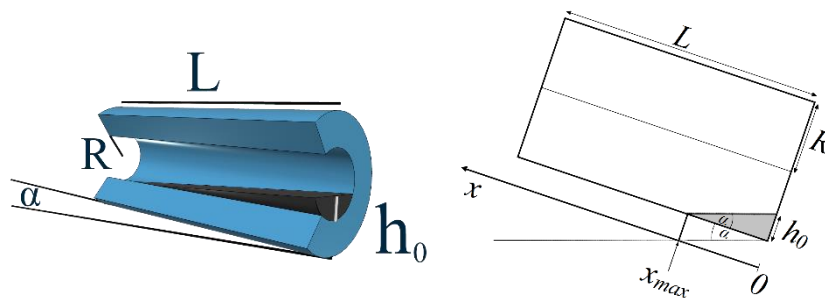
$$\varphi = 2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{R-h}{R} \right)$$

Az így kapott kifejezést a T területre kapott képletbe helyettesítve az alábbi összefüggést kapjuk:

$$T = \frac{R^2}{2} \left[2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{R-h}{R} \right) - \sin \left(2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{R-h}{R} \right) \right) \right]$$

(2-1. egyenlet)

Következő lépésként a h folyadékmagasságnak a cella menti tengelyen felvett x helyzettől, valamint a cella α döntöttségétől való függését kell meghatároznunk.



2-28. ábra: Ferrofluid szint a szekunder tekercsben

Tekintsük az egyik szekunder tekercs által körbeölelt térfogatot, amelynek a primer felőli oldaláról h_0 magasságban lép be a ferrofluidum (2-28. ábra). A keresett h folyadékmagasság ekkor az ábrán jelölt x tengely menti pozíciótól függően:

$$h = h_0 - x \cdot \tan \alpha$$

(2-2. egyenlet)

A fenti kifejezést nullával egyenlővé téve meghatározhatjuk, mennyire nyúlik be az x tengely mentén a ferrofluidum a szekunder tekercsbe:

$$0 = h_0 - x_{max} \cdot \tan \alpha$$

$$x_{max} = \frac{h_0}{\tan \alpha}$$

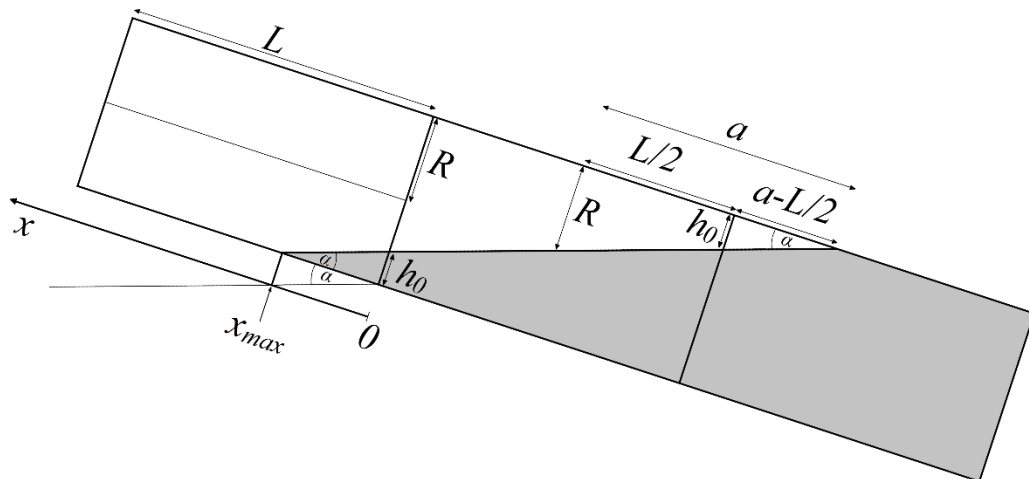
(2-3. egyenlet)

Láthatjuk, hogy a folyadékszint a h_0 belépő magasságtól, valamint az α döntöttségtől függ. Természetesen h_0 nem lehet független a döntöttség szintjétől, tehát a következő lépésben ezt kell meghatároznunk:

A 2-29. ábrán látható két hasonló háromszög (amelyek befogói R és a illetve h_0 és $a - L/2$) felhasználásával felírható:

$$\tan \alpha = \frac{R}{a} = \frac{h_0}{a - \frac{L}{2}} \Rightarrow a = \frac{R}{\tan \alpha}$$

$$\tan \alpha = \frac{h_0}{a - \frac{L}{2}} = \frac{h_0}{\frac{R}{\tan \alpha} - \frac{L}{2}}$$



2-29. ábra: Ferrofluid az α döntöttségű cellában

h_0 -át kifejezve:

$$h_0 = \tan \alpha \left(\frac{R}{\tan \alpha} - \frac{L}{2} \right) = R - \frac{L \cdot \tan \alpha}{2}$$

h_0 -át pedig a h -ra kapott 2-2. egyenletbe beírva:

$$h = \left(R - \frac{L \cdot \tan \alpha}{2} \right) - x \cdot \tan \alpha$$

A kapott eredményt a T -re vonatkozó 2-1. egyenletbe helyettesítve, majd azt egyszerűsítve az alábbi kifejezést kapjuk:

$$T(x) = \frac{R^2}{2} \left[2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{(L + 2x) \tan \alpha}{2R} \right) - \sin \left(2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{(L + 2x) \tan \alpha}{2R} \right) \right) \right]$$

h_0 -át az x_{max} -ra kapott 2-3. egyenletbe helyettesítve megkaphatjuk, hogy mennyire nyúlik be az x tengely mentén a ferrofluidum a szekunder tekercsbe:

$$x_{max} = \frac{h_0}{\tan \alpha} = \frac{R - \frac{L \cdot \tan \alpha}{2}}{\tan \alpha} = R \cot \alpha - \frac{L}{2}$$

(2-4. egyenlet)

Láthatjuk, hogy a fenti kifejezés felvehetne L -nél nagyobb értékeket is, azonban a cella vége miatt ez nyilván nem lehet igaz. Határozzuk meg azt az α' szöget, amelynél a ferrofluidum még éppen eléri a cella szélét ($x_{max} = L$):

$$x_{max} = L = \frac{R}{\tan \alpha'} - \frac{L}{2}$$

$$\alpha' = \tan^{-1} \frac{2R}{3L}$$

Tekintsük a 2-29. ábrán látható baloldali szekunder tekercset, amelyben $\alpha = 0^\circ$ értékhez tartozó kezdőpozíciótól pozitív α szögű döntöttség esetén a ferrofluidum V_{sec1} mennyisége csökkenni kezd.

$\alpha < \tan^{-1} \frac{2R}{3L}$ szögek esetén a folyadékszint még eléri a szélső falat (tehát 0-tól L -ig kell az integrálási határokat beállítanunk), ekkor a térrészben található ferrofluidum mennyisége:

$$V_{sec1} = \int_0^L T(x) dx$$

$$V_{sec1} = \int_0^L \frac{R^2}{2} \left[2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{(L + 2x) \tan \alpha}{2R} \right) - \sin \left(2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{(L + 2x) \tan \alpha}{2R} \right) \right) \right] dx$$

$\alpha \geq \tan^{-1} \frac{2R}{3L}$ szög esetén a folyadékszint már nem éri el a szélső falat (tehát 0-tól x_{max} -ig (2-4. egyenlet kell integrálnunk), ekkor a térrészben található ferrofluidum mennyisége:

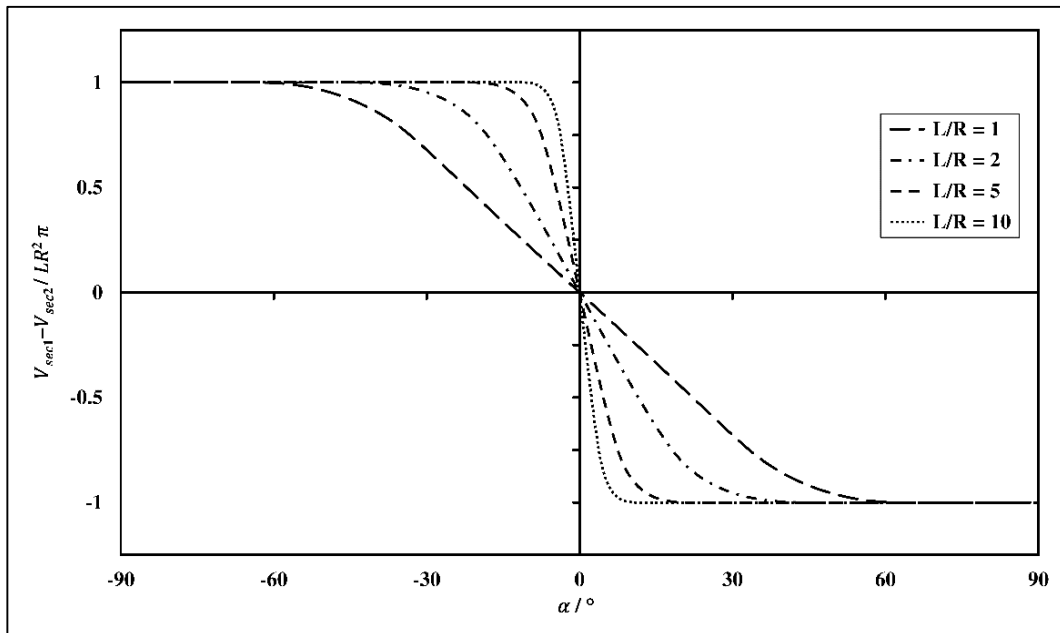
$$V_{sec1} = \int_0^{R \cot \alpha - \frac{L}{2}} T(x) dx$$

$$V_{sec1} = \int_0^{R \cot \alpha - \frac{L}{2}} \frac{R^2}{2} \left[2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{(L + 2x) \tan \alpha}{2R} \right) - \sin \left(2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{(L + 2x) \tan \alpha}{2R} \right) \right) \right] dx$$

A tekercsekben indukálódott feszültség arányos a tekercs által körbeölelt térrészben helyet foglaló ferrofluid mennyiségével. Mivel az LVDT szenzorok kimeneti jele a két szekunder tekercsben indukálódott váltófeszültségek különbsége, ezért a szenzor kimeneti jele a szenzorra jellemző M cellaállandóval való szorzás után:

$$U_{out} = M(V_{sec1} - V_{sec2}) = M(2V_{sec1} - LR^2\pi)$$

Az U_{out} 1-re normált értékét különböző L és R párosítások esetén -90° és 90° között ábrázolva jól látszik, hogy a mérési tartomány és az azon belüli érzékenység erősen függ az L/R aránytól. Alacsony arányérték esetén viszonylag nagy érzékelési tartományt kapunk, magas értékek esetén kis érzékelési tartomány áll a rendelkezésünkre, azonban nagy érzékenységet várhatunk a szenzortól (2-30. ábra).



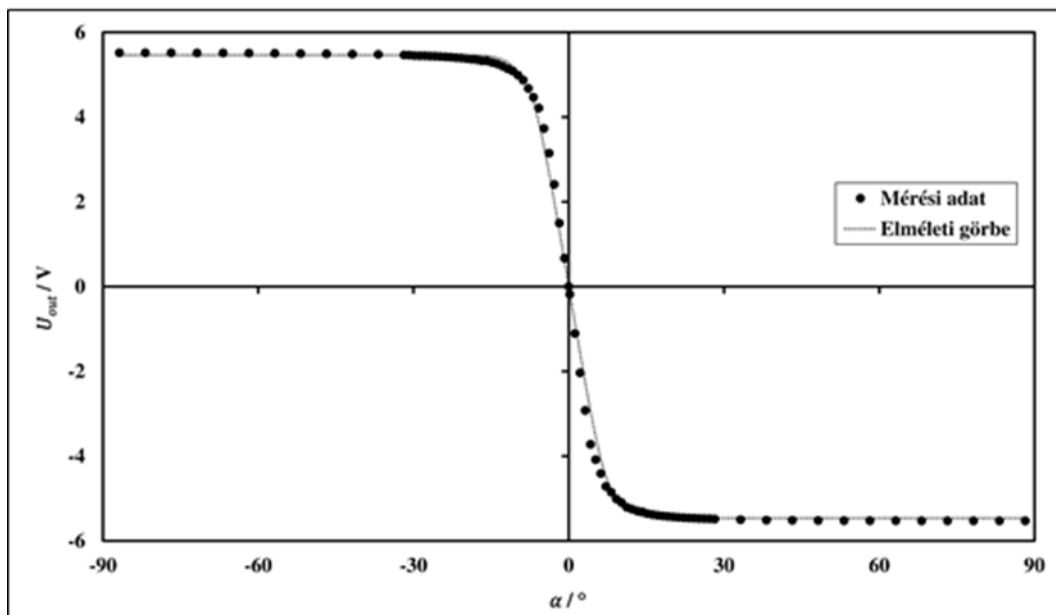
2-30. ábra: Az L/R arány hatása az FCDDT karakterisztikájára

Az általunk épített FCDDT-t egy AD598-as, LVDT-ékhez használható jelkondicionáló IC-vel teszteltük (2-31. ábra). Az elkészült eszköz tekercseinek hossza $L = 18$ mm volt, a belső cella sugara pedig $R = 3$ mm. A gerjesztő szinusz amplitúdója $A = 6$ V volt, frekvenciája pedig $f = 11$ kHz. Az M cellaállandót a cella

dimenzióinak ismeretében és az U_{out} szélsőértékeinek segítségével határoztuk meg, értéke $M = 10,847 \text{ mV/mm}^3$. Az elméleti görbét pedig az $L/R = 6$ arány és az M cellaállandó ismeretében adhatjuk meg (2-32. ábra).



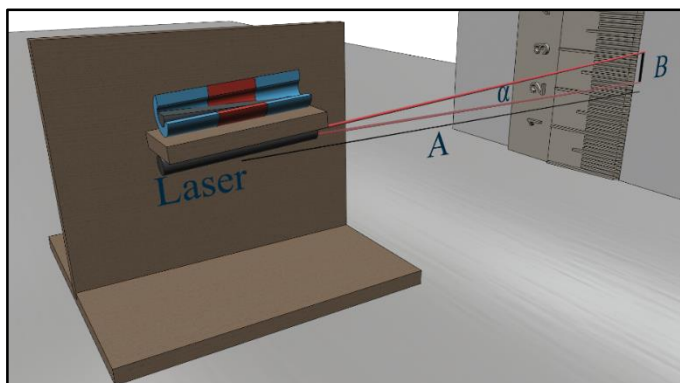
2-31. ábra: A mérési elrendezés



2-32. ábra: Kísérleti adatok és az elméleti görbe összehasonlítása

Az $\alpha = 0^\circ$ körüli kis szögek pontos meghatározását az alábbi ábrán (2-33. ábra) látható elrendezéssel végeztük. Az FCDT dönthető állványzatához a szenzorral párhuzamosan egy lézerforrást erősítettünk. A szenzorállvány forgástengelyétől

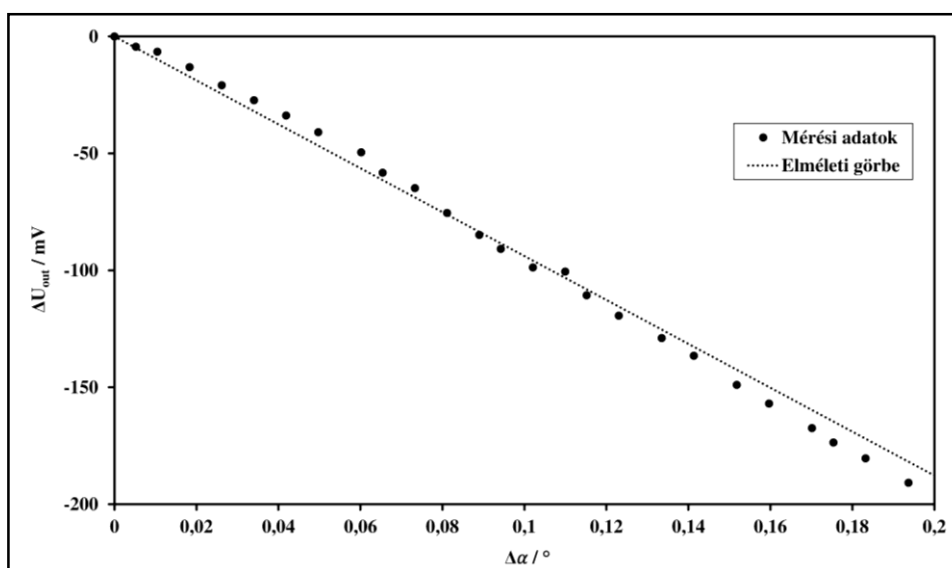
$A = 11$ m távolságra helyeztük el a milliméterpapírral borított felületet, amelyen a lézerfény-folt B elmozdulását tudtuk meghatározni.



2-33. ábra: A nagy pontosságú szögmérést lehetővé tevő kísérleti összeállítás vázlata

Az ismert A és a mért B értékek segítségével meghatároztuk az $\alpha = \tan^{-1} \frac{B}{A}$ dőlésszögeket és felvettük a szenzor adott szögekhez tartozó U_{out} kimeneti jeleit. A mérést a fent ismertetett FCDT-vel, azonos beállítások mellett végeztük el.

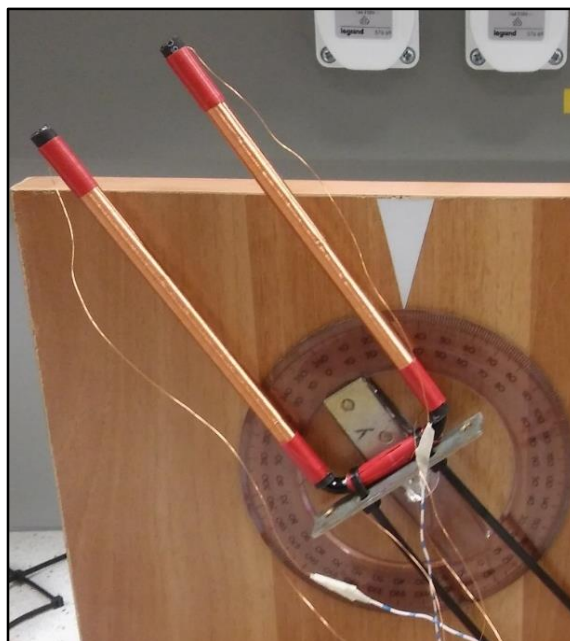
A szenzor $U_{out} = 0$ V kimenetéhez tartozó szöget tekintettük a mérés során a kezdőpozíciónak, majd egy mikrométercsavar segítségével döntöttük meg a szenzorállványt. A kimeneti feszültségeket egy Hameg HM8012 Digital Multimeter 16 bites AD konverterével mértük, majd az adatokat RS-232-es porton keresztül egy LabVIEW szoftver segítségével rögzítettük. A grafikonon (2-34. ábra) ábrázolt elméleti görbe a 2-32. ábrán látható görbe 0-tól 0,2 fokig tartó szakasza.



2-34. ábra: Az FCDT kimeneti jele 0 °-hoz közeli, kis $\Delta\alpha$ szögkitérések esetén.

2.2.3 Ferrofluidum maggal ellátott toroidális differenciál transzformátor

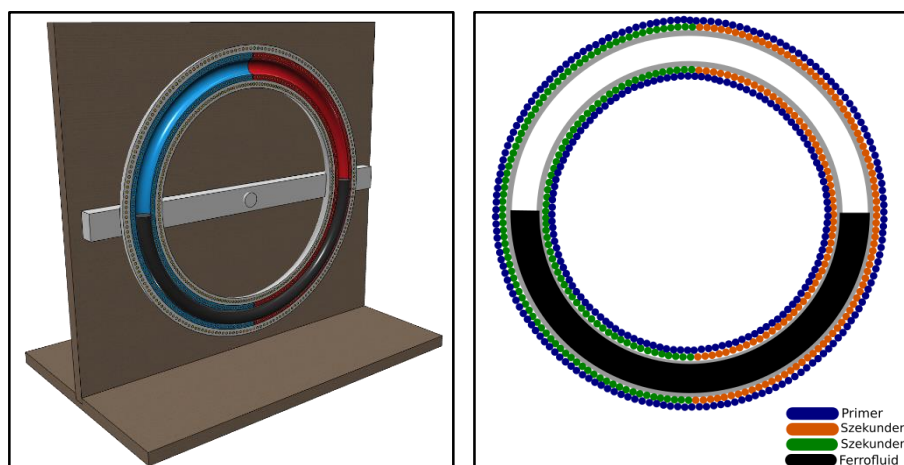
A projekt során számos további elrendezést próbáltuk ki a mérési tartomány szélesítésére. A módosítás első verziójában a három tekercset egy U alakban meghajlított üvegcső köré tekercseltük, középen alul a primer tekercsel, a két szárban pedig a szekunderekkel (2-35. ábra). Ezzel az elrendezéssel szélesebb dőlésszög tartományban sem ürül ki egyik szekunder által körbeölelt térrész sem, így a szekunderekben



2-35. ábra: Az U-alakú elrendezés

szélesebb tartományban indukálódik feszültség, aminek köszönhetően a szenzor mérési tartományának növekedését vártuk. A primer tekercs azonban túl kicsinek bizonyult és a primer tekercs szórt terének ily módon való kiküszöbölése is sokat rontott a szenzor érzékenységén.

A szenzor egy másik elrendezésében egy gyűrű alakban hajlított cső köré toroidálisan tekercseltük fel a három tekercset. A primer tekercs, amely a tórusz



2-36. ábra: A toroidális elrendezésű FCDT és a szenzortartó állványzat.

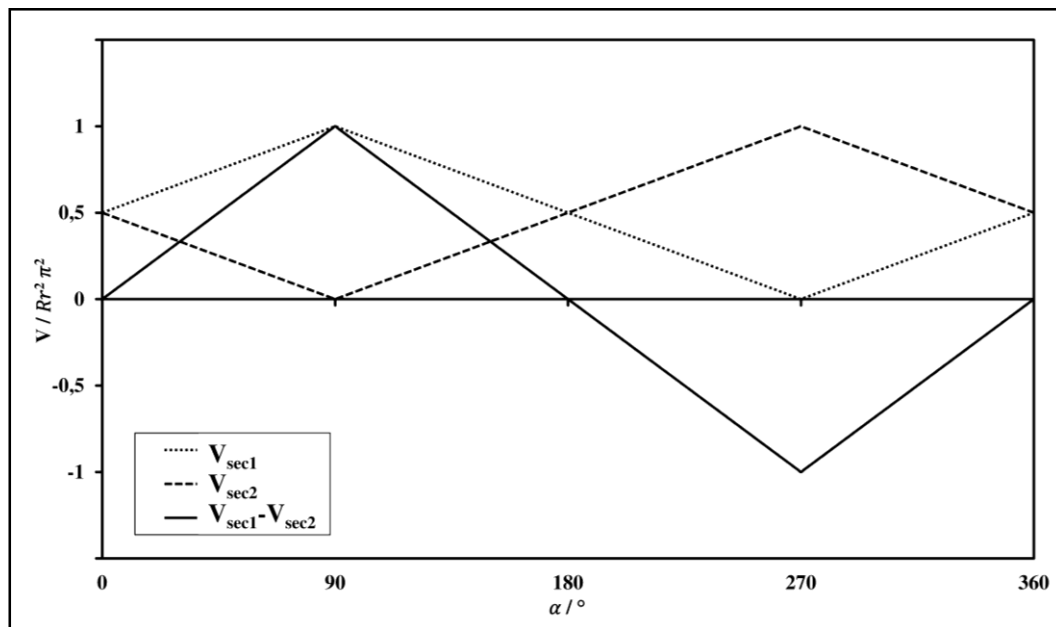
alak teljes hosszán található, 1600 menetes volt. A szekunderek a tórusz két felét borították és 800-800 menettel rendelkeztek (2-36. ábra).

A tórusz külső sugara $R = 80$ mm, a belső sugara pedig $r = 3$ mm volt (2-37. ábra). A belső cellát pontosan félig töltjük ferrofluiddal, ekkor a cellában $V_{pri} = V_{sec} = Rr^2\pi^2$ folyadék található, ezen a $V_{sec} = V_{sec1} + V_{sec2} = Rr^2\pi^2$ mennyiségen a két szekunder tekercs a dőlésszögtől függően osztozik. Könnyen belátható, hogy a szenzor forgatása során a két szekunderben található ferrofluid mennyiség egyenletesen változik a döntöttség szögével. $\alpha = 0^\circ$, illetve $\alpha = 180^\circ$ -nál a két szekunderben egyenlő $V_{sec1} = V_{sec2} = Rr^2\pi^2/2$ mennyiség található. $\alpha = 90^\circ$, illetve $\alpha = 270^\circ$ esetekben mindig csak az egyik szekunderben található ferrofluid (2-38. ábra).



2-37. ábra: Az általunk épített toroidális FCDT

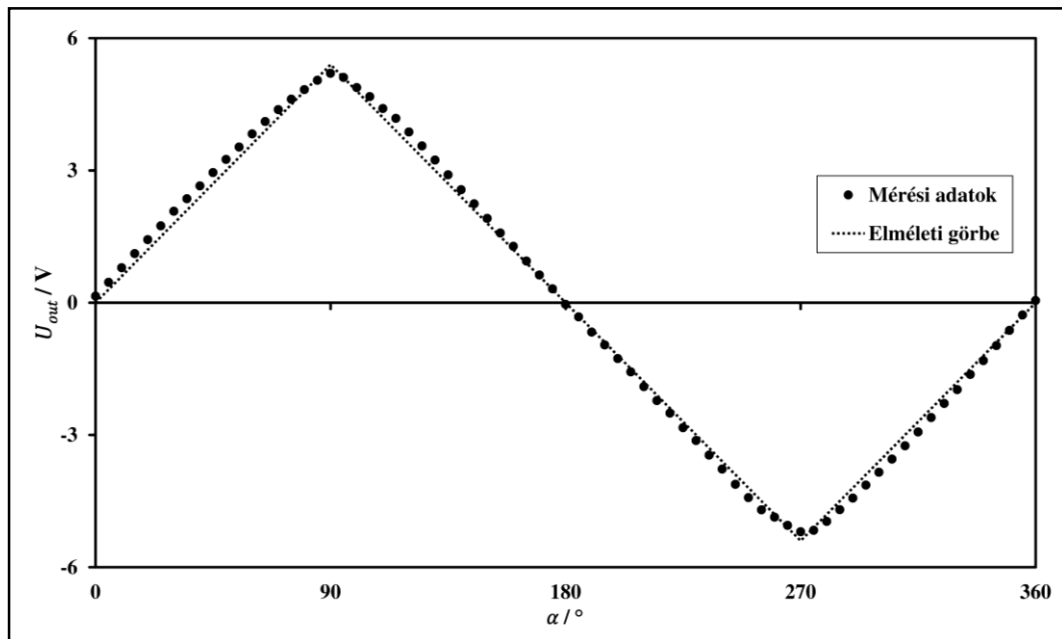
A toroidális elrendezésű szenzor kimeneti jelét $U_{out} = M(V_{sec1} - V_{sec2})$ alakban adhatjuk meg. Az M cellaállandót a cella dimenzióinak ismeretében és az



2-38. ábra: A szekunder tekercsek belsejében található ferrofluid mennyiség a döntöttség függvényében.

U_{out} szélsőértékeinek segítségével határoztuk meg, értéke $M = 0.76 \text{ mV/mm}^3$. Az alábbi grafikonon (2-39. ábra) az elméleti görbe és az általunk épített toroidális FCDDT-vel végzett mérések során kapott karakterisztika látható.

A gerjesztő szinusz amplitúdója $A = 6 \text{ V}$ volt, frekvenciája pedig $f = 11 \text{ kHz}$. A kimeneti feszültségeket egy Hameg HM8012 Digital Multimeter 16 bites AD konverterével mértük, majd az adatokat RS-232-es porton keresztül egy LabVIEW szoftver segítségével rögzítettük.



2-39. ábra: Az általunk épített toroidális FCDDT

2.2.4 Következtetések és további lehetőségek

A projekt során egy teljesen újszerű mérési eljárást dolgoztunk ki és számos különböző elrendezésű ferrofluidum maggal ellátott dőlésszög-szenzor építését és kimeneti jelek elméleti leírását végeztük el. Elméleti megfontolások alapján megmutattuk, hogyan befolyásolják a cella méretarányai a mérési tartományt, valamint az érzékenységet. Az egy egyenes mentén tekercselt verzió $0,005^\circ$ -os felbontással rendelkezett, ami egy nagyobb L/R aránnyal bíró szenzor építésével tovább is javítható. A toroidálisan tekercselt, önmagába záródó cellával rendelkező verzió kiváló linearitással és virtuálisan végtelen mérési tartománnyal bírt, bár a felbontása és érzékenysége elmarad a lineáris változatétól. A jelenleg a piacon megtalálható MEMS (Mikro-elektromechanikai) dőlésszög szenzorok tipikus

felbontása század, illetve ezredfok körüli, tehát az elkészült szenzor, még ha méretben még nem is, de pontosságban már felül tudja múlni a piaci eszközök jelentős részét. Ebből adódóan felhasználási lehetőségei igen széleskörűek, leginkább az igen pontos szögmérésben segítheti a kutatók és mérnökök munkáját. Az általunk épített szenzorok nem tartalmaznak mozgó alkatrészeket, megfelelően alacsony viszkozitású ferrofluidumot alkalmazva pedig a szenzorok reakcióideje is megfelelő. A szenzorok kimenetének külső mechanikai rezgésekből származó hibája esetlegesen a cella belsejébe helyezett áramlást befolyásoló elemek segítségével csökkenthető. A belső cella anyagának megváltoztatásával pedig csökkenteni lehet a ferrofluidum oldalfalakra való tapadását, üveg helyett egy alacsonyabb felületi energiájú anyag használatával (pl. PTFE - azaz teflon).

2.2.5 Versenyeredmények

A kutatási projekt egyik fő eredménye az új mérési eljárás kifejlesztése volt, azonban az sem elhanyagolható tény hogy sikerült bizonyítani az is, hogy az intelligens anyagok témája alkalmas a középiskolás diákok érdeklődésének felkeltésére a műszaki és természettudományok iránt.

A projektet témavezetésemmel Áron számos hazai és nemzetközi versenyen is bemutatta, amelyeken kiemelkedő eredményeket sikerült elérnie:

- A Tudományos Diákkörök XVI. Országos Konferenciája, Műszaki- és Reáltudományi Tematikus Konferencián I. helyezést ért el.
- A 25. Ifjúsági Tudományos és Innovációs Tehetséggondozó Versenyen pályamunkájáért kiemelt dicséretben részesült.
- A Hlavay József Országos Környezettudományi és Műszaki Konferencián a Műszaki szekcióban III. helyezést ért el.
- A Tudományos Diákkörök XVI. Kárpát-medencei Konferenciáján a National Instruments szekcióban I. díjban részesült.
- HackadayPrize2016 nemzetközi hardverfejlesztői és innovációs versenyen IV. helyezést ért el.
- Az International Conference of Young Scientists 2017 nemzetközi versenyen a mérnöki tudományok szekcióban aranyérmet, a poszter szekcióban pedig bronzérmet nyert.

- A XXXIII. OTDK Műszaki Tudományi Szekció Mechatronika 2. tagozatában Különdíjat nyert.
- A 26. Ifjúsági Tudományos és Innovációs Tehetségkutató Versenyen első helyezést ért el.

Ezek közül néhányat külön ki kell emelnem, hiszen az Innovációs versenyen elért eredményével Áron lehetőséget szerzett, hogy kijusson a 2017-es Nobel-díj átadásának ünnepélyére, valamint a felsőoktatási felvételi eljáráson 30 többletpontot szerzett. A TUDOK Konferencia Első helyezéséért további 20 felvételi ponthoz jutott. A HackadayPrize2016 versenyt pedig azért, mert világszerte több, mint 1000 pályázóból sikerült a mindösszesen öt díjazott közül a 4. helyezést (és ezzel a 10.000 dolláros jutalmat) megszerezni, ezzel az első magyar sikert aratni a verseny történetében. A sikereknek komoly médiavisszhangja is volt, Áronnal és velem számos interjút készített több országos rádióműsor (Class FM, Szertár Podcast) és televízióadó is (MTVA).

A projekt eredményeiről diákkal egy közös publikációt is írtunk, amely a neves Journal of Magnetism and Magnetic Materials folyóiratban jelent meg „Analysis of a ferrofluid core differential transformer tilt measurement sensor” címmel. Áron tehát vezetésemmel a kutatás összes szakaszában aktívan részt vett a kezdeti ötlet kidolgozásától kezdve az elméleti leírás megalkotásán át a tényleges mérések elvégzésig és az eredmények publikációjáig. Azokat a szükséges készségeket (pl. LabVIEW programozás, szakmai angol nyelv ismerete, fizikai háttérismeretek a ferrofluidumokról, az LVDT működése, NYÁK- tervezés és megvalósítás), amelyekkel a projekt előtt nem rendelkezett, annak során sajátította el azokat.

2.3 Cseppfolyós nitrogént alkalmazó kísérletek a természettudományos ismeretterjesztés terén

Egyetemi éveim során találkoztam először cseppfolyós nitrogént felhasználó demonstrációs kísérletekkel, amelyeket mindig is ámulattal figyeltük hallgatótársaimmal. Az utolsó két hallgatói évemben, demonstrátorként lehetőségem nyílt ezzel az anyaggal kísérletet bemutatni a Kutatók Éjszakája program keretei között. Mindezen pozitív tapasztalatok után később középiskolai tanárként és egyetemi oktatóként is számos folyékony nitrogént alkalmazó kísérleti bemutatót tartottam óvodásoktól kezdve általános és középiskolásokon át egyetemistáknak, dolgozóknak és nyugdíjasoknak egyaránt. Ehhez az előadáshoz kollegámmal egy rövid, figyelemfelkeltő videót is készítettünk, amelyet a meghívható előadáshoz tartozó rövid összefoglalóhoz is mellékelünk (T. Medvegy & G. Molnár, 2013). Ez a kísérleti bemutató az évente megrendezésre kerülő Hlavay József Országos Környezettudományi és Műszaki Diákkonferencia és a Kutatók Éjszakája programok egyik esti látványosságaként is megjelenik (1. számú melléklet).

Munkám során egy közel hetven kísérletből álló gyűjteményt dolgoztam ki. Ilyen mértékű gyűjtemény Magyarországon (és legjobb tudomásom szerint sehol máshol) eddig még nem létezett. Ezen kísérletek kidolgozása és előadása során sok tapasztalatot szereztem. Ezeket a tapasztalatokat és ötleteket az érkelődők és a kísérleteket reprodukálni kívánó tanárkollegák számára videó felvételeken rögzítettem. Az összegyűjtött kísérleteket témájuk alapján öt nagyobb témakörre osztottam és az így összeállított öt videót az interneten a YouTube video megosztón keresztül ingyenesen közzétettem. Az elérési útvonalak a hivatkozások között a 4.2 fejezetben találhatóak meg. A 2. számú mellékletben pedig egy tipikus 45 perces cseppfolyós nitrogént alkalmazó demonstrációs előadás kísérleteinek listáját adom meg javasolt didaktikai sorrendben.

Az itt ismertetett kísérletek egy részét az SZTE TTIK Kísérleti Fizikai Tanszék Szakmódszertani Csoportjának tagjaitól lestem el tanulmányaim alatt, külön kiemelve Dr. Papp Katalin Tanárnőt, aki számos kísérlet kitalálója, és akinek az előadásai alatt ismerkedtem meg a cseppfolyós nitrogénnel.

2.3.1 Cseppfolyós nitrogén viselkedése szobahőmérsékletű környezetben

A kísérletek első csoportjának témája a cseppfolyós nitrogén viselkedése a szobahőmérsékletű környezetünkben. Az itt következő kísérletek mindegyike a nitrogén folyamatos forrásával hozhatók kapcsolatba. A 21 kísérletet tartalmazó, ebből a témakörből készített videó 35 perc hosszúságú lett (T. Medvegy, Cseppfolyós nitrogén viselkedése szobahőmérsékletű környezetben).

➤ A nitrogén tulajdonságainak vizsgálata

Normál légköri nyomáson a cseppfolyós nitrogén forráspontja $-195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, ezért szobahőmérsékletű környezetben állandó forrásban van. Ezt a tulajdonságát egy üvegedénybe töltve mutathatjuk meg nagyobb közönségnek, azonban egy egyszerű főzőpohár elpattanhat a hirtelen hőhatástól, illetve amennyiben folyékony nitrogént tárolunk egy



2-40. ábra: Cseppfolyós nitrogén Dewar-edényben

egyszerű üvegedényben, annak külső – immár hideg – falára a levegő páratartalma hamar kikondenzálódik, átlátszatlanná téve azt. A legjobb megoldás egy duplafalú üvegedény alkalmazása, amelynek falai között vákuum van (Dewar-edény), ezért a cseppfolyós nitrogén tárolása mellett sem fagy ki a levegő páratartalma azonnal a külső falra. Ebben az edényben jól megfigyelhetjük a nitrogén folyamatos forrását, valamint megvizsgálhatjuk a színét is, amely színtelennek adódik (2-40. ábra).

➤ Oxidáció és a nitrogén

A nitrogén teszi ki légkörünk $78\text{ V/V}\%$ -át. A levegőben molekuláris (N_2) alakban található meg, amelyben az atomokat háromszoros kovalens kötés köt össze. Oxidáció szempontjából inert, nem táplálja az égést. Egy nagyobb szájú, cseppfolyós nitrogént tartalmazó edénybe égő gyertyát eresztve bemutatható, hogy a folyamatos forrás során képződő hideg – ezáltal normál

légköri nyomáson sűrű – nitrogéngáz kitölti az edényt egészen annak szájáig, onnan pedig a szájon átbukva süllyed lefele. A sűrű nitrogéngáz kiszorítja az égéshez nélkülözhetetlen oxigént, ezáltal a gyertya lángja az edény szájának vonalában azonnal kialszik.

➤ **Folyékony nitrogén lezárt lufiban és nejlonzacskóban**

A folyamatos gázfejlődéssel járó forrást szépen bemutatja, ha egy lufiba töltünk egy kevés (kb. fél deciliter) cseppfolyós nitrogént, majd a száját befogjuk. A fejlődő gáz hamarosan felfújja a lufit, azonban ahol a cseppfolyós halmazállapotú nitrogén a gumihoz ér, ott az elveszíti rugalmasságát. A lufi egy idő után



2-41. ábra: Folyékony nitrogén lezárt lufiban

kisebb ijedséget keltve kidurran. Ezt követően érdemes megvizsgálni a lufi maradványait, ugyanis szépen látszik, hogy ott keletkezett szakadás, ahol a legnagyobb mechanikai feszültségek léptek fel az anyagban. A lufi rojtosra szakad azon határréteg mentén ahol a folyékony fázisban lévő nitrogén még hozzáért tágulás közben (2-41. ábra). A kísérletet természetesen akár egy nejlonzacskóval is elvégezhetjük, azonban a szétszakadt nejlonzacskó vizsgálata nem olyan informatív, mint a lufié.

➤ **Lufi fújás folyékony nitrogénnel**

A forrás során képződő nagy mennyiségű gázzal akár egy lufit is felfújhatunk, azonban hogy elkerüljük az előző kísérletben bemutatott zajos véget, érdekesebb a nitrogént egy palackba önteni, majd annak szájára húzni a lufit. Lufi helyett akár egy nagyobb fecskendő is használhatunk. Ehhez egy kifűrt kupakkal kel lezárunk a palackot, majd a lyukba dughatjuk bele a fecskendőnk csövét (Vigyázzunk, hogy utóbbi esetben csak pár csepp nitrogént forraljunk el!).

➤ **Síp-fújás nitrogénnel**

A folyamatos forrás egy másik bemutatása lehet, ha például egy fél literes PET palackba kevés nitrogént öntünk, majd azt lezárjuk egy olyan

kupakkal, amelybe egy kisebb, négyszögletes lyukat vágunk. A lyukba egy sípot helyezve és a mellette lévő réseket elzárva (például ragasztással) megszólaltathatjuk a sípot. A folyamatosan elforró nitrogén a palack szájánál intenzív gázáramot hoz létre, amely csak a sípon át távozhat az üvegből.

➤ **Folyékony nitrogén forró vízbe öntve**

Cseppfolyós nitrogént alkalmazó kísérleteink során a nitrogént tároló edényből kibugyogó „fehér füst” a hallgatóság soraiban sokszor azt a tévképzetet kelti, hogy ilyen esetben a nitrogén gázt látják. Természetesen a gáz halmazállapotú nitrogén – csakúgy, mint a levegő, amelynek nagy részét kiteszi – teljesen átlátszó. A megfigyelt fehér „füst” nem más, mint a levegőből a hideg hatására kicsapódó pára. Ezt bemutathatjuk például úgy, hogy az edénybe fűjünk és ekkor – úgy, mint télen – meglátszik a leheletünk kicsapódó páratartalma. A másik lehetőség, hogy nagyobb mennyiségű cseppfolyós nitrogént öntünk pár méter magasságból egy lavórnyi forró vízbe. Ez felkavarja a vizet és a hirtelen nagy mennyiségben elforró nitrogén lehűti a forró víz fölötti légmennyiséget, ezáltal egy nagyobb ködpamacst hoz létre.

➤ **Folyékony nitrogén mosogatószeres vízbe öntve**

Készítsünk pár deciliternyi mosogatószeres vizet egy fél literes PET-palackba, majd öntsünk rá egy kevés cseppfolyós nitrogént! Megfigyelhetjük, hogy a folyékony nitrogén a víz felszínén marad, ugyanis sűrűsége kisebb, mint a vízé, $0,808 \text{ g/cm}^3$. Enyhe rázás hatására a víz és a nitrogén összekeveredik, ezáltal heves buborékképződés jön létre. A nitrogéngáz felfújja a képződő buborékokat, így a hab akár több méterre is kilőhet a palack összeszűkülő száján keresztül.

➤ **Szappanbuborék fújás**

Szappanos, vagy mosogatószeres víz segítségével egy vékony hárttyát vonhatunk egy edény szájára, amelybe előzetesen vizet, majd arra pár csepp nitrogént töltöttünk. Az elforró nitrogén felfújja a buborékot, aminek belsejében a víz és a hideg nitrogéngáz miatt átlátszatlan köd jön létre (2-42. ábra). Igen látványos, hogy a buborék kipukkanásakor a köd még egy pillanatig megtartja a formáját. Érdeemes minél szélesebb szájú edényt



2-42. ábra: Szappanbuborék fújás nitrogénnel

használni, illetve a mosogatószeres vízzel előzetesen bekenni az edény száját. A kezdeti hárttyát pedig például egy hosszú, mosogatószeres vízbe mártott szövetcsíkkal vihetjük fel.

➤ **Légágyú készítése**

Légágyú készítése házilag igen egyszerű, egy nagyobb tartályra, rugalmas oldalfalra és egy szűk, kör keresztmetszetű nyílásra van szükségünk ehhez. Ennek a leírásnak tökéletesen megfelel akár egy 1,5 literes PET-palack is. A palack oldalát picit összenyomva levegő áramlik ki az üveg száján, és egy önmagába visszaforduló gyűrűt képez, amely az edény szájára merőleges irányban egyben maradva távolodik az „ágyútól”. Ezzel a módszerrel távolról elfújható például egy gyertya lángja is. A keletkező gyűrű szemléltetésére a palackba egy kevés vizet, majd arra még kevesebb cseppfolyós nitrogént tölthetünk. A már ismertett okból ekkor fehér köd tölti ki a palackot, amely az oldalfalak összenyomásakor a képződő gyűrűt jól láthatóvá teszi. A keletkező gyűrűket alulról egy erős fényforrással megvilágítva látványos árnyjátékot hozhatunk létre a terem plafonján. Némi gyakorlással akár egymáson átbúvó gyűrűket is létrehozhatunk.

➤ **Belső hullámok bemutatása**

Két azonos halmazállapotú, de különböző sűrűségű anyag határfelületén, ha a rétegek nem-, vagy csak alig keverednek, szépen bemutatható a belső hullámzásnak nevezett jelenség. Az egyik réteg megmozgatásakor a két

réteg közötti határfelületen hullámok képződnek. Ez a jelenség okozza például, hogy a fjordoknál az óceán sósvizére rétegződő, a gleccserek olvadékból származó édesvizéből úgynevezett holt víz jön létre. Ez a szerkezeti elrendeződés a hajók mozgását megnehezíti, ugyanis azok mozgási energiájának jó részét a belső hullámozgás viszi el. A jelenség szépen bemutatható, ha egy edény aljára pár deciliter cseppfolyós nitrogént töltünk. Az elforró hideg, ezáltal normál légköri nyomáson sűrű nitrogéngáz kitölti az edényt egészen annak szájáig. Ott a hidegben a pára kicsapódik, ezáltal mintegy megfestve a sűrű nitrogéngázt. Az edény fölött megmozgatva kicsit a levegőt szépen látszik a határregegen kialakuló hullámozgás.

➤ **Hosszú cső belemerítése folyékony nitrogénbe**

Egy hosszú, egyenes fémcsővet a cseppfolyós nitrogént tároló edényünkbe merítve (úgy, hogy az egyik vége még kilógjon abból) azt tapasztaljuk, hogy a nitrogén szökőkútszerűen fröcsköl ki a cső felső végén. Ennek a jelenségnek az oka, hogy a cső a nitrogénnel kontaktusba lépve azt azonnal intenzív forrásra készíti. A belemérettkor a csőbe kerülő folyékony nitrogént az alatta is képződő nitrogéngáz a cső felső vége felé hajtja, és ezért jön létre a szökőkútszerű hatás. Vigyázzunk, mindig viseljünk megfelelő védőfelszerelést, és sose irányítsuk senkire a csövet!

➤ **Cseppfolyós nitrogén-szökőkút**

Valódi szökőkutat is készíthetünk egy PET-palack, egy fémcső és egy dugó segítségével. A palackot félig töltjük nitrogénnel, majd a dugóval - amelyet előzetesen átfürtünk és átdugtuk rajta a csövet – lezárjuk a palack száját. A cső vége érjen a folyadékszint alá és ügyeljünk rá, hogy a dugó és a palack szája légmentesen zárjon. Ekkor az egyetlen nyílást a cső jelenti majd. A nitrogén forrásakor egyre nagyobb nyomás lesz a palackban, amely a folyadékot a csövön keresztül a szabadba préseli. A cső száján kiáramló hideg nitrogéngáz, majd a cső lehülése után a cseppfolyós nitrogén erősen lehűti a fölötte található levegőt, aminek következtében a páratartalom jó része kicsapódik és ködöt képez. Vigyázzunk, mindig viseljünk megfelelő védőfelszerelést, és sose irányítsuk senkire a csövet!

➤ **Folyékony nitrogénnel működő ágyú készítése**

Egy zárt PET-palackba nitrogént töltve és azt lezárva a nyomás addig nő, amíg a palack fala már nem bírja tovább és felrobban. Azonban ha a palack száját egy gyengébb anyaggal zárjuk le, például nejlonnal – úgy, hogy egy kifűrt kupakkal odaszorítjuk – biztosíthatjuk, hogy a túlnyomás ne a palack falát, hanem a nejlont szakítsa át előbb. Az edény szájához egy vastagabb csövet szorítva – amibe előzetesen egy habzivacs labdát szorítottunk bele – irányíthatjuk a légáramot és egy kis ágyút hozhatunk létre.

A kísérletet akár egy pezsgőtablettás dobozzal is elvégezhetjük, öntsünk pár csepp nitrogént a dobozba, majd egy gyors mozdulattal helyezzük rá a kupakot. A doboz, amennyiben nem tarjuk elég erősen, a dugóval ellentétes irányba repül, ügyeljünk rá hogy se a dugó, se a doboz ne okozhasson sérülést senkinek!

➤ **Légpárnás kréta**

A kréta porózus szerkezete lehetővé teszi, hogy az előzetesen cseppfolyós nitrogénbe mártott kréta, a kivétel után egy sík felületre helyezve szinte teljesen súrlódásmentesen mozoghasson az adott felületen. Ennek oka, hogy a számos lyukon egyszerre kiáramló nitrogéngáz a kréta alatt egy légpárnát hoz létre.

A kísérlet egy pezsgőtablettával is elvégezhető, azonban a tablettá tömörebb, ezért a hatás nem olyan tartós.

➤ **Labda táncoltatás**

Egy Erlenmeyer-lombikba pár csepp nitrogént öntve, majd annak szájára egy pingpong labdát helyezve a labda segítségével lezárhatjuk a lombikunkat. Az edényben a forrás következtében növekvő nyomás megemeli a labdát, amely ekkor lebegni látszik, érdemes lehet filccel tetszőleges mintázatot rajzolni a labdára, hogy messzebből is jól látható legyen a mozgása.

➤ **Pingpong pörgettyű készítése**

Egy pingpong labdát egy forró tűvel két áttellenes ponton kissé ferdén (az ellentétes oldalakon egymással ellenkező irányból) átlyukasztva egy olyan eszközhöz juthatunk, amelyet ha a cseppfolyós nitrogénbe merítünk, az a

lyukakon keresztül megtelik egy kevés nitrogénnel. A labdát egy sík felületre helyezve azt tapasztaljuk, hogy a nitrogéngáz a lyukakon keresztül távozik a labdából, ezáltal forgásba hozva azt.

➤ **Bomba készítés – cseppfolyós nitrogén lezárt PET-palackban**

Egy PET-palackba pár deciliter cseppfolyós nitrogént öntve, majd a palackot egy kupakkal lezárva egy igen veszélyes eszközhez juthatunk. A belső nyomás növekedésének a palack oldalfala egy idő után már tud ellenállni, ekkor hangos (nagyon hangos!) durranással szétszakad. A palack darabjai szerencsére nem repülnek pár méternél messzebb, azonban mindenképpen alaposan meg kell fontolnunk, hol végezzük el ezt a kísérletet. Egy kőből épült tűzrakhely például alkalmas lehet erre a célra.

➤ **Rakétaépítés – vízzel, illetve nitrogénnel**

A cseppfolyós nitrogén remekül használható rakétaépítéshez is. Mindössze némi nitrogénre és egy PET-palackra lesz ehhez szükségünk. A kísérletet kétféle módon is elvégezhetjük, az első, hogy pár deciliter nitrogént töltünk a palackba, majd egy gumidugóval lezárjuk azt. A gumit a kezünkbe fogva a palackot fejjel lefele tartva a nyomás előbb utóbb kilövi a rakétát a kezünkből. A nyomás az edény száján át kinyomja a cseppfolyós nitrogént, így a lendület megmaradás értelmében a palack az ellenkező irányba gyorsul. A másik lehetséges elrendezés, hogy vízzel harmadáig töltjük a palackunkat, majd egy kevés (kb. fél deciliter) nitrogént töltünk rá. A palackot megfordítva a vízzel keveredő nitrogén hirtelen nagy nyomása kinyomja a vizet a palack száján, hasonló hatást eredményezve. Amennyiben a palack száját kissé például a másik tenyerünkhöz szorítjuk, miközben fejjel lefele fordítjuk, növelhető a kilövés magassága.

➤ **Szilárd nitrogén előállítása**

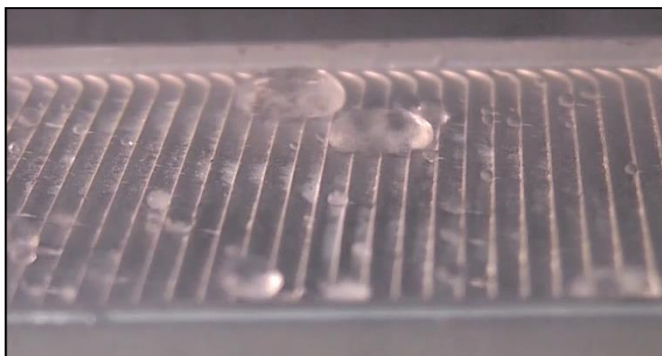
Amennyiben cseppfolyós nitrogént egy vákuumkamrába helyezünk, és egy szivattyúval elkezdjük kiszivattyúzni a recipiens gáztartalmát, azt tapasztalhatjuk, hogy a nyomás csökkenésével lecsökken a nitrogén forráspontja, ezért intenzív forrásba jön. A forrás során gyorsan hűlni kezd a folyadék, majd amikor körülbelül $-210\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra hűl, az alacsony külső nyomás és a hőmérséklete révén szilárd halmazállapotba vált át.

➤ **Leidenfrost effektus – nitrogéncseppek szobahőmérsékletű felületeken**

A nitrogén forráspontjánál az átlagos szobahőmérsékletű tárgyak mintegy 220 °C-al melegebbek. Ez a hőmérsékletkülönbség egy igen érdekes jelenséget tesz lehetővé, ez pedig az úgynevezett Leidenfrost effektus. Az effektus lényege, hogy amikor a folyadék hozzáérne a forráspontjánál sokkal melegebb tárgyakhoz, egy része azonnal elpárolog, ezáltal egy gágréteget képezve a folyadék és a forró felület között. Ez a gágréteg igen rossz hővezető, ezért a csepp viszonylag sokáig megmarad a forró felület ellenére. Felhevített serpenyőben, vagy főzőlapon hasonló viselkedést mutat az egyszerű vízcsepp is, azonban a cseppfolyós nitrogén esetében már eleve adott a nagy hőmérsékletkülönbség. Amennyiben nitrogént öntünk ki egy asztalra, a cseppek a kialakuló légpárna következtében mintegy súrlódásmentesen képesek mozogni a felületen.

➤ **Leidenfrost effektus – a lépcsőn felfelé lépegető nitrogéncsepp**

Egy megfelelően kialakított, fűrészfogminta profilú felületen a Leidenfrost effektusnak köszönhetően a cseppek mindig egy bizonyos – a mintázat által meghatározott – irányba kezdenek gyorsulni (2-43. ábra). A jelenség hatására a cseppek akár egy pár fokos dőlésszögű lejtőn felfelé is képesek haladni (H. Linke, et al., 2006). A magyarázat a cseppekből távozó gázáram felület általi irányítotttsága. A felület alakjának kialakítása következtében a gáz a csepp alól egy meghatározott irányba távozik, ezáltal azzal ellenkező irányban hajtva a cseppet.



2-43. ábra: Nitrogéncseppek a "lépcsőn"

2.3.2 Hétköznapi anyagok a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletén

A kísérletek második nagy csoportjának témája a cseppfolyós nitrogén hőmérséklete. Az itt következő kísérletek során a nitrogént, mint hűtőközeget alkalmazzuk, hétköznapi anyagokat hűtünk le a folyékony nitrogén hőmérsékletére és figyeljük meg azok viselkedését. A 19 kísérletet tartalmazó, ebből a témakörből készített videó közel 32 perc hosszúságú lett (T. Medvegy, Hétköznapi anyagok a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletén).

➤ **Gáztörvények - lezárt PET-palack és lufi hűtése**

Egy lezárt, üres PET-palackot folyékony nitrogénbe merítve lehűl a benne található levegő. A külső légnyomás ekkor a palackot behorpasztja, ezzel szépen bemutatathatjuk az izobár állapotváltozást. A kísérlet egy felfújó lufival is hasonlóan elvégezhető.

Amennyiben a lufinkba héliumot töltünk, annak hűtéskor a lufi átlagos sűrűsége a normál nyomású levegőé fölé nő, ekkor a lufira ható felhajtóerő már kisebb, mint a lufi súlya. Melegedéskor az átlagos sűrűség egyre csökken, majd mikor a felhajtóerő meghaladja a lufi súlyát, az elkezd felfelé szállni.

➤ **Gáztörvények – rugalmas membránnal lezárt lombik hűtése**

Az izobár állapotváltozás egy másik lehetséges bemutatása, hogy egy Erlenmeyer-lombik száját egy lufival lezárjuk, majd a lombikot cseppfolyós nitrogénbe merítjük. A lombikban lévő levegő lehűl, ezért a külső légnyomás a lufit az üveg belsejében „felfújja”.

➤ **Lezárt alumínium doboz hűtése**

Egy üres alumínium dobozt fejjel lefele egy gumilapra helyezve, majd cseppfolyós nitrogént öntve a dobozra bemutatatható, hogy a hűtés hatására lecsökkenő belső légnyomás miatt a külső légnyomás lassan összeroppantja a dobozt.

➤ **Főtt tojás bejuttatás szűk szájú lombikba**

Jól ismert kísérlet, hogy egy égő papírdarabot egy Erlenmeyer-lombikba dobunk, majd a lombik szájára egy megpuccolt főtt tojást helyezünk. Az üvegben lévő meleg levegő a tűz kialvása után lehűl, ezért a külső

légnyomás a tojást bepréseli a szűk nyíláson át. A kísérlet folyékony nitrogénnel is elvégezhető, ekkor a lombik szájára helyezük a tojást, majd a lombikot nitrogénnel kezdjük hűteni. A végeredmény azonos.

➤ **Pingpong labda hűtése**

Amennyiben egy pingpong labdát merítünk cseppfolyós nitrogénbe, a benne lévő levegő lehűl, ilyenkor a labdában lévő légnyomás lényegesen lecsökken. A labda műanyag fala elveszíti rugalmasságát, de a külső légnyomás a gömbalak miatt még így sem képes összeroppantani a labdát. Azonban ha csak egy kis mértékben is behorpasztjuk a labda falát, a nyomáskülönbség miatt a labda azonnal széttörik.

➤ **Levegő cseppfolyósítása**

Egy felfújt lufit egy lombik, vagy egy kémcső szájára húzunk, majd az üveget cseppfolyós nitrogénnel kezdjük hűteni. Jó pár perc elteltével a lufi összehúzódik, az üvegben pedig egy folyadék jelenik meg, ami nem más, mint a hideg falra kondenzálódott széndioxid, argon, oxigén (ezek forráspontja magasabb mint a hűtött fal hőmérséklete) és a nitrogén egy része.

➤ **Fénycső hűtése**

A fénycsövek, illetve kompakt fénycsövek olyan higanygőzt tartalmazó gázkisülési csövek, amelyek a gázkisülés UV-sugárzását az üveg belső felületére felvitt fényporral látható fénnyé alakítják. A fénycsövek folyékony nitrogénbe merítésével elérhető, hogy a bennük lévő higanygőz az oldalfalakon kondenzálódva ne legyen képes részt venni a kisülésben, ezért a fénycső elhalványodik, illetve a begyújtási idő is megnövekszik az alacsonyabb nyomás miatt.

➤ **Ködkamra építése**

Ionizáló sugárzás detektálására és szemléltetésére készíthetünk ködkamrát, amely a tútelített alkoholgőz töltött részecskék pályanyoma menti kicsapódásán alapul. Az alkoholgőz tútelített állapotát a diffúziós ködkamrában az alkoholgőz egyre hidegebb gáz tartományokon keresztüli átáramlásával hozható létre. A tútelített gőzben a részecskék pályája mentén keletkező ionok kondenzációs magként működnek, így a pálya

mentén egy apró kondenzcsík jelzi a részecske útját (Hrehuss & Molnár, 1982). A kísérlet során a nehézséget a túltelített gőz létrehozása jelenti. Az alkoholgőzt egy zárt edényben felül elhelyezett izopropil alkohollal (propanol) átitatott filc szolgáltatja. A hőmérsékleti gradienst pedig az edény aljának folyékony nitrogénnel való hűtésével állíthatjuk elő. Az eszköz összeállításának pontról pontra történő leírását megtalálhatjuk például a CERN honlapján is (CERN, 2015).

➤ **Fagyálló fagyasztás**

Az etilén-glikol 60%-os töménységű vízóldata köznapi nevével (fagyálló) ellentétben -36 °C -on megfagy, ezt a folyékony nitrogén segítségével könnyen megmutathatjuk.

➤ **Szappanbuborék fagyasztása**

Nagyon szép látványt nyújt, amikor egy szappanbuborék megfagy. A kísérlethez a buborékot nem szabad a nitrogénbe helyezni, hiszen ekkor azonnal kipukkan. Ellenben a cseppfolyós nitrogén fölött lévő hideg nitrogéngázzal könnyen lehűthetjük a buborékunkat. Problémát okozhat, hogy a zárt buborékban a levegő is lehűl, és ezáltal csökken a nyomása. Ekkor a külső légnyomás összeroppantja a vékony jégbuborékot, de amennyiben egy szívószállal egy kis nyílást hagyunk, amelyen át kiegyenlítődhét a nyomás, elkerülhetjük ezt a hatást. Egy alul már megfagyott, de felül kipukkant buborék remek csónakot alkot. A roppant könnyű félgömb formájú jégbuborék a sűrű nitrogéngázon képes „úszni”.

➤ **Világítórúd melegítése-hűtése**

Az úgynevezett világító rudakban egy kémiai reakcióban (difenil-oxalát és hidrogén-peroxid) keletkező instabil molekula (1,2-dioxietán-dion) bomlásakor felszabaduló energiát a rúdban található festékmolekulák abszorbeálják, majd emittálják fény formájában. A reagensek egyike a műanyag csövön belül egy üvegcsőben található, ennek eltörésével indulhat meg a reakció. A kémiai reakciók sebessége sok esetben erősen hőmérsékletfüggő, ezt mutathatjuk be azáltal, hogy egy világító rudat megtörünk, majd azt folyékony nitrogénnel hűtjük, illetve meleg vízzel melegítjük. A rúd fényereje függ a hőmérsékletétől.

➤ **Kén színváltása**

A kénnek számos allotróp módosulata ismert. Ezek egyike a cseppfolyós nitrogén segítségével bemutatható. A kén egy részét borítsuk ki egy tálcára, a másik részét pedig egy kémcsőben (ne zárjuk le) hűtsük le. A kémcső tartalmát borítsuk a szobahőmérsékletű sárga színű kén mellé és hasonlítsuk össze a színüket. A $-195,8\text{ °C}$ hőmérsékletű kén fehér színű, azonban ahogyan melegszik, egyre inkább visszanyeri eredeti sárga színét.

Néhány további anyag is hasonló színváltozást szenved a folyékony nitrogén hőmérsékletére lehűtve. A bróm vörösbarna színe pirossá válik, míg a higany-oxid vörösről sárgává változik. Ezek az anyagok azonban mérgezőek, ezért nem ajánlott a velük való kísérletezés.

➤ **Hőkapacitások vizsgálatát**

A cseppfolyós nitrogén segítségével ismert hőmérsékletre hűthetünk például fémeket, vagy akár vízjeget is, ezáltal könnyen megmérhetjük a vízjég fajhőjét egy kaloriméter segítségével. Bemutathatjuk, hogy egy jégkockát a folyékony nitrogén hőmérsékletére lehűtve, majd azt nulla fokos vízbe helyezve, az eredeti jégmennyiség kb. 60%-ának megfelelő vizet képes megfagyasztani.

➤ **3D jégszobor-nyomtatás**

A 3D nyomtatás elvét könnyedén bemutatathatjuk cseppfolyós nitrogén és egy fecskendőnyi víz segítségével. A 3D nyomtatás általánosan úgy történik, hogy egy műanyagot hőkezelés révén képlékennyé tesznek, majd egy extrudálófej segítségével egy felületre felvisznek, ahol megszilárdul. A nyomtatás során mozgathatjuk az extrudálófejet vagy a célfelületet is. Ez a módszer egy alulról cseppfolyós nitrogénnel hűtött fém-, vagy falap, illetve erre vékony rétegekben felvitt víz segítségével bemutatható. A víz szinte azonnal megfagy amint a hűtött felülethez ér, ezáltal újabb és újabb rétegek rajzolhatók rá. Azonban ahhoz hogy ne csak az elvet szemléltethessük, hanem valódi jégszobrokat „nyomtathassunk” sok gyakorlásra van szükség.

➤ **Rugalmas gumilabda hűtése**

Rugalmas anyagok, például gumi hűtésekor az anyag egyre ridegebbé válik. Egy gumilabda cseppfolyós nitrogénnel való hűtésével egészen üveggolyó

szerű – koppanó – hangot ad ki pattogáskor, illetve nagyban csökken a rugalmassága is, sokkal kisebb magasságokba pattan vissza. A teljesen áthűlt labda kivételkor a külsejénél kezd felmelegedni, azaz röviddel a nitrogénből való kivétel után egy kemény magból és egy rugalmas köpenyből álló – természetesen nem diszkrét részekből álló – szerkezetet vesz fel. Ez a szerkezet nagyon jól elnyeli az ütközési energiát, ezáltal a gumilabda szinte nem is pattan vissza.

➤ **Szobahőmérsékleten rugalmas anyagok törékenysége**

A szobahőmérsékleten rugalmas anyagok a folyékony nitrogén hőmérsékletére lehűtve rideggé, törékennyé válnak. Egy egyszerű gumicsövet, befőttes gumit, vagy egy lufit is eltörhetünk, amennyiben előtte cseppfolyós nitrogénbe merítettük azt.

➤ **Emlékező műanyag készítése**

Az alak-émlékező anyagok működését könnyen bemutathatjuk egy egyszerű befőttes gumival is, amennyiben deformált állapotban tartva cseppfolyós nitrogénnel hűtjük azt. Amíg a folyékony nitrogén hőmérsékletén van, a deformációja a kiváltó hatás elmúltával sem áll helyre, azonban amikor növeljük a hőmérsékletét, visszanyeri eredeti formáját (2-44. ábra).



2-44. ábra: "Emlékező műanyag" melegedése

➤ **Kriogasztronómia – háztartási kekszek, csipszek és mályvacukor**

A folyékony nitrogénbe merített porózus anyagok egy kevés nitrogént képesek felszívni, ilyenek például a háztartási kekszek, némely csipszek és a mályvacukor is. Ezeket az ételeket a nitrogénbe merítés után is biztonságosan fogyaszthatjuk, amennyiben csak kisebb falatokat eszünk. A már ismertetett Leidenfrost effektus megvédi a szánkat és a fejlődő hideg nitrogéngáz miatt ködpamacsokat tudunk fűjni rágás közben. Semmiképpen ne nyeljük le alapos szétrágás nélkül nitrogénnel átitatott ételt!

➤ **Kriogasztronómia – fagylalt és jegeskávé készítés**

A hagyományos házi fagylaltkészítés utolsó lépését, a több órás hűtést nyugodtan elvégezhetjük sokkal gyorsabban némi cseppfolyós nitrogén segítségével. Ügyeljünk rá, hogy a nitrogént kis mennyiségben adagoljuk, és a fagylalton folyamatosan keverjük. Nyári melegben a jegeskávét is hasonlóan gyorsan készíthetjük el. A forró kávéba állandó keverés mellett folyamatosan adagoljuk a nitrogént, a jegeskávé percek alatt elkészíthető. Ügyeljünk arra, hogy csak tiszta nitrogént használjunk, korábbi kísérletekből maradt, vagy koszos edényben tároltat ne alkalmazzunk!

2.3.3 Fémek és félvezetők viselkedése a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletén

A kísérletek harmadik nagy csoportjának témája a fémek és félvezetők viselkedése extrém hidegben. Az itt következő kísérletek során a nitrogént továbbra is, mint hűtőközeget alkalmazzuk, fémeket és félvezető eszközöket hűtünk le a folyékony nitrogén hőmérsékletére és figyeljük meg azok viselkedését. A 13 kísérletet tartalmazó, ebből a témakörből készített videó 21 perc hosszúságú lett (T. Medvegy, Fémek és elektronikai alkatrészek viselkedése a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletén).

➤ **Bimetall melegítése-hűtése**

A bimetall szalagok két különböző lineáris hőtágulási együtthatójú fémlemez összeszegecselésével állíthatók elő. Az azonos hosszúságú, különböző anyagi minőségű fémek melegítés hatására különböző mértékben tágulnak, a szegecselés miatt a fémek egy körív formájában meghajlanak úgy, hogy a külső köríven az a fém helyezkedik el, amelyiknek nagyobb a lineáris hőtágulási együtthatója. Ez a kísérlet természetesen hűtéssel is ugyanúgy megvalósítható, azonban ebben az esetben természetesen az ellenkező irányba görbül a bimetall-szalag. Amennyiben a szalag egyik végét a hűtés után rögtön melegíteni kezdjük, akár S alakban is meggörbíthetjük azt.

➤ **Gravesande-készülék hűtése**

A Gravesande-készülék egy fémgolyóból és egy vele azonos anyagi minőségű, a golyó átmérőjénél éppen egy picivel nagyobb belső átmérőjű gyűrűből áll. Azonos hőmérsékleten a golyó éppen átfér a gyűrűn, azonban a golyó melegítésekor annak anyaga csekély mértékben kitágul, így a lyukon már nem fér át. A gyűrű melegítésével, ha a két fém azonos hőmérsékletre kerül, immár ismét átfér a golyó. A kísérlet természetesen a fémek hűtésével szintén bemutatható, a cseppfolyós nitrogénbe mártott gyűrűn annak összehúzódása miatt a szobahőmérsékletű golyó nem fér át, azonban a golyó hűtésével ismét visszaállnak a méretarányok. A golyó hűtésével és a gyűrű egyidejű melegítésével még nagyobbá tehetjük a méretkülönbségeket

➤ **Hangvilla frekvenciájának vizsgálata**

Egy hangvilla által annak megütésekor kibocsátott hangfrekvenciája annak anyagától és geometriai méreteitől függ. A lágyabb fémek alacsonyabb hangot adnak, ki, míg a ridegebbek magasabbat. Bemutathatjuk, hogy egy hangvilla cseppfolyós nitrogénnel való hűtésével annak anyaga ridegebbé válik, magasabb hangot ad ki a megütésekor.

➤ **Ólomkolomp**

A szobahőmérsékleten akár kézzel is formázható lágy ólomból készült kolomp tompa hangot ad ki a megrázásakor, azonban a cseppfolyós nitrogénnel való lehűtése után lényegesen magasabb hangot ad ki.

➤ **Cink törékenysége a folyékony nitrogén hőmérsékletén**

A fémek a folyékony nitrogén hőmérsékletére lehűtve törékenyebbé válnak, ezt cinkkel mutathatjuk meg a legjobban. Egy cinkdarabot kalapáccsal többször megüthetünk, azonban amíg szobahőmérsékletű, nemigen fog eltörni. Azonban lehűtve lényegesen törékenyebbé válik, a kalapáccsal könnyen képesen leszünk eltörni a fémet.

➤ **Hőkereszt hűtése**

Egy úgynevezett hőkeresztrel az anyagok különböző hővezetési tényezőjét mutathatjuk be. A kereszt közepén elhelyezkedő csomópontból indulnak ki az egyenlő méretű, de különböző anyagú pálcák. A csomópontot melegítve azt tapasztalhatjuk, hogy a pálcák végére helyezett viaszgolyók egymás után leolvadnak. Természetesen a nagyobb hővezetési tényezővel bíró pálcák esetén következik ez be a leghamarabb, míg az alacsony hővezetésű anyagok esetén később. Ezt a kísérletet hűtéssel is elvégezhetjük, a csomópontra egy fémedényt helyezve, majd abba cseppfolyós nitrogént töltve hűthetjük a csomópontot. A pálcák végeire cseppentett egy-egy csepp víz megfagyása a pálcák hővezetési tényezőjének nagyság szerint csökkenő sorrendjében következik be.

➤ **Fémek elektromos ellenállásának csökkenése**

A fémek elektromos ellenállásának hőmérsékletfüggését szépen bemutathatjuk például egy tekercs segítségével, amelynek ellenállását egy multiméter segítségével folyamatosan mérjük, majd a tekercset folyékony nitrogénbe merítjük. Az eredeti hőmérséklet ismeretében kimérhetjük az adott anyag ellenállásának hőmérsékleti tényezőjét.

➤ **Örvényáramok bemutatása – mágnes a rézcsőben**

Amennyiben egy függőlegesen álló nem ferromágneses vezető csövön – például réz- vagy alumíniumcsövön – egy erős mágnesrudat ejtünk keresztül, azt tapasztaljuk, hogy a csőhöz képest mozgó mágnes miatt örvényáramok indukálódnak mind a mágnes felett, mind alatta. Az örvényáramok iránya alul és felül ellentétes, ezek mágneses tere Lentz törvényének értelmében alul taszító erőhatást fejt ki a mágnesre, felülről pedig vonzót. Ennek következtében a nehézségi gyorsulás ellenében az örvényáramok lassítják a mágnes zuhanását. Mérjük meg a csövön való áthaladás idejét, majd hűtsük le a csövet folyékony nitrogén segítségével. Megismételve a kísérletet azt tapasztaljuk, hogy az áthaladási idő a többszörösére növekedett. A jelenség magyarázata, hogy a cső elektromos ellenállása a hőmérsékletváltozás hatására lényegesen lecsökkent, ezáltal ugyanaz a hatás erősebb örvényáramot képes indukálni a csőben.

➤ **Örvényáramok bemutatása – a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletére hűtött alumínium viselkedése erős mágneses térben**

Az előző kísérletben bemutatott hatást egy vékony alumíniumlappal és egy erős neodímium mágnessel is bemutathatjuk. Mozgassuk a mágnest a lap fölött és figyeljük meg hogy, az alumíniumlap enyhén megmozdul a mágnes közelítésekor és távolításakor. Hűtsük le a fémlapunkat cseppfolyós nitrogén segítségével, majd ismételjük meg a kísérletet. Az előbbieken tapasztalt hatás a többszörösére erősödik az alumínium elektromos ellenállásának csökkenésével.

➤ **Örvényáramok bemutatása – Lenz ágyú**

Egy hosszú vasrúd egyik végére tekercset csévélve, majd a tekercsre váltakozó feszültséget kapcsolva úgynevezett Lenz-ágyúhoz juthatunk. A vasrúd szabad végére egy vezető anyagból készült gyűrűt húzva, mikor bekapcsoljuk az elektromágnest, a rúdban hirtelen kialakuló változó mágneses tér hatására a gyűrűben örvényáram indul meg. A gyűrűben folyó örvényáram mágneses tere - Lenz törvénye értelmében - olyan, hogy a rúd és a gyűrű mágneses tere taszítják egymást. A rúdról ilyenkor egy könnyebb gyűrű le is repülhet. Figyeljük meg, hogy milyen magasra repíti a gyűrűt az ágyúnk, majd merítsük cseppfolyós nitrogénbe a gyűrűt. A kísérletet ezután a hűtött gyűrűvel megismételjük és azt tapasztaljuk, hogy az ágyúnk a gyűrűt többszörös magasságba képes fellőni.

➤ **Villanykörte izzószála folyékony nitrogénben**

Egy egyszerű villanykörte üvegburkolatát amennyiben eltávolítjuk, abban az esetben az izzószálat feszültség alá helyezve a szál pár pillanat alatt elég. A körtében eredetileg megtalálható védőgáz oxigénmentes volt, ezért az izzásban lévő szál oxigén hiányában nem oxidálódhatott el. Amennyiben egy üvegburkolat nélküli izzószálat cseppfolyós nitrogénbe merítünk, és így helyezzük feszültség alá, a szál szépen világít. A cseppfolyós nitrogénben a védőgázéhoz hasonló oxigénmentes állapotban a szál sokkal tovább képes világítani. (Megjegyzem, hogy egy kevés oxigén mindig kondenzálódik a cseppfolyós nitrogénben, ezért pár perc után a szál eloxidál.) A világító izzószál a forrásban lévő nitrogénen belül igen látványos, érdemes

elsötétíteni a termet, illetve duplafalú üvegedényben tárolt nitrogénben elvégezni a kísérletet.

➤ **Fényemittáló dióda hűtése**

Egy teljesen más elven működő világítótesttel szintén végezhetünk kísérleteket a cseppfolyós nitrogénnel. Egy vörös, vagy narancssárga fényemittáló dióda a cseppfolyós nitrogénbe merítése során – amennyiben közben folyamatosan világít – megváltoztatja a színét. Először sárgássá, majd zöld színűvé válik a kibocsátott fény (2-45. ábra)

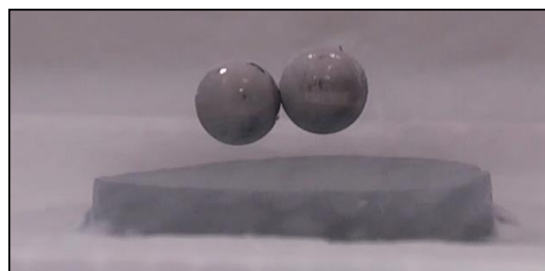


2-45. ábra: LED fényváltozása a hűtés során

A jelenség magyarázata, hogy a félvezetők hűtésekor a tiltott sáv kissé kiszélesedik, ezáltal a kibocsátott fény hullámhossza csekély mértékben megnő (J. Wiley, 1986). Ahogyan az előző kísérletet is, ezt is érdemes elsötétített teremben, illetve duplafalú üvegedényben tárolt nitrogénben elvégezni.

➤ **Szupravezető anyagok bemutatása**

Amennyiben hozzájutunk egy kevés magas átmeneti hőmérsékletű szupravezető kerámiához, azt a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletére hűtve igen látványos effektust mutathatunk be. A lehűtött



2-46. ábra: Neodímium mágnes a szupravezető fölött

szupravezető fölé például egy erős neodímium mágnesst helyezve azt tapasztalhatjuk, hogy a mágnes lebeg a kerámia fölött, ez a jelenség az úgynevezett Meissner-Ochsenfeld-effektus következménye (2-46. ábra).

2.3.4 Kísérletek cseppfolyós oxigénnel

Cseppfolyós nitrogén segítségével képesek vagyunk folyékony oxigént előállítani. A kísérletek negyedik nagy csoportjának témáját folyékony oxigén előállítása, és az azzal elvégezhető kísérletek alkotják. A 6 kísérletet tartalmazó, ebből a témakörből készített videó nem egészen 10 perc hosszúságú lett (T. Medvegy, Kísérletek cseppfolyós oxigénnel)

➤ Cseppfolyós oxigén előállítása

Normál légköri nyomáson a cseppfolyós oxigén forráspontja $-182,95\text{ }^{\circ}\text{C}$, tehát csaknem $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ különbség van a nitrogén és az oxigén forráspontja között. Egy, a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletére hűtött felületen a levegő oxigénje képes kondenzálódni, ugyanúgy, ahogy a fürdőszobákban a hideg csempén kondenzálódik a vízpára zuhanyzás után. Egy legömbölyített aljú fémedénybe (vagy például egy teáskannába) folyékony nitrogént töltve azt tapasztaljuk, hogy az edény külső felén egy folyadékréteg képződik, és csepeg le annak aljáról (2-47. ábra). Ezt a folyadékot egy kívülről hűtött edényben – például egy nitrogénnel teli pohárba állított kémcsőben – felfoghatjuk.

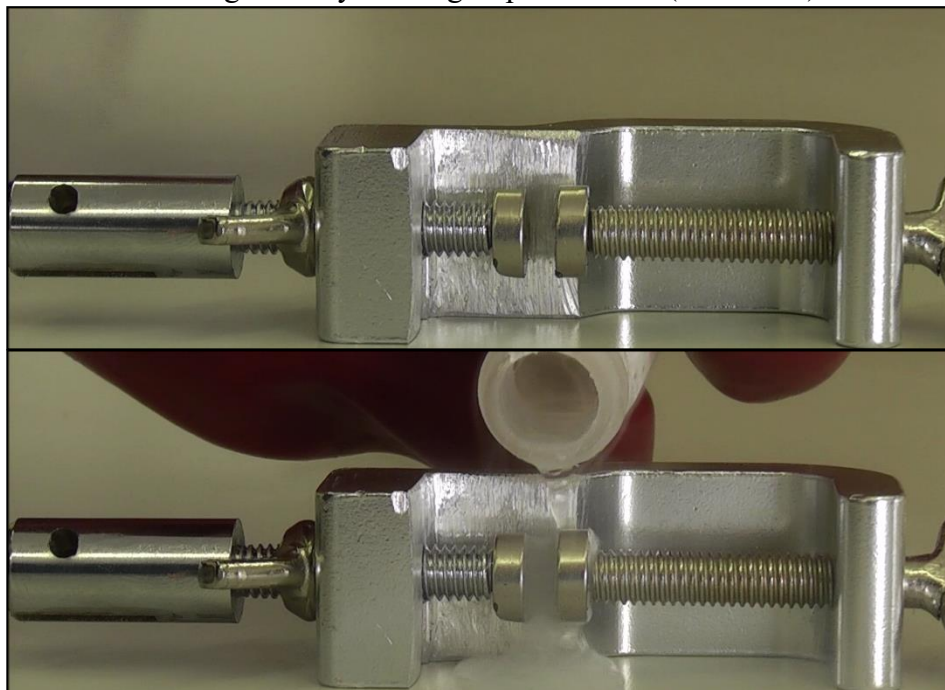


2-47. ábra: Cseppfolyós oxigén kondenzációja

➤ A folyékony oxigén paramágnesessége

A cseppfolyós oxigén erősen paramágneses, relatív permeabilitása 1,0036 ezért a mágnes mindkét pólusa gyengén vonzza. Egy erős neodímium

mágnesre, vagy két mágnespofa közé folyékony oxigént öntve bemutatható ez a tulajdonsága, hiszen az oxigén a mágnespofák között marad. A kísérletet nitrogénnel megismételve azt tapasztaljuk, hogy az oxigénnel ellentétben a nitrogén elfolyik a mágnespofák közül (2-48. ábra).



2-48. ábra: A cseppfolyós oxigén paramágnesessége

- **Égő anyagra csepegtetett cseppfolyós oxigén**
A cseppfolyós oxigént égő, vagy izzásban lévő fadarabra csepegtetve azt tapasztaljuk, hogy a cseppek hatására az oxidáció folyamata egy pillanatra felgyorsul, a fadarab fényesebben kezd izzani.
- **Égő anyag belemerítése cseppfolyós oxigénbe**
Amennyiben sikerült a már ismertetett módon pár köbcentiméternyi folyékony oxigént összegyűjteni, öntsük azt át egy előzetesen lehűtött fémedénybe, vagy olvasztótégelybe, majd dobjunk bele egy izzásban lévő fadarabkát. A fadarabot a Leidenfrost effektus megvédi a gyors lehűléstől, a forrásban lévő oxigén pedig erősen táplálja a fadarab égését. Ezt a kísérletet is érdemes elsötétített teremben elvégezni.
- **Folyékony oxigénnel átitatott anyagok égése**
A folyékony oxigénnel átitatott vattát, ha meggyújtjuk, az úgynevezett lőgyapothoz hasonló intenzitással ég el.

➤ **Acélgyapot égése oxigén dús környezetben**

A vékony acélszalakból álló acélgyapotot meggyújtva, majd azt cseppfolyós oxigént tartalmazó edénybe helyezve az acél olyan intenzitással ég el, hogy egy része megolvad. Vigyázzunk üvegedényben elvégezve ezt a kísérletet az edényünk minden bizonnyal el fog pattanni a hősokk következtében!

2.3.5 Az élő anyagok és a cseppfolyós nitrogén

Az utolsó nagy témakörbe tartozó kísérletek az élő anyagok viselkedését vizsgálja a folyékony nitrogén hőmérsékletén. A 8 kísérletet tartalmazó, ebből a témakörből készített videó nem egészen 8 perc hosszúságú lett (T. Medvegy, Az élő anyagok és a cseppfolyós nitrogén)

➤ **Virágok és élő anyagok törékenysége**

Az élő szövetek nagy mennyiségű vizet tartalmaznak, ez a vízmennyiség a szövet cseppfolyós nitrogénbe történő merítésekor megfagy és törékennyé válik. Ez a jelenség például egy szál virággal szépen bemutatatható. Helyezzük folyékony nitrogénbe a virág fejét, majd kivétel után törjük össze azt.

➤ **Sejt-modell viselkedése**

Az emberi test fagyasztással való hibernálása során a sejtek víztartalmának következtében a fagyás során képződő jégkristályok szétroncsolják a sejteket. Ez a folyamat sajnos lehetetlenné teszi egy ilyen eljárás túlélését. Ezt a jelenséget egy modellkísérlettel mutathatjuk be. Töltsünk kevés vizet egy lufiba, majd zárjuk azt le légmentesen. Dobjuk a lufinkat cseppfolyós nitrogénbe, de ügyeljünk rá hogy a lufit végig teljesen ellepje a nitrogén (a víz magas fajhője miatt ilyenkor nagy mennyiségű nitrogén forr el, ezt a mennyiséget pótolnunk kell, hogy a nitrogén végig ellepje a lufit). A lufi, illetve a víz külső rétege fagy meg legelőször, azonban később a belső részek is megfagynak, ami a térfogat növekedésével jár. A fagyott lufi anyaga, illetve a külső jégburok egy idő után nem képes elviselni a fellépő mechanikai feszültséget, ezért szétpattan.

➤ **A hideg felülethez odafagyó nyelv**

Évente számos fagyási sérülést okoz, hogy telente egyes kísérletező kedvű emberek hideg fémfelületeket próbálnak megnyalni, ami egyes esetekben a nyelv odafagyásához vezet. Ezt a jelenséget egy nedves papírtörülkövel, vagy nedves vattával és egy nitrogénnel hűtött fémdarabbal könnyen bemutathatjuk. A nedvesség hatására a fémhez érő papír vagy vatta szinte azonnal a fémhez fagy.

➤ **Tükörtojás készítése**

Amennyiben egy forrásban lévő olajjal teli serpenyőbe egy tojást ütünk bele, úgy tükrötojáshoz juthatunk. Látványra hasonlatos jelenség, amennyiben a serpenyőnkben olaj helyett cseppfolyós nitrogén található. A fagyott „tükrötojás” nagyon hasonlóan néz ki a valódihoz.

➤ **Banán-kalapács készítése**

Egy banán – annak magas víztartalma miatt – cseppfolyós nitrogénbe merítve igen keményre képes fagyni, akár egy szög beverésére is alkalmas lehet. Szöget pedig akár gyurmából, vagy gyurmaragasztóból is formázhatunk magunknak. A „szögek” nitrogénnel való hűtése következtében szintén elveszítik rugalmasságukat. Érdekes lehet például, ahogyan egy banánkalapáccsal egy gyurmaszöveget ütünk bele például egy almába.

➤ **Fagyasszuk meg az ujjunkat!?**

Ez a „kísérlet” inkább egy bűvészmutatvány, amelyet a folyékony nitrogénnel végezhetünk el. Egy átlátszatlan gumikesztyű egyik ujjába egy megfelelő hosszúságúra vágott virslit helyezünk, majd a kezünkre húzzuk úgy, hogy a virslivel helyettesített ujjunkat a tenyerünkhöz hajlítjuk. A virsli ujjat helyezzük folyékony nitrogénbe, majd ha már teljesen átfagyott, vegyük ki és üssünk rá kalapáccsal (Vigyázzunk, hogy jó ujjra üssünk!). Mivel a teljes átfagyás hosszadalmas, ezért érdemes lehet előfagyasztani a virslit a kísérlet előtt. Természettudományos szempontból ez a „kísérlet” természetesen nem ad semmi újat, azonban a tapasztalatom szerint egy ilyen jellegű ismeretterjesztő előadás során majdnem annyira fontos a figyelem és érdeklődés felkeltése a természettudományok iránt, mint az átadott

konkrét tudás. Persze nem szabad túlzásba esni sem, és show műsorra változtatni a természettudományosnak induló előadást. Egy-egy ehhez hasonló kísérlettel azonban meg lehet találni egy egészséges egyensúlyt.

➤ **Leidenfrost effektus – emberi kéz leöntése, cseppfolyós nitrogénbe merítése**

A már ismertett Leidenfrost effektus a kezünket is képes pár pillanatig megvédeni a fagyási sérülésektől, amennyiben arra cseppfolyós nitrogént öntünk, vagy abba merítjük. Ügyeljünk rá, hogy egy másodpercnél ne legyen hosszabb a kontaktus!

➤ **Leidenfrost effektus – egy korty cseppfolyós nitrogén!?**

Ugyanezen hatás akár a szánkat is képes megvédeni, egy pár csepp folyékony nitrogént akár a szánkba is vehetünk, amennyiben azonnal kifűjjük azt. A cseppfolyós nitrogént lenyelni azonban életveszélyes! Ezzel a kísérlettel csak akkor próbálkozzunk, ha más nagy biztonsággal vagyunk képesen kezelni a nitrogént (Én több éves tapasztalattal a hátam mögött kísértem meg először elvégezni).

3 Multimédiás eszközök felhasználási lehetőségei a középiskolai fizikaoktatásban

3.1 Okostelefonok a fizikaoktatásban

A modern kor kommunikációs –, és a szórakoztató ipar eszközei egyre inkább belopják magukat a tanulók életébe. Mára már a legtöbb középiskolai osztályban kevés olyan fiatal akad, aki nem rendelkezik okostelefonnal vagy tábla PC-vel. Ezek a hardverek számos olyan szenzort és az abból érkező adatok feldolgozására használható szoftvert tartalmaznak, amelyek felhasználhatóságuk szempontjából vetekedhetnek a fizikaszertárak eszközeivel. Ezeknek az eszközöknek a világszerte rohamos terjedésével lassan a tanulók legtöbbször zsebében ott lapul egy olyan eszköz, amelynek számítási kapacitása bőven túlesz a NASA gépeinek kapacitásán a Holdra szállás évében. Ezek a szerkezetek tartalmaznak egy processzort, belső memóriát és háttértárat, a vezérlést pedig érintőképernyőn keresztül oldják meg. A legtöbb készüléket felszerelik még GPS-el, kamerával, WiFi és Bluetooth kommunikációs lehetőséggel, és ami a fizikatanítás szempontjából talán a legfontosabb, különféle szenzorokkal. Ezekkel az érzékelőkkel számos új kísérleti elrendezés válik megvalósíthatóvá az osztálytermekben és a diákköri foglalkozások során.

A hazai és nemzetközi szakirodalomban több cikk is foglalkozik az okostelefonok fizikaoktatás terén való felhasználhatóságával. Michael Hirth és munkatársai, valamint ezzel egy időben Lutz Kasper és munkatársa szintén állóhullámokat hoztak létre minkét végén nyitott illetve csak az egyik végén nyitott csövekben, majd a hallható hang spektrális eloszlását vizsgálva határozták meg a hangsebességet (M. Hirth, et al., 2015) (L. Kasper, et al., 2015). Martin Montiero és munkatársai fizikai ingák mozgását vizsgálták az okostelefonokba épített gyorsulásmérő szenzorok segítségével (M. Monteiro, et al., 2015). Egy másik csoport csatolt rezgéseket vizsgált szintén a gyorsulásérzékelő felhasználásával (J. C. Castro-Palacio, et al., 2013). P. Klein és munkatársai a Doppler effektust vizsgálták úgy, hogy egy lemezjátszóra helyezték az okostelefonjukat, majd annak mikrofonjával egy álló hangforrás által kibocsátott hang frekvenciáját vizsgálták (P. Klein, et al., 2014). Jochen Kuhn és Patrik Vogt a nehézségi gyorsulás értékét

határozták meg számos különböző elrendezésben okostelefonok felhasználásával (J. Kuhn & P. Vogt, 2013). Egy spanyol csoport pedig az egyes okostelefonokba épített megvilágítottság mérésére alkalmas szenzort használták fel rezgőmozgások vizsgálatára. Egy álló fényforráshoz képest harmonikus rezgőmozgást végző testre rögzítették az okostelefont, majd a megvilágítás mértékéből következtettek a fényforrás és a telefon helyzetére (J. A. Sans, et al., 2013).

Hazánkban is számos fizikatanár foglalkozott már a témával. Piláth Károly tangensgalvanométerként alkalmazott okostelefont (K. Piláth, 2017), illetve súrlódási együttható mérésére is felhasználta azt (K. Piláth, 2017). Beke Tamás és diákjai pedig egy kerékpár mozgási jellemzőinek mérésére használták fel okostelefonjaikat (T. Beke, 2015). Stonawski Tamás pedig az okostelefonok QR-kód olvasási képességét alkalmazta a fizikaoktatás terén (T. Stonawski, 2015).

3.1.1 Az Android operációs rendszer

Általánosságban a PC-szerű funkciókkal bíró mobiltelefonokat nevezzük okostelefonnak, vagy smartphone-nak (az Apple cég által gyártottakat iPhone-nak). Ennek a komplex hardvernek az irányításához természetesen szükség van egy megfelelő operációs rendszerre, amely kezeli mindezen funkciókat. Jelenleg, ahogy eddig is az elmúlt évek folyamán, komoly csata zajlik a fejlesztők között.

Az egyes operációs rendszerek piaci részesedését tekintve - a 2016 harmadik negyedéves adatok alapján - jelenleg egyértelműen az Android dominál a maga 86,8%-ával (Gartner, 2017), így egyértelmű, hogy mely rendszeren futó programokkal érdemes foglalkoznunk elsősorban.

Az Android operációs rendszerekre írt - ingyenes és fizetős - applikációk tárházát érhetik el a telefontulajdonosok az internetre csatlakozó mobiljukon keresztül. Ezt a funkciót az Android esetében Google Play Áruház-nak nevezik (Google Play, 2017). Mivel a Google Play-en elérhető alkalmazások száma 2016 nyarán lépte át a két milliót, így nem is remélhetem, hogy e munka a fizikaoktatás számára felhasználható szoftvereket a teljesség igényével mutassa be.

A továbbiakban felhasznált, a Google Play-ről letölthető, minden esetben ingyenes és kipróbált szoftverek elérési útvonalát a hivatkozáslistában adom meg

(4.3). Az applikációk angol nyelvű bővebb leírásai a Google Play honlapján megtalálhatók.

3.1.2 Az okostelefon mint segédeszköz

A fizikaoktatásban - ahogy persze más tárgyak esetén is – az okostelefonokat mint segédeszközöket a lassan már megszokott módon alkalmazhatjuk. A stopper és számológép funkciók a régebbi telefonokban is rendelkezésre álltak, de míg a számológépek esetén csak az alapszámítások elvégzésére volt beépített szoftver, az okostelefonokra már telepíthetünk tudományos számológép funkciókkal is ellátott programot, például a *RealCalc* (RealCalc, Google Play). Lementhetünk különféle adatbázisokat, mint például az *ElectroDroid* (ElectroDroid, Google Play) és a *PeriodicTable* (PeriodicTable, Google Play) nevű applikációk. Az előbbi tartalmaz ellenállás színek kód táblázatokról, IC-lábkiosztásokon át, logikai kapuk igazságtáblázatát, valamint fajlagos ellenállás adatokat is. A *Periodic Table* nevű alkalmazás, mint az a nevéből kitalálható, a periódusos rendszer minden adatát, és annál még jóval többet is magában foglal. Természetesen a fizika alapösszefüggéseit tartalmazó szoftverek is léteznek. Ilyen alkalmazás a *Pocket Physics* (Pocket Physics, Google Play), amely képletekből és az azokhoz tartozó rövid szöveges ismertetőkből áll.

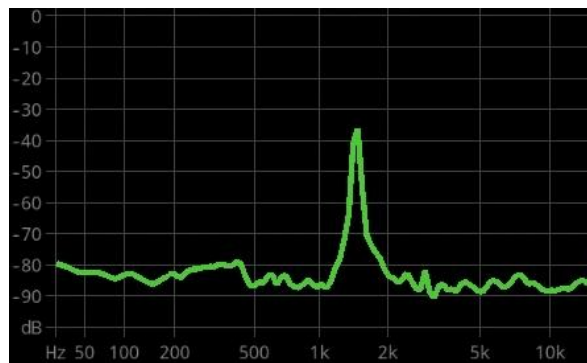
Megfelelő módon felhasználva a telefonok hangszórói is használhatók segédeszközként. Gondoljunk csak a Mikola-csővel végzett mérésekre, ahol a metronóm ütemére jelöljük be a buborék adott időpontban elfoglalt helyét. Metronóm híján azonban használhatjuk a telefonra telepített virtuális eszközt is. A *Mobile Metronome* (Mobile Metronome, Google Play) alkalmazás segítségével beállíthatunk bármilyen ütemet, amelyre elvégezhetjük a kísérletet. A hangszóró felhasználásának másik lehetősége a *Pro Audio Tone Generator* (Pro Audio Tone Generator, Google Play) nevű programmal érhető el. Itt előre beállított frekvenciákon szólaltathatjuk meg a hangszórót, bemutatva a hallható hangok intervallumát.

3.1.3 Az okostelefon mint mérőeszköz

Ahogy a fejezet elején is említettem, az okostelefonokat különféle érzékelőkkel szerelik fel. A továbbiakban az egyes szenzorok által nyújtott lehetőségeket mutatom be, a felhasznált szenzor szerinti osztályozásban.

➤ A mikrofon

Egy telefon legfontosabb érzékelője természetesen a mikrofon, az általa szolgáltatott adatokat pedig különféle analízisnek vethetjük alá. Mérhetjük például hangforrások erősségét különböző távolságokból a *Sound Meter* nevű alkalmazás segítségével (Sound Meter, Google Play). Frekvenciaanalizáló programok (*FrequenSee* vagy *RTA Analyzer*) felhasználásával bemutatathatók, hogy a környezetünkben előforduló zajok mely frekvencián a legintenzívebbek (*FrequenSee*, Google Play) (*RTA Audio Analyzer*, Google Play). Az alábbi ábrán például az látható, ahogyan a háttérzajból kitűnik az emberi füttyülés (3-1. ábra).

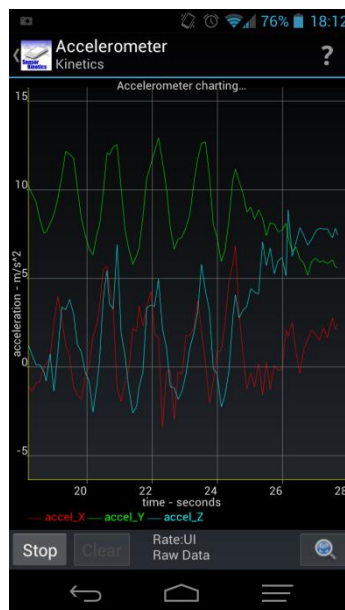


3-1. ábra: A *FrequenSee* alkalmazás és az emberi füttyülés

A *Sonar Distance Meter* nevű alkalmazással a szonár működését szemléltethetjük, a telefonunk hangszórója ilyenkor egy rövid hangjelet ad ki, amelynek a falakról és környező tárgyakra való visszaverődését a mikrofon detektálja (*Sonar Distance Meter*, Google Play). A detektálási időt mérve következtethetünk a tárgyak távolságára. Természetesen ez a módszer nagyon pontatlan, de a mérés elvét szépen bemutatja. Hátránya azonban, hogy csak olyan telefonokon működik jól, amelyeken a mikrofon és a hangszóró azonos irányba néz.

➤ A gyorsulásmérő

Az okostelefonok ma már nélkülözhetetlen szenzora a háromtengelyes gyorsulásmérő, amellyel a telefon döntöttségének mértékét határozhatjuk meg a gravitációs gyorsulás irányához képest. Ezt használja az okostelefon, amikor elforgatja a képernyő nézetet a telefon forgatása esetén. Természetesen ezzel a szenzorral számtalan mérést végezhetünk el, hiszen például a *Sensor Kinetics* alkalmazás képes valós időben grafikonon megjeleníteni, illetve később elmenteni a telefon gyorsulásának pillanatnyi értékeket (3-2. ábra) (*Sensor Kinetics*, Google Play). Ezáltal mérhetjük sportolók, biciklisek, autók mozgása során fellépő gyorsulásokat. A telefonunkat akár kiskocsikra is rögzíthetjük és mérhetjük azok ütközése során fellépő gyorsulásokat, vagy akár rezgő (rugó) vagy forgó (lemezjátszó) rendszerekre is helyezhetjük telefonunkat. Természetesen ilyenkor ajánlatos a telefon biztonságát is szem előtt tartani!



3-2. ábra: A *Sensor Kinetics* alkalmazás a telefon forgatása közben

A telefon döntöttségének mérése lehetőséget ad nekünk arra, hogy egy egyszerű alkalmazást, a *Bubble Level*-t telepítve vízszintezővé/szögmérővé alakítsuk az okostelefonunkat (*Bubble Level*, Google Play). Ennek a segítségével gyorsan meghatározhatjuk akár egy lejtő, vagy éppen egy Mikola-cső dőlésszögét.

A gyorsulásmérő a nehézségi gyorsulás értékének mérésére a szenzor nyugalmi állapotban képes. A telefon jól látható nyugalmi helyzetével ellentmond, hogy a

gyorsulásmérő $a = 10 \frac{m}{s^2}$ körüli értékű gyorsulást mutat. A gyorsulásmérő szenzorok nevükkel ellentétben erő meghatározására képesek, amiből Newton 2. törvényének megfelelően számíthatjuk ki a gyorsulást. A gyorsulásmérő mikro elektromechanikai szenzorok (MEMS) gyakorlatilag egy megfelelő csillapítással ellátott ismert rugalmasságú „rugóra” helyezett „szeizmikus tömeg” pillanatnyi helyzetének méréséből számolnak erőt és gyorsulást. A tömeg helyének mérését kapacitív, piezorezisztív, vagy piezoelektromos módon mérik. Mivel a telefon nyugalmi helyzetében a szeizmikus tömegre hat a G gravitációs erő, ezért a szenzor a $G = mg$ -nek megfelelően méri a g nehézségi gyorsulás értékét. Szabadesés során a telefon (ha a közegellenállástól eltekinthetünk) $a = 0 \frac{m}{s^2}$ gyorsulást mérne. A félreértések elkerülése érdekében ezt mindenképpen érdemes tisztázni a diákokkal az első adandó alkalommal, amikor a telefon gyorsulásmérőjét használjuk mérésre.

Léteznek olyan alkalmazások, mint például a hazai fejlesztésű *PhysApp* (PhysApp, Google Play), amelyek a telefon nyugalmi helyzetében elvégzendő kalibráció során mért kezdeti (offset) értéket levonják a tényleges mérés során a szenzor által szolgáltatott értékből. Ennek az applikációnak a használatával a fenti magyarázat akár ki is hagyható.

➤ A magnetométer

A harmadik szenzor, a háromtengelyes Hall szenzoros magnetométer szintén alaptartozéknak számít a legtöbb mai okostelefon esetén. Ennek az érzékelőnek a segítségével a telefonunk orientációját kaphatjuk meg a Föld mágneses tengelyének irányához képest. Használhatjuk iránytűként a *Compass 360 Pro* alkalmazást telepítve (Compass 360 Pro, Google Play), vagy a gyorsulásmérő adatainak megjelenítéséhez és rögzítéséhez hasonlóan járhatunk el a *Sensor Kinetics* alkalmazással, csak ez esetben a magnetométert kell kiválasztanunk az applikáció menüjében. Így akár egy rezgő rendszer periódusidejét is megmérhetjük egyszerűen azáltal, hogy egy erős mágneset helyezünk a mozgó tárgyra és a telefonunkkal rögzítjük a mérhető mágneses indukció értékeket. A mágneses indukció változása hasonló periodicitást fog mutatni, hiszen a mágneses elmozdulásával változik a telefon helyén mérhető fluxussűrűség is.

Talán a legötletesebb alkalmazás mégis a *Sky Map*, amely a telefon gyorsulás és mágneses érzékelőinek adataiból meghatározza a telefon orientációját és megjeleníti a képernyőn az adott irányban és időben látható csillagos eget, csillagképeket és bolygókat (3-3. ábra) (*Sky Map*, Google Play). Ezen alkalmazás segítségével könnyedén elnavigálhatunk az égbolton, megtalálhatjuk a bolygókat és a csillagképeket. A telefont a padló felé irányítva pedig akár a déli égboltot is szemügyre vehetjük. Ennek az alkalmazásnak a segítségével, sokkal interaktívabbá tehetjük a csillagászati témájú óráinkat.



3-3. ábra: A *Google Sky Map* alkalmazás a kép készítésekor látható égboltról

➤ A digitális kamera

A negyedik szenzor, amellyel foglalkoznunk kell, nem más, mint a már régebbi típusokban is feltűnt digitális kamera. A *Smart Measure* alkalmazás használatakor a kamerát a mérendő tárgy aljára vagy tetejére kell irányítanunk, ekkor a telefon gyorsulásmérője által szolgáltatott adatok alapján képes kis hibával megadni egy tárgy távolságát vagy magasságát (*Smart Measure*, Google Play). Ezen adatok a kamera talajtól mért magasságának (ezt meg kell adnunk) és vízszinteshez képesti döntöttségének ismeretében kiszámíthatók.

A kamera és a *Speed Gun* nevű applikáció segítségével képesek lehetünk egy mozgó tárgy hozzávetőleges sebességének mérésére (3-4. ábra⁸) (*Speed Gun*, Google Play). Ehhez nem kell mást tennünk, mint megadni a mozgó tárgy távolságát, majd a mozgás során, az érintőképernyőn a tárgyat az ujjunkkal követni (ekkor a kamera által látott képet mutatja a kijelző). A kamera látószögének és a mozgást végző test távolságának ismeretében a szoftver megadja a becsült sebességet.



3-4. ábra: A *Speed Gun* alkalmazás.

A módszer természetesen elég pontatlan, de egy kis gyakorlással könnyen megmérhető egy autó, egy biciklis, vagy például egy futó sebessége. A *Real Speed Gun* alkalmazás használata során először a mérendő útszakasz két végére „célzunk” a kamerával (*Real Speed Gun*, Google Play). Ezzel a *Smart Measures* alkalmazásnál ismertetett módon a szoftver meghatározza a mérendő utat. A sebesség méréséhez már csak idő adatra van szükségünk, ehhez a mozgó tárgyra kell irányítanunk a kameránkat és követnünk kell vele a mozgása során.

Habár a *Heart Rate Monitor* alkalmazás nem tartozik közvetlenül a fizika témakörébe, azért az ötletessége miatt mégis érdemes megemlítenünk (*Heart Rate*

⁸ A kép forrása: Google Play – *Speed Gun*

Monitor, Google Play). Ez az applikáció ugyanis a kamerára szorított ujjunkon keresztül a háttérfényből átjutó fényerő méréséből képes meghatározni a pulzusunkat, hiszen az ujjunk „átlátszósága” a pulzusunk következtében folyton változik és ez a periodicitás mérhető a fényerősségen. Az elmúlt években egyre elterjedtebb ún. fitness-órák is hasonló elven tudják mérni használójuk pulzusát.

➤ **Közelítéskapcsoló**

A legtöbb okostelefon tartalmaz továbbá egy gyenge infravörös LED-et, illetve egy hozzá tartozó szenzort is. Ezek általában a telefon képernyője felett helyezkednek el és arra hivatottak, hogy amikor telefonáláskor a fülünkhöz emeljük a készüléket, a fejünkről visszaverődő fényt a szenzor érzékeli, és ekkor kikapcsolja a képernyőt, így az nem fogyaszt áramot a beszélgetés alatt. Ezt a szenzort is felhasználhatjuk a fizikaórán például a *Proximity Sensor Finder* applikáció segítségével, ugyanis ez a szoftver képes mérni, hogy mennyi ideig van egy tárgy a LED-szenzor páros előtt, így akár egy elguruló kiskocsi, vagy egy lengő ingatest áthaladási idejét is megmérhetjük vele (*Proximity Sensor Finder*, Google Play). A kitakaró test méretének ismeretében könnyedén kiszámíthatjuk a test sebességét.

➤ **További szenzorok**

Néhány újabb modell rendelkezik még hőmérséklet mérésére is alkalmas szenzorral, de amennyiben nekünk csak egy egyszerűbb eszköz áll rendelkezésünkre, akkor sem kell feltétlenül lemondanunk a hőmérséklet mérésének lehetőségéről, amennyiben segítségül hívjuk a *Thermometer* nevű alkalmazást (*Thermometer*, Google Play). A biztonság érdekében minden telefon képes mérni ugyanis az akkumulátorának hőmérsékletét, amely éppen megegyezik a telefon hőmérsékletével abban az esetben, amikor éppen csak felébresztjük a telefonunkat hosszabb alvó állapotából. Ezt a szenzort sajnos előzetes kalibrációval is csak nagy pontatlansággal alkalmazhatjuk.

Egyes telefonok további érzékelőkkel is fel lehetnek szerelve, például nyomás, páratartalom vagy fényerősség mérésére alkalmas szenzorokkal, illetve giroszkóppal is. Ezen szenzorok által szolgáltatott adatokat szintén a *Sensor Kinetics* alkalmazással lehetünk képesek megjeleníteni vagy akár le is menteni.

3.1.4 Az alkalmazások bemutatása az osztályteremben

Természetesen egy mobiltelefon piciny képernyője nem igazán alkalmas arra, hogy a telefonon futó alkalmazásokat osztálytermi körülmények között próbáljuk bemutatni. Erre a problémára szerencsére több megoldás is adható. Kisebb csoportokban, például szakköri foglalkozások alkalmával megelégedhetünk azzal is, hogy egyszerűen körbeadjuk a telefont, azonban egy teljes osztálynál már más eszközökhöz kell folyamodnunk.

A készülékünk képernyőjének kivetítése sajnos nem olyan egyszerűen megoldható, mint egy PC esetében. Szerencsére létezik megfelelő alkalmazás, amellyel képesek lehetünk egy PC-n megjeleníteni a telefonunk kijelzőjének valósidejű képét, majd a PC képernyőjét a szokásos úton vetíthetjük ki egy projektor segítségével. Ezt a módszert azonban csak az informatikában járatosabb kollegáknak ajánljuk. Az erre a célra fejlesztett *Droid@Screen* alkalmazás használatának részletes angol nyelvű leírását a szoftver honlapján érhetjük el (*Droid@Screen*, Google Play).

Az előbbinél lényegesen egyszerűbb megoldás, ha a tanulók telefonjait is bevonjuk az óra menetébe. A felhasználható telefonok számát figyelembe véve csoportokat alakíthatunk ki és amennyiben van nyílt hozzáférésű vezeték nélküli internet az iskolában, azon keresztül a tanulóink az adott alkalmazást gyorsan telepíthetik. Internet hozzáférés hiányában előre megkérjük a telefontulajdonosokat, hogy ezt még otthon végezzék el.

A harmadik megoldási lehetőség az, hogy a mért adatokat számítógépre exportáljuk és azokat kivetítve a gépen, vagy a táblánál értékeljük ki. Az adatok exportálásának lehetősége a legtöbb említett szoftver esetén elérhető. Egyéb esetekben pedig egyszerűen képernyőmentéseket készíthetünk a telefonunkról például a *Screenshot* alkalmazás segítségével (*Screenshot*, Google Play). (Így készültek a fejezetben látható képek is.)

3.1.5 Versenyfeladatok okostelefonokkal

Munkám során számos mérési elrendezést fejlesztettem, valamint olyan feladatokat dolgoztam ki, amelyeket a Pannon Egyetem Mérnöki Kara által évente

rendezett Hlavay József Országos Környezettudományi és Műszaki Diákkonferencia Junior Mérnökverseny- és Fizika feladatmegoldó verseny kategóriáiban a vállalkozó diákoknak kellett az okostelefonjaik segítségével megoldaniuk. A verseny mindkét kategóriája egy-egy levelező fordulóval kezdődik, amit után a legjobb versenyzőket behívjuk a döntőre, amely maga a kétnapos Diákkonferencia. A levelező fordulóban nem csak hagyományos fizikafeladatok megoldását, de otthoni eszközökkel elvégezhető mérési kísérletek elvégzését és dokumentációját is kiadjuk feladatul.

➤ **Gyorsulásmérő helyének meghatározása**

A 2015-ös Fizika feladatmegoldó verseny 1. levelező fordulójában az alábbi versenyfeladat került kiírásra:

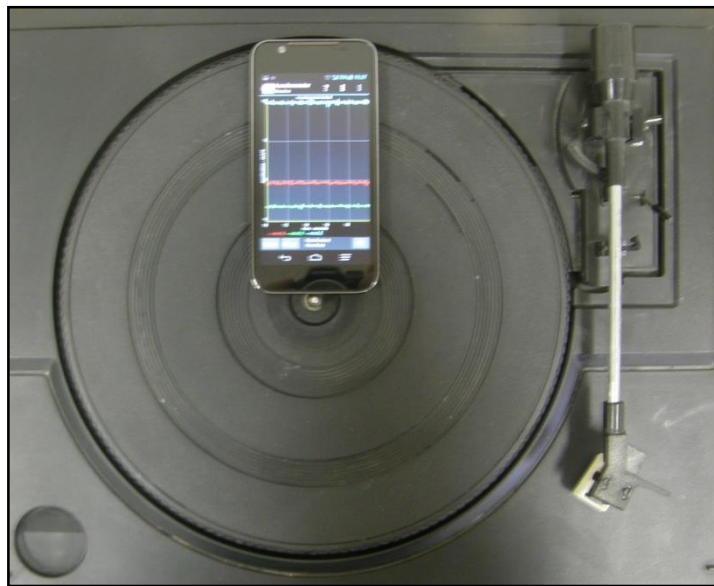
Az okostelefonok ma már nélkülözhetetlen szenzora a háromtengelyes gyorsulásmérő, amellyel a telefon döntöttségének mértékét határozhatjuk meg a gravitációs gyorsulás irányához képest. Ezt használja az okostelefon, amikor elforgatja a képernyő nézetet a telefon forgatása esetén. Természetesen ezzel a szenzorral számtalan mérést végezhetünk el, hiszen például egy megfelelő applikáció (Android OS esetén pl. a Sensor Kinetics alkalmazás) képes valós időben grafikonon megjeleníteni, illetve később elmenteni a telefon gyorsulásának pillanatnyi értékeket.

A gyorsulásmérő szenzor adatit felhasználva határozzátok meg, hogy a méréshez használt telefonon belül pontosan hol helyezkedik el a gyorsulásérzékelő szenzor! Tervezzetek meg egy mérési elrendezést, amellyel elvégezhetitek a kísérletet! A mérésről készítsetek jegyzőkönyvet, melyben a mérés és számolás

minden folyamatát rögzítsétek! A mérési elrendezésről készítsétek fényképet is, amit csatoljatok a jegyzőkönyv mellé!

A Fizika Szemle folyóirat 2014/3-as számában található egy cikk, amely sok segítséget adhat a mérések elvégzéséhez (T. Medvegy, 2014).

A mérés elvégzéséhez az említett, általam publikált cikkben egy otthoni körülmények között is megvalósítható mérési elrendezést is ismertettem, amellyel meghatározható a gyorsulásmérő szenzor telefonon belül elfoglalt helye. Ez a lehetséges megoldás az alábbi volt:

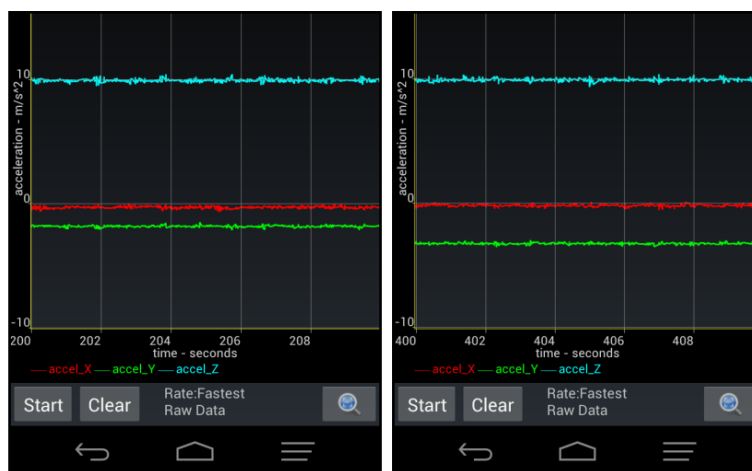


3-5. ábra: Kísérleti elrendezés a gyorsulásmérő elhelyezkedésének meghatározásához

A mérési elrendezés összeállításához szükség lesz egy lemezjátszóra, illetve fel kell telepítenünk a *Sensor Kinetics* alkalmazást a telefonunkra. Elhelyezzük a telefonunkat a 3-5. ábrának megfelelően a lemezjátszóra, majd elindítjuk a mérést. A lemezjátszót bekapcsolva azt tapasztalhatjuk, hogy egy vagy két tengely mentén a körmozgás következtében megváltoznak a mért gyorsulások értékei. A telefont helyezzük el úgy, hogy csak az egyik tengely mentén tapasztaljunk gyorsulás változást a lemezjátszó működtetésekor. Ekkor ez a tengely egy vonalba esik a forgástengelytől a szenzorig húzott egyenessel, tehát a keresett gyorsulásmérő ezen az egyenesen lesz megtalálható.

A mérést egy rövid ideig futni hagyjuk, majd azt megállítva leolvashatjuk a mért adatokat a telefonról (3-6. ábra), vagy exportálhatjuk azokat egy számítógépre. A

3-6. ábrán látható három görbe az egyes tengelyek mentén mért gyorsulásadatokat mutatják. A cián színű görbe a 3-5. ábra síkjára merőleges tengelyen mért értékeket mutatja, itt a gravitációs gyorsulás értékét láthatjuk. A piros görbe a körmozgás során fellépő gyorsulás tangenciális komponensét adja, ez természetesen jelen esetben az egyenletes körmozgás következtében zérus. (Indulásnál, megállásnál és fordulatszám váltásnál természetesen ezen a tengelyen is mérhetünk gyorsulást.) A zöld adatsor pedig a gyorsulás radiális komponensét adja meg, ezt fogjuk felhasználni a későbbiekben a mérésünkhöz.



3-6. ábra: Mért gyorsulásadatok különböző fordulatszámok esetén

A fordulatszámok ismeretében meghatározhatjuk a lemezjátszó két forgatási sebességéhez tartozó szögsebességeit, majd a mért gyorsulások értékeinek behelyettesítésével megkaphatjuk a szenzor forgástengelytől mért távolságát.

n [1/min]	ω [1/s]	a_{cp} [m/s ²]	r [m]
33	3,456	1,75	0,147
45	4,712	3,25	0,146

A keresett szenzor tehát ebben az esetben a forgástengelytől 14,65 cm távolságban volt található.

A legtöbb versenyző a fentebb ismertetett módszert alkalmazta, azonban voltak, akik más eljárásokat dolgoztak ki. Az egyik versenyző, Tomcsányi Gergely, aki a versenyen végül 1. helyezést ért el, fából egy állványrendszert épített a telefonjának, amellyel a telefon több, egymásra merőleges tengely körül is elforgatható volt, valamint a telefon helyzete is változtatható volt a tengelyhez

képeket (3-7. ábra⁹). A telefon helyzetét folyton változtatva mérte a fellépő gyorsulásokat, majd a másik tengellyel is megismételte a mérést.



3-7. ábra: Az egyik versenyző által kidolgozott elrendezés

Az itt ismertetett mérést elvégezhetjük szakköri alkalmakkor, de kivetítve a képernyő képét akár tanórai keretek között is. A 3-5. és 3-6. ábrákat - vagy ahhoz hasonlókat - akár házi feladatként is kiadhatunk diákjainknak, hiszen amennyiben megadjuk például a telefon pontos méretét, úgy a mérés kiértékelés már egy vonalzó segítségével történhet akár a képek alapján is. Erről a módszerről Teiermayer Attila kollegám munkájában olvashatnak bővebben (A. Teiermayer, 2013).

➤ Inga lengésidejének mérése Hall-szenzorral

A 2015-ös Fizika feladatmegoldó verseny 1. levelező fordulójában egy másik, okostelefonnal elvégezendő versenyfeladat is kiírásra került:

A következőkben felhasználandó szenzor, a háromtengelyes Hall szenzoros magnetométer szintén alaptartozéknak számít a legtöbb mai okostelefon esetén. Ennek az érzékelőnek a segítségével a mágneses indukció mértékét vagyunk képesek

⁹ A képeket készítette és a felhasználásukat engedélyezte: Tomcsányi Gergely

mérni, így akár egy rezgő rendszer periódusidejét is megmérhetjük egyszerűen azáltal, hogy egy erős mágnest helyezünk a mozgó tárgyra és a telefonunkkal rögzítjük a mérhető mágneses indukció értékeit. A mágneses indukció változása hasonló periodicitást fog mutatni, hiszen a mágnes elmozdulásával változik a telefon helyén mérhető fluxussűrűség is. (Android OS esetén a Sensor Kinetics alkalmazás továbbra is jól használható a feladat elvégzéséhez.)

Készítsetek egy legalább 90 cm fonálhosszúságú matematikai ingát, amelynek végére rögzítsetek egy mágnest. Az okostelefont helyezzétek el az inga mellett vagy alatt és indítsátok el a mérést. Hozzátok lengésbe az ingát (ügyeljete rá, hogy a lengés ne legyen nagyobb a függőlegeshez képest 5° -nál) és a mágneses indukció változásának periodicitását felhasználva határozzátok meg az inga lengésidejét! Határozzátok meg a gravitációs gyorsulás értékét és vessétek össze az első feladatnál mért¹⁰ adattal! Ismételjétek meg a mérést még legalább két fonálhosszúságnál (pl. 60 és 30 cm-nél)!

A mérésről készítsetek jegyzőkönyvet, melyben a mérés és számolás minden folyamatát rögzítsétek! A mérési elrendezésről készítsetek fényképet is, amit csatoljatok a jegyzőkönyv mellé!

Ügyeljete rá, hogy a mágnes sose kerülhessen túlzottan közel (pár cm) a telefonhoz, mivel ez egy erős mágnes esetén akár a telefon károsodásához is vezethet!

Ennek a mérésnek az elvégzése gyakorlatilag csak abban különbözik a tipikus ingás nehézségi gyorsulás méréstől, hogy a lengésidőt nem egy stopperrel mérjük, hanem egy olyan jelet rögzítünk, amely arányos az inga telefontól való távolságával. Így természetesen a periódusidőt a mért térerősség változások időbeni lefutásából számíthatjuk ki. Ügyeljünk rá, hogy ha nagyobb vezető anyagok vannak az inga környezetében, az azokban indukálódott örvényáramok komoly energia disszipációval járhatnak a lengő rendszerünkben. Ezzel a módszerrel gyakorolhatjuk a méréskiértékelést, valamint a hagyományos stopperes méréshez

¹⁰ A levelező forduló legelső feladata során a versenyzőknek egy ejtő zsinórt kellett készíteniük, majd annak leejtésekor egy hangfelvételt készíteniük, amit az Audacity program segítségével kellett kiértékelniük. A hangfelvétel elemzésével meg kellett határozniuk a gravitációs gyorsulás értékét. A feladat kiírója Teiermayer Attila volt.

képest itt nem okozhat hibát az emberi reakcióidő, vagy a lengésszám pontos számontartásának elvétése.

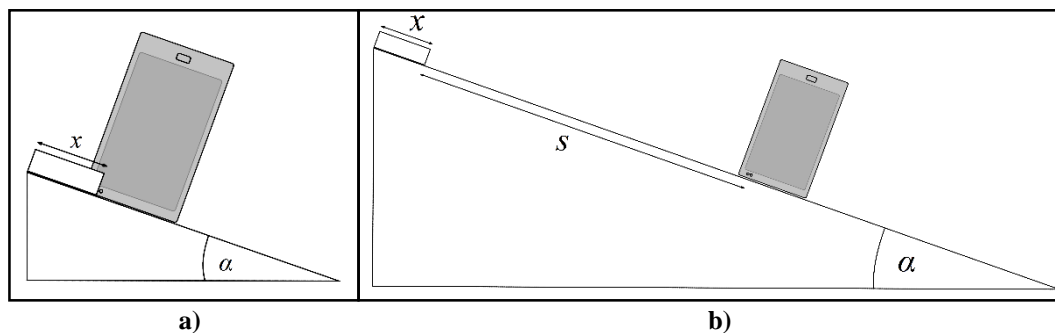
➤ **Csúszási súrlódási együttható mérése közelség érzékelővel**

A 2015-ös Fizika feladatmegoldó verseny 2. levelező fordulójában az alábbi versenyfeladat került kiírásra:

Ma már a legtöbb okostelefon tartalmaz egy gyenge infravörös LED-et, illetve egy hozzá tartozó szenzort. Ezek általában a telefon képernyője felett helyezkednek el és arra hivatottak, hogy amikor telefonálaskor a fülünkhöz emeljük a készüléket, a fejünkről visszaverődő fényt a szenzor érzékeli, és ekkor kikapcsolja a képernyőt, így az nem fogyaszt áramot a beszélgetés alatt. Ezt a szenzort is felhasználhatjuk fizikai méréseinkhez (Android OS esetén például a Proximity Sensor Finder applikáció segítségével), ugyanis ennek a szenzornak a felhasználásával képesek lehetünk mérni, hogy mennyi ideig van egy tárgy a LED-szenzor páros előtt, így akár egy elguruló kiskocsi, vagy egy lejtőn lecsúszó test áthaladási idejét is megmérhetjük vele. A kitakaró test méretének ismeretében könnyedén kiszámíthatjuk a test sebességét.

Tervezzetek mérési elrendezést a fent említett szenzor és egy lejtő felhasználásával csúszási súrlódási együttható mérésére, amelyben legalább három különböző anyagpárosra jellemző értéket mérhettek minél nagyobb pontossággal! A mérést különböző lejtési szögek mellett ismételjétek! Végezzétek el a mérést, és tekintsétek át a lehetséges pontatlanságokat! A mérésről készítsetek jegyzőkönyvet, melyben a mérés és számolás minden folyamatát rögzítsétek! A mérési elrendezésről készítsetek fényképet is, amit csatoljatok a jegyzőkönyv mellé!

A mérés megvalósításához egy a vízszinteshez képest döntött sík felület és pár különböző anyagú próbatest és egy okostelefon szükséges. Mivel a közelség érzékelővel a test áthaladásakor a kitakarás idejét tudjuk mérni, ezért kétféle elrendezésben valósíthatjuk meg a mérést. A telefont a lecsúszó testtől vagy s távolságban helyezzük el (3-8. ábra), vagy éppen előtte (3-8. ábra).



3-8. ábra: Mérési elrendezések csúszási súrlódási együttható meghatározására

Az a) esetben a testnek kezdősebesség nélkül kell megtennie az x utat a mért Δt idő alatt a gyorsulással, ahol:

$$\Delta t = \sqrt{\frac{2x}{a}}$$

$$a = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)$$

a csúszási súrlódási együttható tehát:

$$\mu = \frac{g \sin \alpha - \frac{2x}{\Delta t^2}}{g \cos \alpha}$$

A b) esetben a Δt kitakarási idő mérése akkor kezdődik, amikor a test már megtette a test és szenzor közötti kezdeti s távolságot és akkor fejeződik be, amikor teljesen elhalad a szenzor előtt (tehát $s + x$ távolság megtétele után). Δt tehát:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \sqrt{\frac{2(s+x)}{a}} - \sqrt{\frac{2s}{a}}$$

a gyorsulás pedig továbbra is:

$$a = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)$$

a csúszási súrlódási együttható ekkor:

$$\mu = -\frac{4s + 2x - g\Delta t^2 \sin \alpha - 4\sqrt{s^2 + sx}}{g\Delta t^2 \cos \alpha}$$

Az összes versenyző az a) elrendezéssel próbálkozott. Én a feladat kitűzése előtt mindkét elrendezést kipróbáltam és bár a b) elrendezés valamivel kisebb szórást mutatott, minden esetben $\pm 0,01$ pontossággal egyezett a két elrendezéssel mért súrlódási együttható. A méréskor a telefont használhatjuk a lejtő szögének mérésére is, így ez a mérés valóban jó példa arra, hogy mennyi eszközt helyettesíthet az

okostelefon akár egyetlen mérés során. Egy szakköri alkalom keretei között ez a mérés szinte elhanyagolható előzetes előkészítéssel is könnyen elvégezhető.

➤ **Rugóállandó meghatározása gyorsulásmérés alapján**

A 2015-ös Fizika feladatmegoldó verseny 2. levelező fordulójában egy másik, okostelefonnal elvégezendő versenyfeladat is kiírásra került:

Az okostelefonok ma már nélkülözhetetlen szenzora a háromtengelyes gyorsulásmérő, amellyel a telefon döntöttségének mértékét határozhatjuk meg a gravitációs gyorsulás irányához képest. Ezt használja az okostelefon, amikor elforgatja a képernyő nézetet a telefon forgatása esetén. Természetesen ezzel a szenzorral számtalan mérést végezhetünk el, hiszen például egy megfelelő applikáció (Android OS esetén pl. a Sensor Kinetics alkalmazás) képes valós időben grafikonon megjeleníteni, illetve később elmenteni a telefon gyorsulásának pillanatnyi értékeit.

Tervezzetek mérési elrendezést a fent említett szenzor és egy rugó felhasználásával a rugó direkciós állandójának (rugóállandó) meghatározására! A mérésről készítsetek jegyzőkönyvet, melyben a mérés és számolás minden folyamatát rögzítsétek! A mérési elrendezésről készítsetek fényképet is, amit csatoljatok a jegyzőkönyv mellé!

A rugó a ráakasztott súllyal együtt egy rezgő rendszert alkot. Kis amplitúdójú rezgéseknél esetén a rezgés harmonikus, a rezgésidő pedig ekkor:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m'}{D}}$$

Az m' tömeg a rugóra függesztett súlyok m tömegén kívül tartalmazza a rugó effektív tömegét is. A képletet átrendezve megkapjuk a terhelések és a rezgésidő közti összefüggést:

$$m = \frac{DT^2}{4\pi^2} - m_{eff}$$

Vezessük be a $\tau = \frac{T^2}{4\pi^2}$ változót, így a következő összefüggést kapjuk:

$$m = D\tau - m_{eff}$$

Látható, hogy az m és a τ között lineáris összefüggés van, különböző tömegekhez tartozó m_i , τ_i mérési pontokat diagramon ábrázolva egyenest kapunk, melynek meredeksége a D .

A versenyzők mindegyike a $T = 2\pi\sqrt{m/D}$ képlet felhasználásával oldotta meg a feladatot. Néhányan mindössze egyetlen mérést végeztek, a legtöbb versenyző több mérést végzett azonos súly mellett, azonban egyikük sem végezte el a mérést több különböző terhelő tömeg mellett.

Ennek az elrendezésnek az előnye a hagyományos stopperes méréshez képest, hogy itt nem okozhat hibát az emberi reakcióidő, vagy a lengésszám pontos számontartásának elvétése.

➤ **Áramjárta vezeték helyzetének meghatározása egy „fekete dobozban”
Hall-szenzorral**

A 2016-os Junior Mérnökverseny döntőjében a csapatok egy labormérésben is megmérköztek egymással.

Az előttek lévő asztalon egy lezárt doboz (ne nyissátok fel!), egy milliméterpapír, egy tápegység, egy teljesítmény ellenállás és pár kábel található. A tápegység, az ellenállás és a kábelek sorosan való kapcsolásával alkotott áramkörben 0 és 1 Amper közötti áramerősségeket állíthattok be a feszültség megfelelő megválasztásával.

A tápegységet sohase zárjátok rövidre, minden esetben iktassátok be a kapcsolásba a teljesítmény ellenállást!

A tápegység bekapcsolása előtt konzultáljatok a laborfelügyelővel!

A teremben nyílt wifi hálózat érhető el, ez szabadon használható.

- 1. Első feladatokat az lesz, hogy határozzátok meg azt, hogy azt okostelefonotokon belül hol helyezkedik el a magnetométer! A feladat elvégzéséhez tervezetek mérési elrendezést!*
- 2. Második feladatokat egy ún. „fekete doboz” felderítése lesz a megismert szenzor és szoftver felhasználásával. A kiadott dobozok belsejébe a milliméterpapírral borított oldal belső felületére egy, a kiadott kábelhez hasonló vezeték ragasztottunk ismeretlen alakban. A feladatokat minél*

*pontosabban meghatározni a dobozban található vezeték elhelyezkedését!
Készítsetek jegyzőkönyvet a tapasztalataitokról!*

Az első feladat elvégzéséhez a csapattagok egyikének telefonjára le kellett tölteni egy alkalmazást, amely képes volt valós időben a magnetométer adatainak kijelzésére. A legtöbb csapat Android operációs rendszerű telefont választott, azonban az egyik csapat egy iPhone készüléket használt. A laborban elérhető vezeték nélküli hálózat segítségével percek alatt találtak megfelelő alkalmazásokat mindkét operációs rendszerre. Természetesen minden eshetőségre felkészülve én is előre előkészítettem két tartalék mobiltelefont, arra az esetre, ha valamelyik csapat nem rendelkezne megfelelő készülékkel. Ezekre szerencsére nem volt szükség.



3-9. ábra: A mérési elrendezés verseny közben

A rendelkezésre álló eszközök segítségével egyszerűen képesek voltak a tápegység, az ellenállás és a kábelek soros összekötésével összeállítani egy kapcsolást, amelyben a tápegység változtatható $0 - 5\text{ V}$ -os kimenetének beállításával az $5\ \Omega$ -os teljesítmény ellenálláson $0 - 1\text{ A}$ közötti áram folyhatott (3-9. ábra). Mivel a mérés hosszúnak ígérkezett, ezért a folyamatos áram miatt ügyelni kellett az ellenállás komoly melegedésére. Egy-egy 5 W -os, $5\ \Omega$ -os kerámia teljesítmény ellenállást készítettem elő minden csapatnak, amelyekre nagy felületű hűtőbordákat erősítettem, hogy elősegítsem a hődisszipációt. Az így összeállított egység hosszú időn keresztül maximális terhelés mellett sem

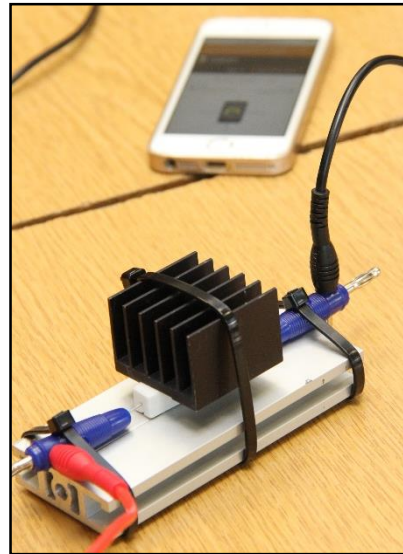
melegedett 30 fok fölé, így nem állt fönn a versenyzők égési sérülésének veszélye (3-10. ábra). A kis alkalmazott feszültség miatt még egy esetleges közvetlen érintés sem okoz áramütést, így a mérési elrendezés ebből a szempontból is teljesen biztonságos volt. A kapcsolásban alkalmazott szilikon vezetékeken szintén 1 A áram folyt. Gyors elméleti számítás segítségével meghatározhatjuk, hogy a vezetéktől 1 cm-re $20 \mu T$ mágneses térerősséget várhatunk ($B =$

$\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$). Ez bőven kimutatható az okostelefonokban tipikusan megtalálható magnetométerek $\sim 1 \mu T$ -

ás felbontásával. Azonban figyelembe kell vennünk, hogy a Föld mágneses tere is hasonló erősségű, így érdemes differenciális mérési eljárást alkalmazni, azaz ki-be kapcsolgatni az áramot, így mindig csak az indukció megváltozását kell figyelni, a háttérrel nem kell törődnünk. A mérés tovább pontosítható, azaz a vezeték jelenléte távolabbról is kimutatható, ha az áramforrás polaritását cserélgetve $\pm 1 A$ áram által létrehozott indukcióváltozást próbálunk kimutatni.

A magnetométer helyének meghatározása az áramjárta vezeték telefon melletti mozgatásával könnyen kivitelezhető. Valós időben meg kell jelenítenünk a telefon képernyőjén a szenzor által mért adatokat, majd az egy egyenes mentén kifeszített vezetéket a vezetékre merőleges irányban a telefon fölött elhúzva meg kell jelölnünk, hogy milyen helyzetben mértük a legnagyobb mágneses indukciót. Erre merőleges mozgatósi iránnyal megismételjük az előző eljárást, és a két vonal metszéspontjában meg is találtuk a magnetométert. A csapatok többsége előbb utóbb rájött a megoldásra, azonban volt akik – tévesen – a telefon geometriai középpontjában, vagy az egyik sarkában feltételezték a szenzor helyzetét, így ők több centiméteres eltolással mérték ki a vezeték helyzetét.

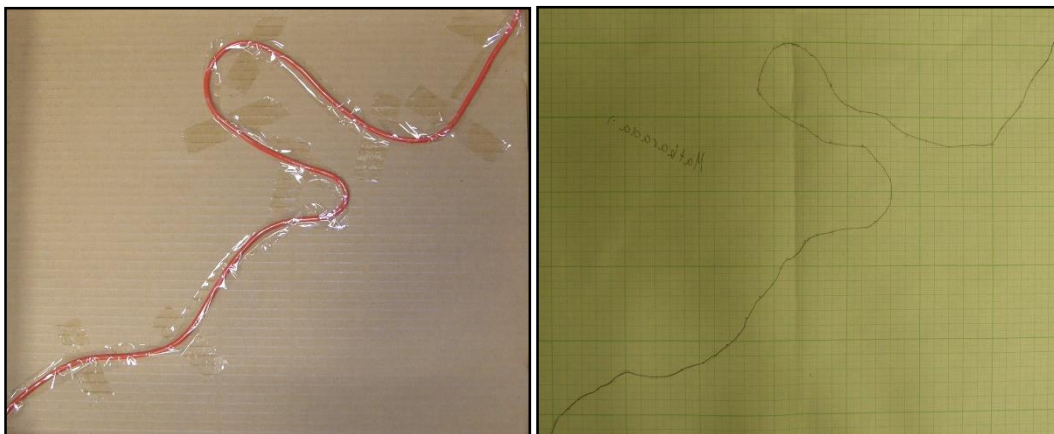
A második feladat megoldása során csupán néhány csapat alkalmazta a fentebb említett differenciális mérési eljárást, és kapcsolgatta ki-be az áramot a körben. Ők sokkal pontosabb eredményre jutottak, mint azok, akik csak a konstans áram mellett



3-10. ábra: Az alkalmazott teljesítmény ellenállás a hűtőbordákkal

próbálták az indukció nagyságából megbecsülni a vezeték helyzetét a dobozon belül, hiszen ha nem ügyeltek arra, hogy a telefon és a doboz mindvégig azonos irányba nézzen, úgy a telefon elforgatásával folyton változtak a mért értékek a három tengelyen, hiszen változtatták a tengelyek irányát a földi mágneses tér irányához képest. Az áramirány megváltoztatásával egyik csapat sem próbálkozott, valószínűleg azért, mert a differenciális méréssel már elegendő pontossággal megtudták határozni a vezeték helyzetét, és már nem volt szükség az időigényesebb, pontosabb mérésre.

A csapatok az eredményüket a doboz küldő felületére ragasztott milliméterpapíron rögzíthették. Az alábbi ábrán látható az egyik „fekete doboz” és a benne lévő vezeték-elrendezés, valamint a hozzá tartozó beadott megoldás (3-11. ábra¹¹).



3-11. ábra: A "fekete doboz" belseje és az egyik csapat megoldása

Az elektromos áram mágneses terének mérését az áramerősség vagy a távolság függvényében könnyedén megvalósíthatjuk egy szakköri alkalom keretei között. Vagy akár méréssel meghatározhatjuk a μ_0 permeabilitást is. A mérés elvégzésekor bemutatható a differenciális mérés elve és az, hogy hogyan segít a zavaró háttér kiküszöbölésében.

¹¹ A jobb oldali ábra a függőleges tengelyre tükrözve került megjelenítésre, az összehasonlíthatóság kedvéért, de persze az eredeti rajz, hiszen a papír a doboz külső oldalára volt ragasztva, a vezeték-elrendezés tükörképét mutatta.

3.1.6 Következtetések

Az okostelefonok szerepeltetése mind a fizikaórákon, mind a versenyeken a résztvevő diákokban kialakít egy olyan szemléletet, hogy a zsebükben lapuló hétköznapi vett használati eszköz nem csak kommunikációra, játékokra és internetezésre alkalmas, hanem komoly mérőeszköz is lehet egyben. Az okostelefonokkal végzett mérések során kihasználhatjuk azt a kötődést, amit a fiatalok ezek iránt az eszközök iránt alakítanak ki napjainkban. Ilyen esetekben üdítő változatosság számukra, hogy az amúgy általában órán tiltott eszközt használhatják a tanóra keretei között. Mindemellett az okostelefonok mérésre való felhasználásának úgymond mellékterméke, hogy közben technikai szempontból is jobban megismerkednek eszközeikkel. Megtanulják a bennük rejlő érzékelők működésének elvét, ezáltal egy lépéssel közelebb kerülhetnek a műszaki tudományokhoz.

Tapasztalatom szerint az okostelefonnal elvégzett kísérletek komolyan felkeltették a középiskolás diákok érdeklődését. Ezek versenyeken való szerepeltetésével pedig sikerült olyan gyakorlati versenypéldákat kidolgoznom, amelyek jellegükben elütnek a szokványosnak számító elméleti versenyfeladatoktól. A felkészítő tanároktól pedig csupa pozitív visszajelzést kaptam a feladatokkal kapcsolatban.

3.2 A Nintendo WiiMote a fizikaoktatásban

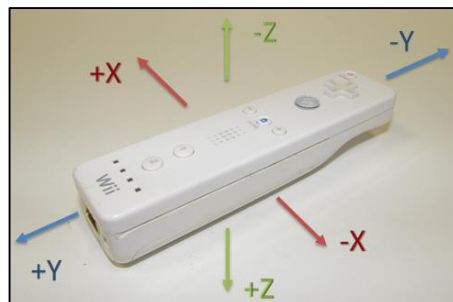
Egyetemi éveim során, 2009-ben ismerkedtem meg és kezdtem el dolgozni a Wii-vel, a Nintendo cég által gyártott videojáték-konzollal, amely akkoriban került piacra hazánkban. Ezen konzol felhasználásának lehetőségeit vizsgáltam az OTDK dolgozatomban is, amellyel 2011-ben első helyezést értem el a XXX. Jubileumi OTDK-án. Az akkori munkám során kifejlesztett méréseket és módszereket azóta is nagy sikerrel alkalmazom mind a középiskolai, mind az egyetemi oktatás során. Tapasztalatom szerint a modern kor elektronikus játékaival, amelyek közel állnak a tanulók érdeklődéséhez, jó szolgálatot tehetnek a fizikaoktatásnak. Mindezen pozitív tapasztalat után a téma további vizsgálatába fogtam és megvizsgáltam milyen módokon lehetne még tovább fejleszteni, bővíteni a kidolgozott méréseket és módszereket.

Munkám során olyan kísérleteket fejlesztettem, amelyek a WiiMote felhasználásával, vagy egy klasszikus eszközt helyettesítve lesznek érdekesebbek, vagy akár teljesen újszerű kísérleti elrendezéseket, méréseket tesznek lehetővé.

3.2.1 A Nintendo Wii és a WiiMote

A Nintendo Wii konzol különleges tulajdonsága, hogy a játék vezérlője egy vezeték nélküli távirányító, melyet WiiMote-nak neveznek. Használatkor ezt az eszközt kézben kell tartani és a játék eseményének megfelelően 3D-s mozgásokat lehet vele végezni. A Nintendo először 2004-ben jelentette be a hírt a konzol készítéséről. Satoru Iwata, a cég vezérigazgatója, 2005 szeptemberében mutatta be a konzol prototípusát a tokiói játékkiállításon. 2006-ban a Wii konzol számos rangos díjat nyert. A terméknev választással kapcsolatban a gyártó által adott számos magyarázat közül az egyik legismertebb:

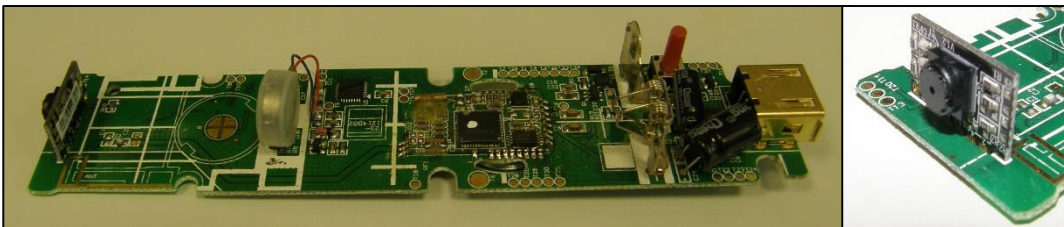
„A Wii úgy hangzik, mintha azt mondanánk 'we' (magyarul: mi), amely azt hangsúlyozza, hogy ez a játék mindenkinek való. A Wii szó könnyen megjegyezhető bárhol a világon és bármely nyelven is ejtik ki azt. Nem téveszthető össze semmivel. Nem szükséges rövidíteni.”



3-12. ábra: A WiiMote koordináta-rendszere

A Wii Remote (röviden WiiMote) a konzol távirányítója, amelyet vezeték nélküli Bluetooth kapcsolattal szereltek fel, amit egy BCM2042-es típusú, aránylag olcsó, billentyűzetekbe és egerekbe fejlesztett chip szolgáltat. Rendelkezik továbbá egy 3 dimenziós, ADXL335 típusú analóg gyorsulásmérővel, amelynek a jelét a WiiMote 50 Hz-el mintavételezve képes továbbítani. A szenzor $\pm 30 \text{ m/s}^2$ -es intervallumban képes mérni. A gyorsulásmérő adatait a WiiMote koordináta-rendszerében továbbítja a számítógépnek (3-12. ábra).

A készülék tartalmaz egy kis rezgéskeltő motort, amelyhez hasonlókat mobiltelefonokban találhatunk, valamint egy hangszórót és egy saját 5KB-os EEPROM memóriaegységet. A fejlesztés szempontjából legfontosabb azonban a WiiMote elejébe épített 128x96-os felbontású monokromatikus kamera, amely előtt egy infraszűrő található (3-13. ábra). A WiiMote kamerája így az infravörös 940 nm-es hullámhosszra a legérzékenyebb. A kamera egy képfeldolgozó chiphez van csatlakoztatva, így a számítógéphez már csak a feldolgozott adatok érkeznek meg. A képfeldolgozó egység egy 8x-os szub-pixel analízis elvégzése után a kamera által szolgáltatott nyers pixelképből 1024x768-as felbontásban adja tovább a 4 legfényesebb infravörös fényforrás pixelben vett látszólagos koordinátáit. A WiiMote ezáltal 45°-os érzékelési félszögben képes követni a négy legfényesebb IR forrást, illetve ezek nagyságát 4 bit-es, fényességét 8 bit-es adatként átadni a számítógépnek. A kamera és a képfeldolgozó egység tehát nem képet, hanem a pontok koordinátáit továbbítják. Ennek következtében a kommunikálható adatcsomagok lényegesen kisebb méretűek lesznek, azaz például egy webkameránál nagyobb mintavételi frekvenciával képes vezeték nélküli adatszolgáltatásra.



3-13. ábra: A WiiMote alkatrészei és a kamera

A WiiMote gyorsulásmérője szabadesés során adja a nulla értéket minden tengelyen, tehát a gravitációs erőt nyugvó állapotban is méri, ekkor a nehézségi gyorsulás irányába eső tengelyen körülbelül 10 m/s^2 -es gyorsulást mutat. Ennek

köszönhetően a szenzor által szolgáltatott adatokból megfelelő algoritmussal számolható, hogy a kontroller milyen helyzetben áll a vízszinteshez képest. Itt újra felhívnam a figyelmet a gyorsulásmérők működésére vonatkozó fontos információkra, amelyeket a 3.1.3-as fejezet taglal.

3.2.2 Infraforrás készítése

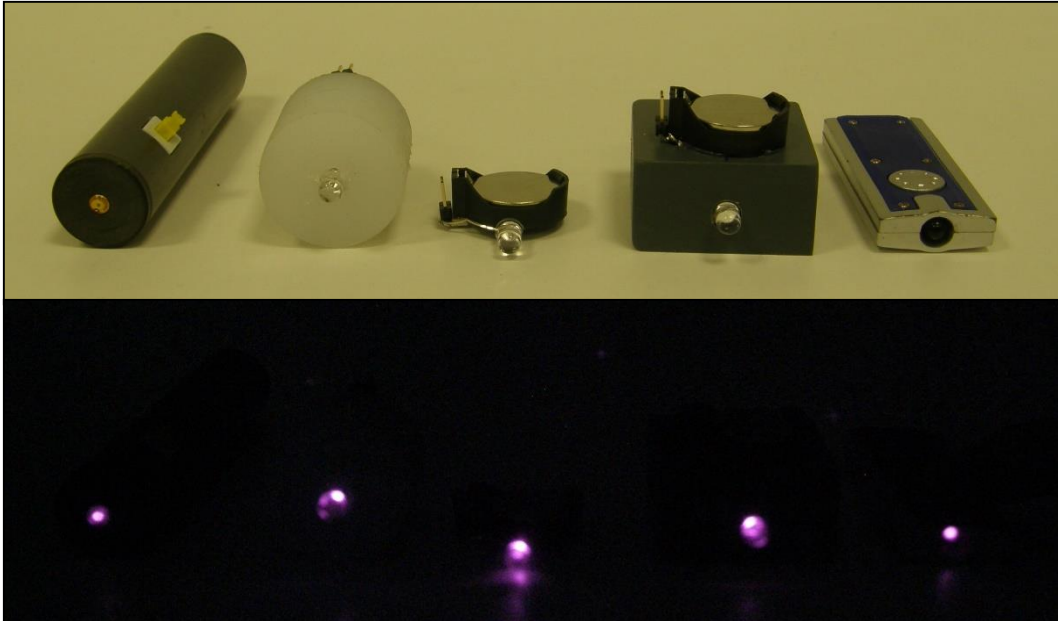
A WiiMote fizikaoktatásban való felhasználása legfőképpen az infraforrások valósídejű követése, és a koordináták beolvasásának magas mintavételi frekvenciája miatt válik fontossá. A vezeték nélküli Bluetooth kapcsolat használata miatt a rendszer nagyméretű mobilitása hatalmas segítséget nyújthat a fizikatanároknak. Az elemről működő WiiMote vezeték használata nélkül képes követni a szintén elemről működtethető IR forrásokot (például infra LED-eket), és a mérési adatokat képes az akár 10 méter távolságra lévő számítógépnek továbbadni.

Az infra kamerával végzett kísérletekhez tehát szükségünk lesz IR-forrásokra, amelyeket a követni kívánt tárgyakra (kiskocsi, inga... stb.) rögzíthetünk, így azok mozgását a WiiMote-al tudjuk majd követni.

Fontos ügyelnünk a fényforrás típusára, mivel folyamatos világítás mellett számos LED fényereje nem elegendő ahhoz, hogy a WiiMote nagy távolságból is észlelje. Az infra kamera 940 nm-es hullámhosszon a legérzékenyebb, tehát ehhez közeli sugárzási maximumú LED-et érdemes vásárolnunk. Fontos tényező az is, hogy a mérések közben gyakran változik a LED helyzete, így lehetőleg a nagy sugárzási félszögű diódát érdemes alkalmazni, hogy a WiiMote minél nagyobb szögben legyen képes észlelni annak fényét.

Kísérleteim során számos különböző méretű és alakú infraforrást készítettem el. A 3-14. ábrán balról jobbra haladva az első IR-forrás még az OTDK munkámhoz készült az SZTE műhelyében. Az eszköz egy 1,5 V-os AAA-s elemmel üzemel, amit egy kétállású kapcsolón keresztül kötünk sorba az infra LED-el. Az elemtartó, a dióda és a kapcsoló egy műanyag tokban került elhelyezésre. A sorban következő három infraforrás mindegyike egy-egy 3V-os CR2032 típusú gombelemmel működik. Elemfoglalatnak régi alaplapokról leforrasztott elemtartókat használtam. A ki-be kapcsolást pedig egyszerű jumperrel oldottam meg, az elemtartó egyik

kivezetésére egy tűskepár egyik szárát, a másik szárra pedig a LED megfelelő lábát forrasztottam. Így a tűskepár két szárát rövidre záró jumper felhelyezésekor az áramkör záródik.



3-14. ábra: A különböző elkészült infraforrások

A 3-14. ábraán balról a második eszközben a LED egy tömör műanyag henger közepén átfúrt lyukban került elhelyezésre. A henger átellenes oldalára pedig az áramforrás került. Az így elkészített céltárgy könnyedég tudott gördülni, így például lejtőn való gördüléshez, illetve hajítási kísérletekben tudtam felhasználni. A harmadik eszköz a legkisebb, itt az elemtartó és a LED közvetlenül került összeforrasztásra, valamint egy kis mágneset ragasztottam az aljára a ferromágneses céltárgyakhoz való könnyebb rögzíthetőségért. A negyedik forrás a másodikhoz hasonlitos, azonban a szögletes műanyag céltárggyal például annak lejtőkön való lecsúszását tudjuk követni. Az ötödik példa talán a legegyszerűbb, LED-es kulcstartót vagy öngyújtót is átalakíthatunk infraforrássá, amennyiben az eredeti LED-et infra tartományban sugárzó diódára cseréljük.

Mivel a 940 nm-es hullámhosszúságú fényt az emberi szem nem látja, ezért az elkészített infraforrások működését például mobiltelefonok kameráján keresztül, vagy egy digitális fényképezőgéppel tudjuk ellenőrizni, mivel ezek az eszközök érzékenyek az infra tartományba eső hullámhosszakra is (3-14. ábrán alul, háttérvilágítás nélkül).

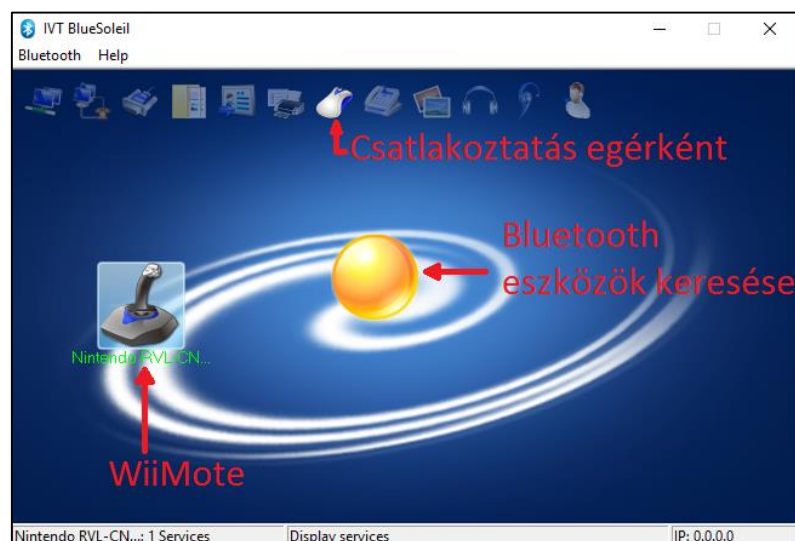
3.2.3 Csatlakoztatás számítógéphez

A számítógéphez való csatlakoztatás problémáját nagyban leegyszerűsíti, hogy a WiiMote-ba épített Bluetooth chipet eredetileg éppen vezeték nélküli egerekhez tervezték. A csatlakozáshoz először is szükség lesz egy olyan számítógépre, amely rendelkezik Bluetooth kapcsolattal, illetve ha



3-15. ábra: Bluetooth adapter

ilyenünk nincs, szereznünk kell egy Bluetooth adaptert (3-15. ábra). Ez az eszköz a legtöbb számítógépes szaküzletben megtalálható, ára pár ezer forint körüli. Akár beépített, akár hordozható egységgel rendelkezünk, a gyártó rendelkezésünkre bocsájt egy szoftvert, amellyel a csatlakoztatást megoldhatjuk. Az általam használt hordozható USB-s Bluetooth adapterhez talán az egyik legelterjedtebb programot, a BlueSoleil-t kaptam, ennek próbaverziója ingyenesen is letölthető a program honlapjáról (BlueSoleil, 2017). Több felhasználó visszajelzése alapján azonban a legtöbb Bluetooth programmal létrehozható működőképes kapcsolat. A WiiMote az 1 és 2 gomb megnyomásával kapcsolható be. A BlueSoleil program telepítése után a középben lévő sárgás gombra kattintva kezdhethetjük meg a keresést a közelben lévő Bluetooth-egységek után. Amint megjelenik a Nintendo RVL-CTR elnevezésű eszköz, arra duplán kattintva párosíthatjuk a számítógépet a WiiMote-al, ezután a felső sorban lévő egér-ikonra kattintva csatlakoztathatjuk egér-ként a vezérlőnköt (3-16. ábra).



3-16. ábra: A WiiMote csatlakoztatása

3.2.4 A WiiMote eddigi alkalmazásai

A nemzetközi és a hazai fizikaoktatás terén mára több alkalmazási lehetőség is felmerült. Frank Rooney és munkatársa a WiiMote beépített gyorsulásérzékelőjét alkalmazta harmonikus rezgőmozgások és körmozgás bemutatására (F. Rooney & W. Somers, 2010). Martyn D. Wheeler már a gyorsulásérzékelőn kívül az infra kamerát is felhasználta kísérletei során, ő légpárnás sínen mozgó lovas mozgását vizsgálta (M. D. Wheeler, 2011). Dr. Jaloveczki József a doktori értekezésében fejtette ki, miként vizsgált kaotikus mozgásokat a WiiMote segítségével. Ő a következő fejezetben bemutatásra kerülő, Wiifiz programot használta adatgyűjtésre (J. Jaloveczki, 2014).

3.2.5 Adatfeldolgozás

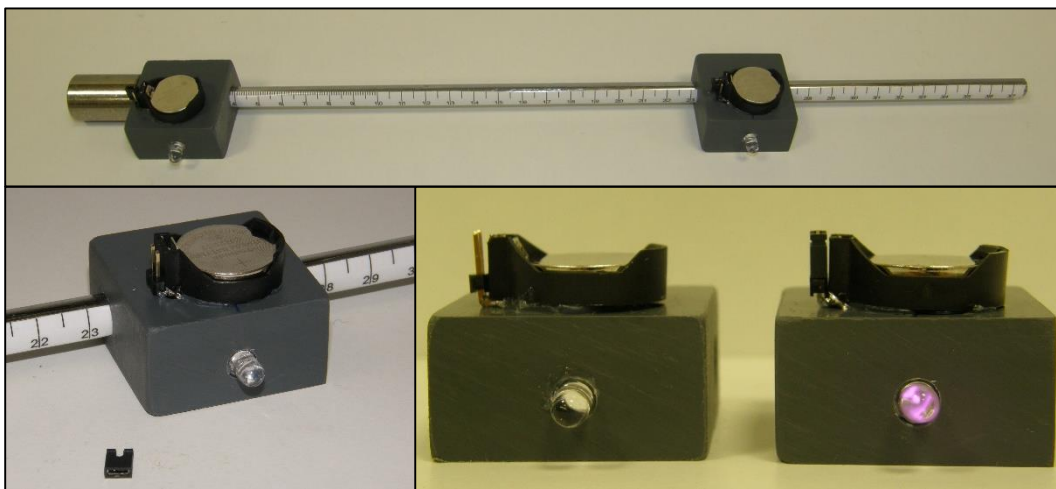
Az interneten található több adatfeldolgozó program közül az egyik legjobbat, a Wiifiz programot egy magyar fizikatanár, az Ericsson-díjas Dr. Piláth Károly készítette, aki kifejezetten a fizikatanításban való felhasználásra fejlesztette a szoftvert. A programot ingyenesen letölthetjük Dr. Piláth Károly honlapjáról (K. Piláth, 2011). A program a WiiMote számítógéphez való csatlakoztatása után indítható, és annak érzékelő egységei által küldött adatokat dolgozza fel. Az említett honlapon számos elvégezhető kísérlet bemutatása szerepel. A program remekül alkalmazható, magam is ezt használtam a TDK munkám során, azonban kíváncsiságból és abból a célból, hogy esetleg magasabb mintavételi frekvenciákat is alkalmazhassak, saját programot készítettem.

Az általam készített LabVIEW program (3. számú melléklet) a WiiMote és a PC közötti kommunikációs protokollokat tartalmazó, Brian Peek által készített. NET könyvtárállományt alkalmazza (B. Peek, 2009). A WiiMote kommunikációjáról a legfontosabb információkat pedig a WiiBrew honlapon értem el (WiiBrew, 2014).

A WiiMeasure névre keresztelt szoftver képes megjeleníteni a WiiMote által látott infraforrás x és y koordinátáit egy-egy grafikonon az idő függvényében, valamint valós időben ábrázolni a forrás helyzetét a WiiMote által „látott” területen belül. A program, ha egy kapcsolón ezt beállítjuk, a mérés végeztével automatikusan menti a mért adatokat egy Excel fájlba. Természetesen az eddigi funkciók a legtöbb hasonló programban is elérhetőek. A WiiMeasure újdonságát a

mintavételi frekvencia szabad megválasztásának lehetősége, valamint a kalibráció automatizálása jelenti.

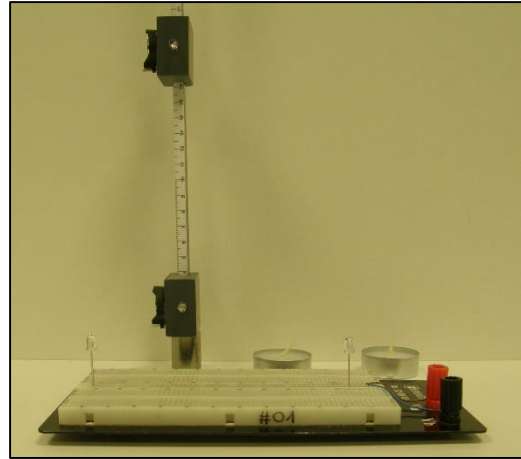
A kalibráció folyamán meg kell határoznunk, hogy a WiiMote által pixelben megadott koordináták milyen valóságos helyzeteknek felelnek meg. Ennek magadására a Wiifiz programban lehetőség van az infraforrás mozgatása során egy-egy helyzetét lementeni, majd a programnak megadni a helyzetek valóságos távolságát. Így a szoftver egy egyszerű osztással kiszámolja, hogy egy pixelnyi távolság hány centiméternek felel meg a valóságban. Az általam készített program ezt a folyamatot rövidíti le, ugyanis a program indításakor a WiiMote által látott két legintenzívebb infraforrás pixelben vett távolságát automatikusan beolvassa és leosztja azzal az előre megadott kalibrációs távolságot. A program indításakor tehát a WiiMote látóterében kell lenni két infraforrásnak, aminek előre ismerjük a valós távolságát. Ehhez egy kalibrációs egyenest készítettem, amely egy centiméterskálával ellátott egyenes fémrúdból, és a rúdon szabadon elmozdítható két infraforrásból áll, amelyek aktuális távolsága a skáláról könnyen leolvasható (3-17. ábra).



3-17. ábra: A kalibrációs egyenes és az infraforrások

A kalibráció során tehát a két LED-et a kívánt távolságokra csúsztatjuk, majd ezt a távolságot megadjuk a programnak. A kalibrációs egyenest a követni kívánt mozgás síkjában a WiiMote látóterébe helyezzük, majd elindítjuk a programot, amely automatikusan elvégzi a kalibrációt, és a mérés végeztével a koordinátákat már méterben menti majd el.

A kalibrációs egyenes készítése természetesen kissé időigényes, azonban a későbbiekben magának a kalibrációs időnek a megrövidülésében megtérül ez a befektetett energia. A kalibráció lefolytatására azonban nincs is feltétlenül szükség egy ilyesfajta egyenes megalkotására, elég ha például egy próbapanelen helyezzük el a két infra LED-et, vagy egyszerűen csak két



3-18. ábra: Variációk a kalibrációs egyenes helyettesítésére

meggyújtott mécsest helyezünk el a kívánt távolságban (3-18. ábra). A lényeg mindössze az, hogy két infraforrást helyezzünk el a WiiMote látóterében ismert távolságra egymástól.

A WiiFiz program használata során elérhető, körülbelül 11 Hz-es mintavételi frekvencia az általam készített szoftverrel 62,5 Hz-re növelhető. Amennyiben ezt összehasonlítjuk egy webkamerával, amelyek közül a drágábbak is csak 30 képkockát rögzítenek másodpercenként, rögtön láthatjuk a WiiMote előnyeit. A gyors lefolyású jelenségek vizsgálatakor igen hasznos lehet a másodpercenkénti képkockák magasabb száma. Én leginkább hajítások, szabadesések és ütközések vizsgálata során éreztem ennek előnyét.

3.2.6 Kísérletek a WiiMote-tal

Ebben a fejezetben azokat a kísérleteket mutatom be, amelyek a WiiMote felhasználásával, vagy egy klasszikus eszközt helyettesítve lesznek érdekesebbek, vagy akár teljesen újszerű kísérleti elrendezéseket, méréseket tesznek lehetővé. Mindegyik kísérlet elvégzéséhez szükségünk lesz a WiiMote-ra, illetve az általa küldött adatok értelmezésére képes számítógépes programra. A kísérletek során a már ismertetett WiiMeasure programot használtam.

Fontos néhány általános irányelvet szem előtt tartani a WiiMote-tal történő mérések esetén:

- Az infrakamera az általunk használt infra LED-en kívül más infra jelekre is érzékeny. Előfordulhat, hogy a mérés mögötti asztalon egy fémtárgyról vagy

éppen egy megfelelő helyzetben lévő fehér lapról visszatükröződő napfény zavarja a mérést. (Megjegyzem, hogy ez akár hasznos is lehet, mivel a visszavert napfényt nagy távolságból is látja a WiiMote, így akár fel is használható saját tervezésű kísérletben). A probléma könnyen kiküszöbölhető, ha a mérést olyan irányban végezzük el, amit nem ér közvetlen napfény, illetőleg árnyékolhatjuk a kívülről jövő zavaró jeleket akár egy vetítívászon segítségével is.

- Egy másik infraforrás is zavarhatja a mérést, ez pedig a nyílt láng. Ahogyan azt már a kalibráció leírásánál is említettem, a WiiMote infraforrásként látja az égő mécsest is. Amennyiben egy kísérletben nyílt lángot alkalmazunk, olyankor ügyelnünk kell rá, hogy a láng fényét kitakarjuk a WiiMote infrakamerája elől (bár hibaforrás, ez a hiba is hasznos lehet, például egy mécsest is használhatunk infraforrásként).
- Eleinte nehézségeket okozhat a WiiMote megfelelő helyzetének megtalálása, de ebben a WiiMote által „látott” kép valós idejű megjelenítése nagyon sokat segít.
- A WiiMote véletlen elmozdítása esetén újra kell kalibrálnunk a mérést. Azonban ha nem pontos mérésre van szükségünk, hanem szemléltetésre szeretnénk használni a kísérletet, a kalibráció teljesen ki is hagyható.

Terjedelmi okokból kifolyólag nem áll módomban az összes lehetséges elrendezés részletes ismertetése, azonban néhány kísérlet leírásán keresztül szeretném bemutatni a WiiMote-ban rejlő lehetőségeket és hogy mennyire sokrétű az elvégezhető kísérletek tárháza. Legfőképpen azokra a kísérletekre koncentrálok majd, amelyek során a WiiMeasure által elérhető, magasabb mintavételi frekvenciákat tudjuk kihasználni.

➤ **Körmozgás vizsgálata**

A kísérlet célja:

Egy körmozgást végző pont pályájának pontos meghatározása, X és Y koordinátáinak mérése, egymáshoz viszonyított változásának szemléltetése; a közmozgás és a harmonikus rezgőmozgás kapcsolatának bemutatása.

Szükséges eszközök:

- WiiMote, számítógép
- IR-forrás
- forgósámoly vagy lemezjátszó
- állványzat



3-19. ábra: Kísérleti összeállítás körmozgás vizsgálatához

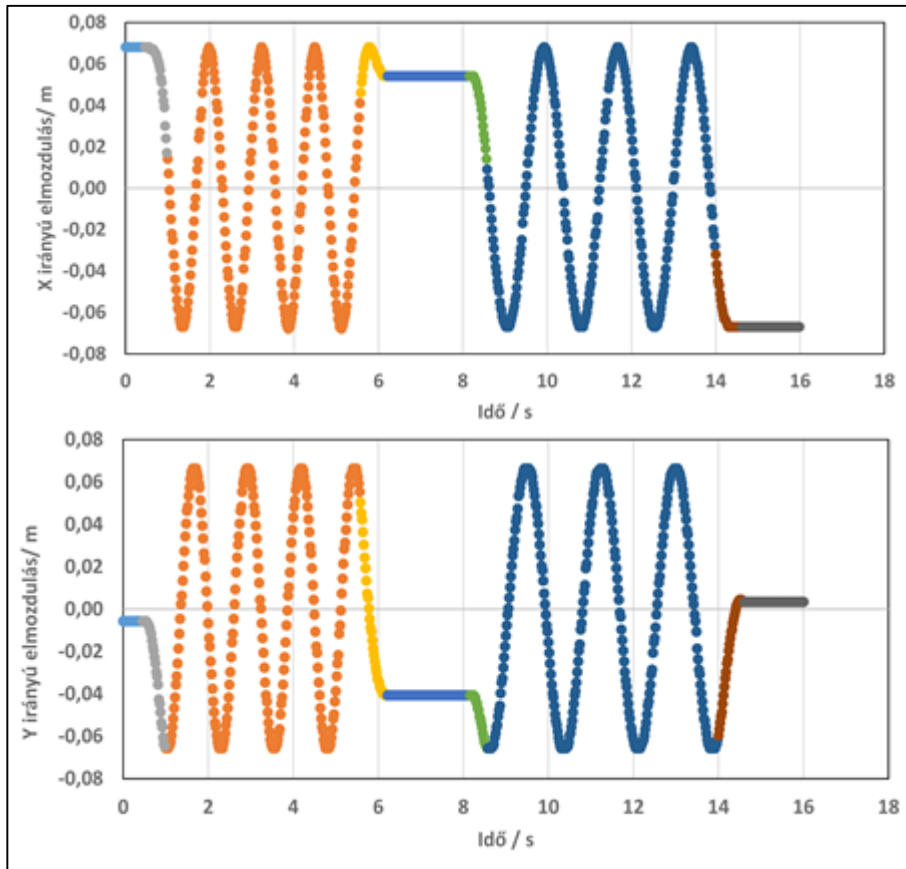
A kísérlet leírása:

Az IR-forrást a forgósámoly/lemezjátszó forgástengelyétől meghatározott távolságban rögzítjük, majd egy állványzat segítségével a WiiMote infrakameráját felülről ráirányítjuk (3-19. ábra). Elhelyezzük a kalibrációs egyenest, majd elindítjuk a mérést.

Megvalósítás/Eredmények:

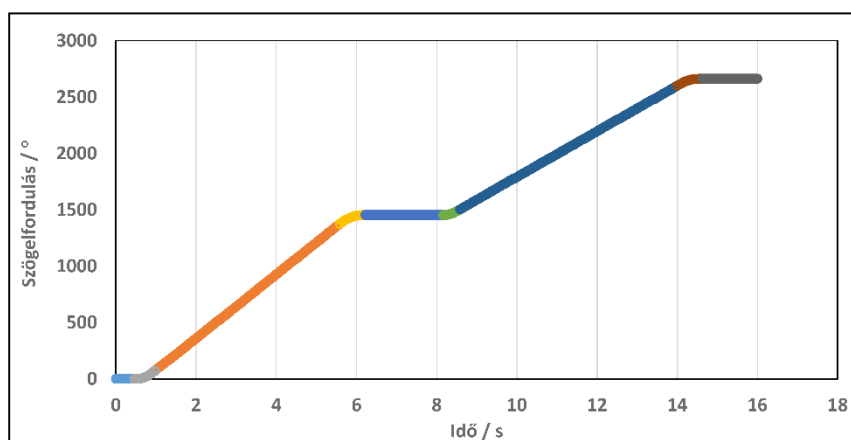
A körpálya r sugara és a mozgás T periódusideje a kalibrált mérési eredményekből adódik. Az ismert összefüggések alapján pedig kiszámolható a kerületi sebesség és a centripetális gyorsulás.

A mért x és y koordinátákat egy grafikonon ábrázolva az idő függvényében jól látható, hogy a körmozgást végző IR-forrás mind X , mind Y irányban harmonikus rezgőmozgást végez, amelyek közötti fáziseltolás jól szemléltethető. Ennek szemléltetésére egy videót is készítettem, amelyet a YouTube video-megosztón is közzétettem (T. Medvegy, 2012).



3-20. ábra: Körmozgást végző pont x és y irányú kitérése

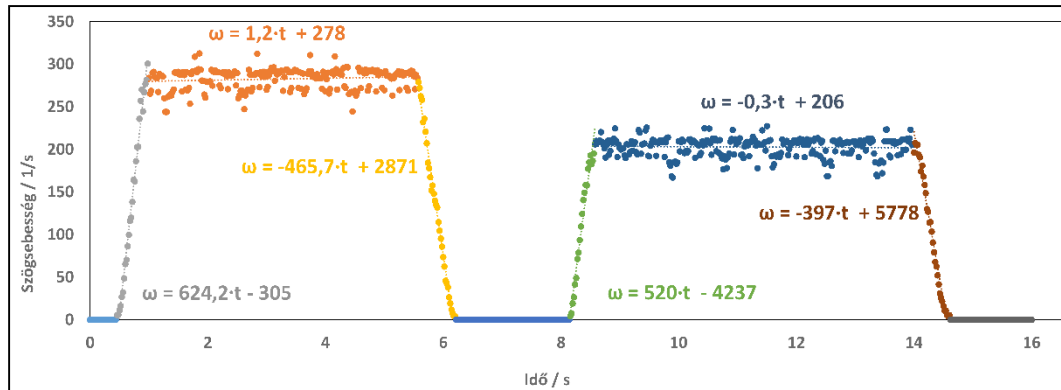
Egy változtatható fordulatszámú lemezjátszó segítségével két különböző szögsebességű forgást is vizsgálhatunk (narancs és sötétkék pontsorok), valamint bemutathatjuk az egyenletesen gyorsuló forgómozgást is, ha ki-be kapcsoljuk a lemezjátszónkat (3-20. ábra). Az Excel ARCTAN2 függvényének segítségével az infrarörös X és Y koordinátáiból meghatározhatjuk az aktuális fázisszöget



3-21. ábra: A szögelfordulás időbeli változásai

(gyakorlatilag derékszögű koordinátarendszerről polár koordinátarendszerbe térünk át), amiből a szögelfordulás számolható (3-21. ábra).

A szögelfordulás időbeli változásából a szögsebességet számíthatjuk ki. A kapott értékeket az idő függvényében ábrázolva egy jól elemezhető grafikonhoz juthatunk (3-21. ábra).



3-22. ábra: Szögsebesség az idő függvényében

- **Világoskék** szakasz: A forgás még nem indult el.
- **Szürke** szakasz: Egyenletesen gyorsuló forgómozgás, az illesztett egyenes meredeksége $\beta_1 = 624,2 \frac{1}{s^2}$
- **Narancssárga** szakasz: A körmozgás közel egyenletes, a szögsebesség $\omega_1 = 278 \frac{1}{s}$ ez a lemezjátszó 45 fordulat/perc beállításához tartozó érték (a mért érték valójában 46,3 fordulat/percnek felel meg).
- **Sárga** szakasz: A lemezjátszó kikapcsolásakor a forgás egyenletesen lassul, szöggyorsulása $\beta_2 = -465,7 \frac{1}{s^2}$
- **Kék** szakasz: A lemezjátszó kikapcsolt állapotban van.
- **Zöld** szakasz: Egyenletesen gyorsuló forgómozgás, az illesztett egyenes meredeksége $\beta_3 = 520 \frac{1}{s^2}$
- **Sötétkék** szakasz: A körmozgás közel egyenletes, a szögsebesség $\omega_2 = 206 \frac{1}{s}$ ez a lemezjátszó 33 fordulat/perc beállításához tartozó érték (a mért érték valójában 34,3 fordulat/percnek felel meg).
- **Barna** szakasz: A lemezjátszó kikapcsolásakor a forgás egyenletesen lassul, szöggyorsulása $\beta_4 = -397 \frac{1}{s^2}$
- **Sötétszürke** szakasz: A lemezjátszó kikapcsolt állapotban van.

➤ Hajítás vizsgálata

A kísérlet célja:

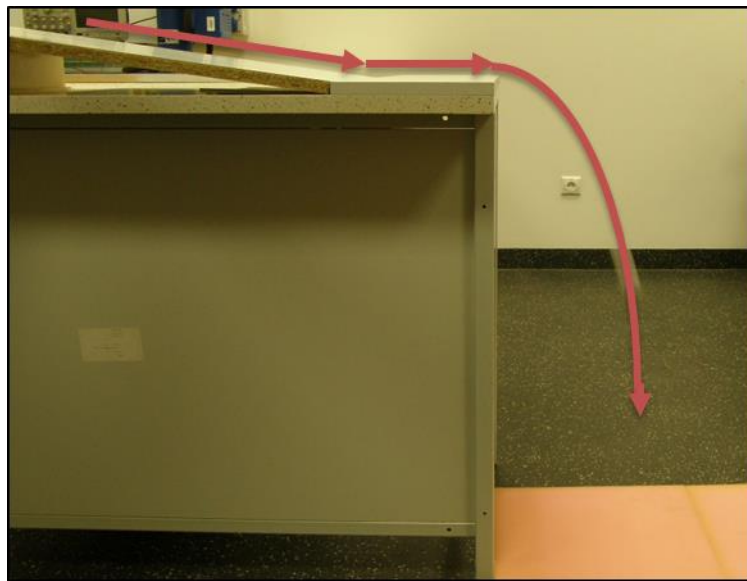
Egy vízszintes irányú kezdősebességgel rendelkező test pályájának vizsgálata szabadesés során. A sebesség X és Y irányban vett komponenseinek mérése. Nehézségi gyorsulás értékének meghatározása.

Szükséges eszközök:

- WiiMote, számítógép
- IR-forrás
- asztal, lejtő

Megvalósítás/Eredmények:

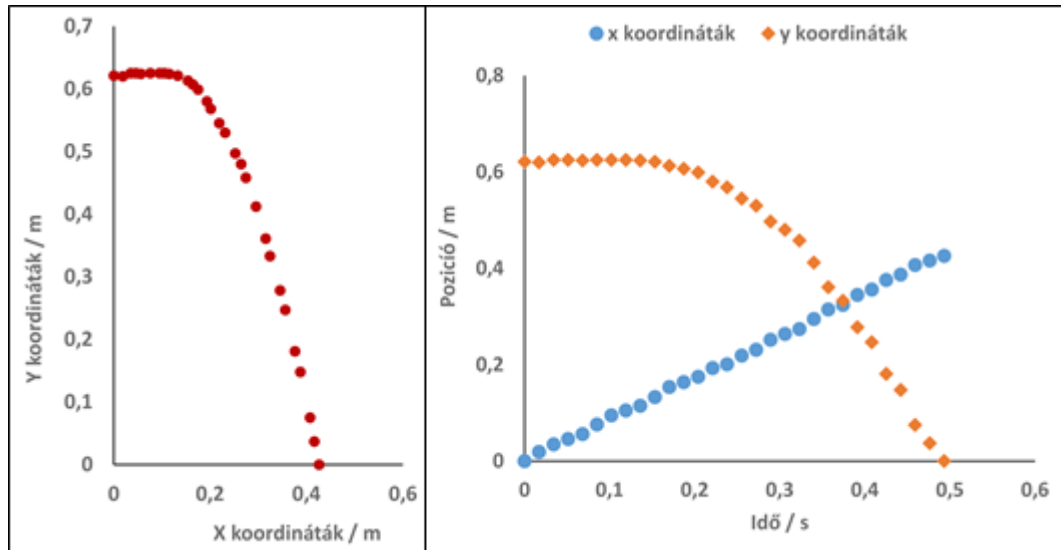
A kísérlet elvégzéséhez egy könnyen gördülő vagy csúszó testet kell vízszintes irányú kezdősebességgel lelőknünk például egy asztról. Az általam elkészített



3-23. ábra: Kísérleti összeállítás vízszintes hajítás vizsgálatához

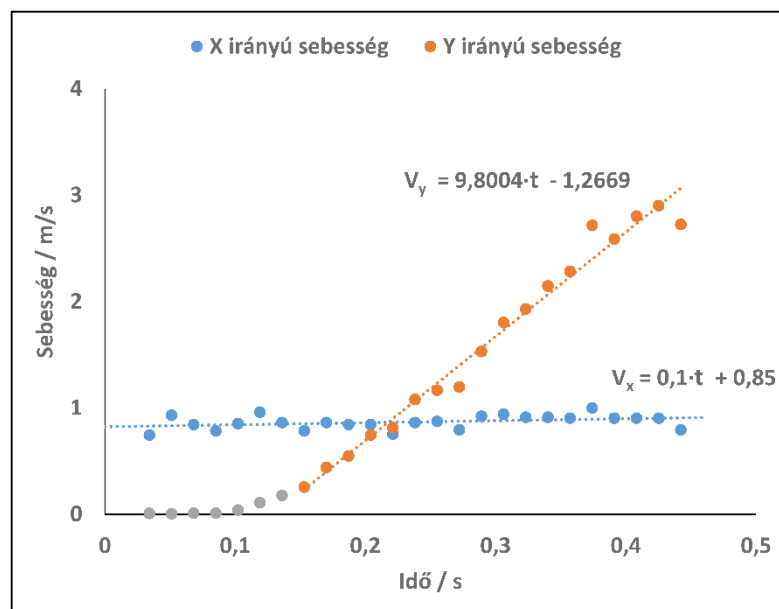
összeállításban egy lejtőn legördülő testet használtam fel erre a célra, de hogy a kezdősebessége mindenképpen csak vízszintes irányú legyen, a lejtő után egy rövid vízszintes szakasról kezdte meg a test a szabadesést (3-23. ábra).

Amennyiben ábrázoljuk a felvett X - Y koordinátákat, úgy megjeleníthetjük a hajítás pályáját, illetve természetesen az X és Y koordináták az idő függvényében is ábrázolhatók, ekkor jól látszik a két mozgáskomponens jellegbeli eltérése (3-24. ábra).



3-24. ábra: A mozgás pályája és az X és Y koordináták az idő függvényében

A mérés a lejtő utáni vízszintes szakasz elérésétől indult, ekkor a test már rendelkezik az X irányú sebességével, amitől azt várjuk, hogy nem változik a hajítás során. Az Y irányba eső sebessége az asztal elhagyása előtt zérus, azt követően másodpercenként a nehézségi gyorsulás értékével változik (3-25. ábra – A grafikonon a V_y sebesség abszolút értéke látható).



3-25. ábra: Sebességkomponensek a vízszintes hajítás során

➤ Rugalmas ütközés lejtőn

A kísérlet célja:

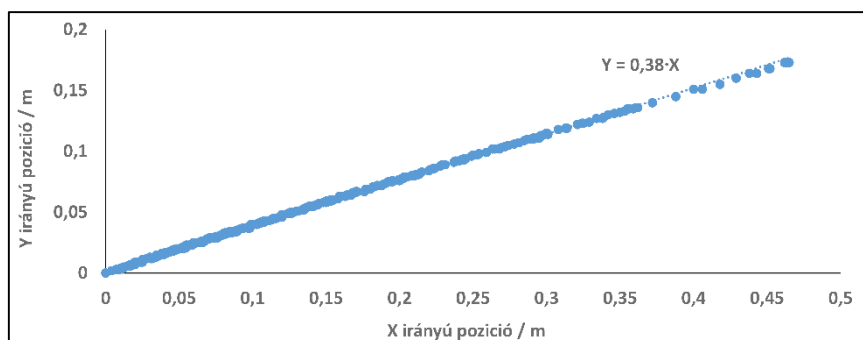
A kísérlet során egy lejtőre helyezett, laprugós ütközővel felszerelt kiskocsi mozgását vizsgáljuk meg. A pálya adataiból meghatározzuk a lejtő dőlésszögét és mérjük a kiskocsi helyzetét. Meghatározzuk a pillanatnyi sebesség és gyorsulásértékeket. A kapott adatok alapján elemezzük a mozgást.

Szükséges eszközök:

- WiiMote, számítógép
- IR-forrás
- kiskocsi laprugós ütközővel, lejtő

Megvalósítás/Eredmények:

A kiskocsi a lejtőn gyorsulva mozog, majd ütközik a lejtő végén lévő fallal. Innen visszapattan, és egyenletesen lassulva gurul felfelé a lejtőn, majd újra lefelé



3-26. ábra: Lejtőn gördülő kiskocsi pályája

indul. A kalibrációt követően az infraforrást a kiskocsira helyezzük, majd azt egy meghatározott magasságból hagyjuk legurulni és ütközni. A mért koordinátákat X-Y síkon ábrázolva a pályát kapjuk vissza, ami természetesen a lejtő síkja is egyben. A kapott pontokra egyenest illesztve, annak meredekségéből meghatározhatjuk a lejtő pontos dőlésszögét (3-26. ábra). Jelen esetben az α dőlésszög 22,3 foknak adódott. Természetesen a lejtő dőlésszögét egyszerű szögmérővel is meghatározhatjuk, ezzel mintegy hitelesíthetve a mérési adatainkat.

Az ábrán jól látható, hogy az X és az Y koordináta az időben egyszerre változik, a két mozgáskomponens azonos jellegű. Ábrázoljuk az X irányú pozíciót az idő függvényében, majd az adatok időbeli változásából határozzuk meg a pillanatnyi sebesség- és gyorsulás értékeket (3-27. ábra)!

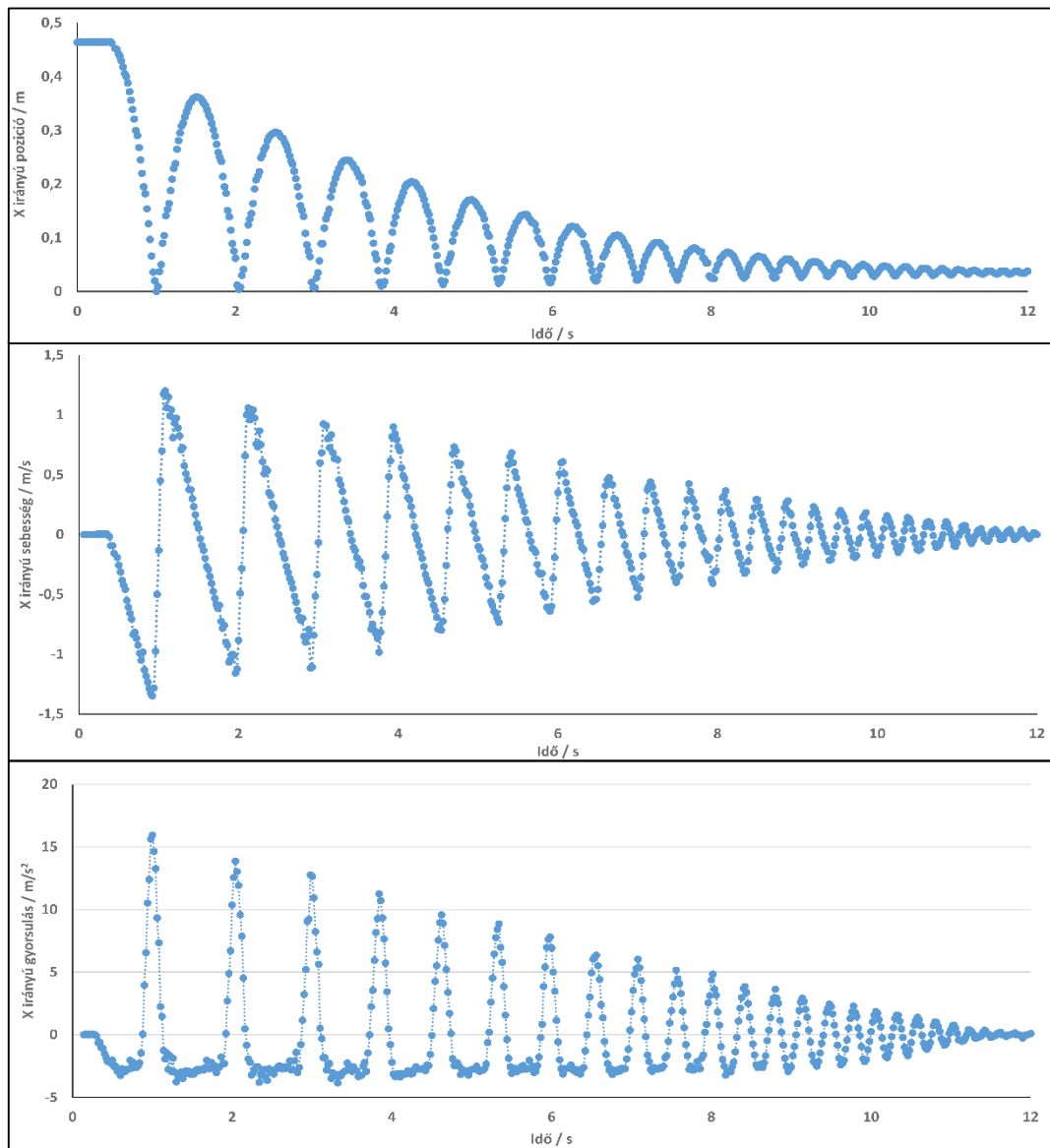
A kapott grafikonok elemzésével sok apró részletre felfigyelhetünk. Az első grafikonon az X irányú helyzetet vizsgálhatjuk az idő függvényében. A kezdetben 0,17 méter magasságból (ez az érték a 3-26. ábra adataiból leolvasható) induló kiskocsi a legelső ütközésnél nyomja össze legjobban a laprugót. Jól látható hogy a maximális összenyomódás értéke ütközésről ütközésre csökken, ahogyan az energia disszipálódik a rendszerből. Amennyiben ismerjük a kiskocsi tömegét, kiszámolhatjuk a laprugó direkciós állandóját és így például ábrázolhatjuk a rendszer mechanikai energiáját az idő függvényében (a pillanatnyi sebességeket és Y koordinátákat szintén ismerjük).

A pillanatnyi sebességek ábrázolásával láthatóvá válik az ütközés és a lejtőn való gördülés mechanizmusa, jól látszik, hogy az ütközések során a sebesség milyen meredeken változik, illetve az is, hogy bár a legfőbb pontban a mozgási irány az ellenkezőjére fordul, a sebességváltozás üteme közben végig állandó (3-27. ábra).

Az X irányú gyorsulás ábrázolásával jól látszik, hogy az ütközések milyen intenzív erőhatások. Az ütközések között - a grafikonról leolvasható - körülbelül $3,5 \text{ m/s}^2$ -es gyorsulásérték jól egyezik a lejtő dőlésszögéből számolható elméleti várt értékkel, ami:

$$a_x = g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha = 3,45 \text{ m/s}^2$$

Ne feledjük, itt nem a lejtővel párhuzamos gyorsuláskomponenst számoljuk, hanem a tényleges vízszintes irányú gyorsulást! Amikor a gyorsulásmaximumok közötti szakaszokon már nem érjük el ezt az értéket, akkor a kiskocsi már nem is lökődik el teljesen a faltól, hanem ekkor már a rugó végig érintkezésben marad a fallal, azaz már csak egy egyszerű csillapodó rezgőmozgást láthatunk. A folyamat szemléltetésére egy videót is készítettem, amelyet a YouTube video-megosztón is közzétettem (T. Medvegy, 2012).



3-27. ábra: Pillanatnyi helyzet, sebesség és gyorsulás értékek

➤ **További kísérletek**

Természetesen az itt ismertetett kísérleteken kívül felvehetjük például egy rugón rezgő testre, vagy egy egyszerű fonál- vagy fizikai ingára rögzített infraforrás mozgását is. Elemezhetjük egy légpárnás sínen rugalmasan vagy éppen rugalmatlanul ütköző lovas mozgását. Az infraforrást egy elektromágneses kioldóra rögzítve vizsgálhatjuk a kezdősebesség nélküli szabadesést, vagy éppen egy ejtőernyőt is rögzíthetünk az IR-forrásunkra, hogy a közegellenállás hatását szemeltethessük (3-28. ábra).



3-28. ábra: További kísérleti elrendezések a WiiMote-al

3.3 Következtetések

Láthatjuk, hogy a WiiMote felhasználásával az összeállítható kísérleti elrendezéseknek csak a fantázia szabhat határt. A WiiMote a dolgozat írásakor az ebay.com-ról szállítási költséggel együtt 2500 forintért beszerezhető. Ehhez az összeghez amennyiben hozzáadjuk pár infra LED és elem árát, még mindig 3000 forint körüli összegről beszélhetünk. Hazánkban a hasonló képességekkel rendelkező oktatási segédeszközök ennek az árnak több tíz, de inkább százszorosáért elérhetőek. Az okostelefonok pedig, amik amúgy is ott lapulnak diákjaink (és valószínűleg egyre több tanárkollegám) zsebében, még kevesebb anyagi ráfordítással alakíthatók át a fizikaszertár értékes darabjaivá.

Mind az okostelefonokkal, mind a WiiMote-tal elvégezhető kísérletek olyan újdonságot hozhatnak a fizikaórák, szakköri foglalkozások és versenyek életébe, amely a ráfordított időt sokszorosán megtérítik. A 3. fejezetben ismertetett módszereket számos tanárkollegám kipróbálta, az ő javaslataikat és ötleteiket folyamatosan építettem be az egyre bővülő kísérleti gyűjtemények tárházába. Visszajelzéseik alapján véleményeik egyhangúan pozitívak voltak a kipróbált alkalmazásokkal kapcsolatban.

4 Hivatkozások

4.1 A disszertáció téziseinek alapját képző publikációk

- T. Medvegy**, 2013. Intelligens folyadékok, elektro- és magnetoreológiai fluidumok a középiskolában. In: Juhász András & Tél Tamás, szerk. *A fizika, matematika és művészet találkozása az oktatásban, kutatásban konferencia-kiadvány*. Budapest, pp. 189-194.
- B. Horváth; **T. Medvegy**; G. Kronome; Z. Gugolya; G. Molnár; I. Szalai, 2015. Controllable Electro- and Magnetorheological Damper for Oscillation Reduction of a Stepper Motor. *International Journal of Mechatronics, Electrical and computer Technology*, 5 (15) Apr., pp. 2068-2076.
- T. Medvegy**, 2014. Investigation of smart fluid properties in secondary schools. In: Leoš Dvořák & Věra Koudelková, szerk. *ICPE-EPEC 2013 Conference Proceedings*. Prága, pp. 1246-1253.
- T. Bagi; B. Horváth; **T. Medvegy**; G. Molnár; G. Kronome; I. Szalai, 2012. Léptetőmotor-forgórész elektro- és magnetoreológiai fluidumokkal csillapított lengéseinek kísérleti vizsgálata. *Magyar Tudomány*, 173. évf.: 2012/7-különszám, pp. 114-122.
- T. Medvegy**, Á. Molnár, G. Molnár & Z. Gugolya, 2017. Analysis of a ferrofluid core differential transformer tilt measurement sensor. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 428C, pp. 189-193.
- T. Medvegy**, 2014. Okostelefonok a fizikaoktatásban. *Fizikai Szemle, LXIV*. 3. kötet, pp. 97-102.
- T. Medvegy**, 2012. Kísérletek a Nintendo Wii-vel. In: T. Péter, szerk. *Természettudomány tanítása korszerűen és vonzóan: Motiváció, tehetséggondozás, tanárképzés. Nemzetközi konferencia magyarul tanító tanárok számára*. Budapest, pp. 268-273.

4.2 A hivatkozott saját készítésű videók elérési útvonalai

- T. Medvegy, 2013. *Curie hőmérséklet*
http://www.youtube.com/watch?v=r_u_ugoWUbw
- T. Medvegy, 2012. *MR fluid viselkedése mágneses tér jelenlétében.*
<http://www.youtube.com/watch?v=prDzOHUsUoQ>
- T. Medvegy, 2012. *Ferrofuidum viselkedése mágneses tér jelenlétében.*
<http://www.youtube.com/watch?v=Yxt2v5nVJWs>
- T. Medvegy, 2012. *ER folyadék viselkedése*
<http://www.youtube.com/watch?v=NOot5wxuxSg>
- T. Medvegy, 2017. *Mágneses gyurmalin.*
<https://www.youtube.com/watch?v=v-0U2g8k-rU>
- T. Medvegy & G. Molnár, 2013. *Kísérletek nagyon hideg tájakon.*
<https://www.youtube.com/watch?v=vHRw-W8Ea8I&t=1s>
- T. Medvegy, 2017. *Cseppfolyós nitrogén viselkedése szobahőmérsékletű környezetben.*
<https://www.youtube.com/watch?v=DAjk4oIn7nY>
- T. Medvegy, 2017. *Hétköznapi anyagok a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletén.*
<https://www.youtube.com/watch?v=WHFdMYU9ous>
- T. Medvegy, 2017. *Fémek és elektronikai alkatrészek viselkedése a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletén.*
<https://www.youtube.com/watch?v=mHZs5WKHyD8>
- T. Medvegy, 2017. *Kísérletek cseppfolyós oxigénnel.*
<https://www.youtube.com/watch?v=lmKBVmpqdyE>
- T. Medvegy, 2017. *Az élő anyagok és a cseppfolyós nitrogén.*
<https://www.youtube.com/watch?v=rNNeCgLbJqE>
- T. Medvegy, 2012. *Circular motion with WiiMote*
<https://www.youtube.com/watch?v=uiviYmw5ktw>
- T. Medvegy, 2012. *Collisions with WiiMote*
<https://www.youtube.com/watch?v=1xgNiQYsRIQ>

4.3 A hivatkozott applikációk elérési útvonalai

Bubble Level, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.gamma.bubblelevel>

Compass 360 Pro, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.pro.app.compass>

Droid@Screen, Google Play. <http://droid-at-screen.org/installation.html>

ElectroDroid, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].

<https://play.google.com/store/apps/details?id=it.android.demi.elettronica>

FrequenSee, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.DanielBach.FrequenSee>

Google Play, 2017. *Google Play Áruház*. <https://play.google.com/store/apps>

Heart Rate Monitor, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].

<https://play.google.com/store/apps/details?id=si.modula.android.instanthearttrate>

Meter, S. D., Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.xyz.sonar>

Mobile Metronome, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].

<https://play.google.com/store/apps/details?id=gabriel.metronome>

PeriodicTable, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.socratica.mobile.chemistry>

PhysApp, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.physapp2>

Pocket Physics, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].

<https://play.google.com/store/apps/details?id=Gecko.Droid.PhysicsHelper>

Pro Audio Tone Generator, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.dutchmatic.patone>

Proximity Sensor Finder, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.tigermonster.proxfinder>

Real Speed Gun, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.emil.myapp.speedgun>

RealCalc, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].

- <https://play.google.com/store/apps/details?id=uk.co.nickfines.RealCalc>
RTA Audio Analyzer, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].
- <https://play.google.com/store/apps/details?id=radonsoft.net.rta>
Screenshot, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].
- <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.enlightment.screenshot>
Sensor Kinetics, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].
- <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.innoventions.sensors>
Sky Map, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].
- <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.stardroid>
Smart Measure, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].
- <https://play.google.com/store/apps/details?id=kr.sira.measure>
Sonar Distance Meter, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].
- <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.xyz.sonar>
Sound Meter, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].
- <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.gamebasic.decibel>
Speed Gun, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].
- <https://play.google.com/store/apps/details?id=kr.sira.speed>
Thermometer, Google Play. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].
- <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.bti.tempMeter>
WiiBrew, 2014. *WiiBrew*. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].
- <http://wiibrew.org/wiki/Wiimote>

4.4 Irodalomjegyzék

- P. Tasnádi & A. Juhász, 1981. A láncmolekulák világa. *A Természet Világa*, 112. kötet, pp. 304-306.
- A. Hajdú, 2010. *Mágneses folyadékok előállítása és stabilizálása fiziológiai körülmények között orvos-biológiai felhasználás céljából- Doktori Értekezés*. Szeged: SZTE TTIK.
- A. Juhász & P. Tasnádi, 1983. A kontinuumok mechanikája 9., Érdekes mechanikai tulajdonságú műanyagok. *Fizikai Szemle*, 33. kötet, pp. 253-255.
- A. Juhász & P. Tasnádi, 1992. *Érdekes anyagok, anyagi érdekességek*. Budapest: Akadémiai Kiadó.
- A. Juhász, P. Tasnádi & L. Fábry, 1984. Impact studies on the mechanical properties of polyborosiloxane. *Physics Education*, 19. kötet, pp. 302-304.
- A. Teiermayer, 2013. Kísérletek, fényképek és videofelvételek alkalmazása a fizikaoktatásban. In: *A fizika, matematika és művészet találkozása az oktatásban, kutatásban konferencia-kiadvány*. Budapest: ismeretlen szerző, pp. 285-290.
- A.G. Olabi & A. Grunwald, 2007. Design and application of magneto-rheological fluid. *Materials & Design*, 28. kötet, pp. 2658-2664.
- Anon., 2011. Physics experiments with Nintendo Wii controllers. *Physics Education*, 46/1. kötet, pp. 57-63.
- B. Andò, A. Ascia, S. Baglio & A. Beninato, 2009. The “One drop” ferrofluidic pump with analog control. *Sensors and Actuators A Physical*, 156. kötet, pp. 251-256.
- B. Andó, S. Baglio & A. Beninato, 2012. A ferrofluid inclinometer with a time domain readout strategy. In: *EUROSENSOR 2012 26th European Conference on Solid-State Transducers*. Kraków, Poland, pp. 586-589.
- B. Horváth & I. Szalai, 2012. Elektorreológiai folyadékok szerkezete: a láncképződés időbeli változásának vizsgálata dielektromos mérési módszerekkel. *Magyar Tudomány*, 2012/7-különszám, pp. 123-131.
- B. Peek, 2009. *WiimoteLib*. [Hozzáférés dátuma: 2017.03].
<http://brianpeek.com/page/wiimotelib>

- BlueSoleil, 2017. [Hozzáférés dátuma: 2017.03].
<http://www.bluesoleil.com/>
- CERN, 2015. *How to make your own cloud chamber*. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].
<https://home.cern/students-educators/updates/2015/01/how-make-your-own-cloud-chamber>
- F. Rooney & W. Somers, 2010. Using the WiiMote in Introductory Physics Experiments. *Journal os Student Scholarship*, XII. kötet, pp. 1-8.
- Gartner, 2017. [Hozzáférés dátuma: 2017.02].
<http://www.gartner.com/>
- Google Play, 2017. *Google Play Áruház*. [Hozzáférés dátuma: 2017.04].
<https://play.google.com/store/apps>
- Gy. Hrehuss & B. Molnár, 1982. Egyszerű szerkezetű diffúziós ködkamra oktatási célokra. *Fizikai Szemle* 32. kötet, pp. 299-301.
- Gy. Radnai, 1983. Kontinuumok mechanikája 8 - Reológiai érdekességek. *Fizikai Szemle*, 33. évf. 7. sz. kötet, pp. 260-270.
- H. Hartshorne, C.J. Backhouse & W.E. Lee, 2004. Ferrofluid-based microchip pump and valve. *Sensors and Actuators A Physical*, 99. kötet, p. 592–600.
- H. Linke, és mtsai., 2006. Self-Propelled Leidenfrost Droplets. *Physical Review Letters*, p. 154502.
- I.H. Shames & F.A. Cozzarelli, 1992. Elastic and Inelastic Stress Analysis. In: *A Course in Fuzzy Systems and Control*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, pp. 120-122.
- J. A. Sans, és mtsai., 2013. Oscillations studied with the smartphone ambient light. *European Journal of Physics*, 34. kötet, p. 1349–1354.
- J. C. Castro-Palacio, L. Velázquez-Abad, F. Giménez & J. A. Monsoriu, 2013. A quantitative analysis of coupled oscillations using mobile accelerometer sensors. *European Journal of Physics*, 34. kötet, pp. 737-744.
- J. de Vincente, D.J. Klingenberg & R. Hidalgo-Alvarez, 2011. Magnetorheological fluids: a review. *Soft Matter*, 7. kötet, p. 3701–3709..
- J. Jaloveczki, 2014. *Nemlineáris jelenségek vizsgálata diákköri-szakköri*. ELTE TTK: Doktori értekezés.

- J. Kuhn & P. Vogt, 2013. Smartphones as Experimental Tools: Different Methods to Determine the Gravitational. *European Journal of Physics Education*, 4. kötet, pp. 16-27.
- J. Wiley, 1986. Introduction to Solid State Physics. In: New York:, p. 185.
- K. Papp & K. Józsa, 2000. Legkevésbé a fizikát szeretik a diákok?. *Fizikai Szemle*, 50. kötet, pp. 61-67.
- K. Piláth, 2011. *WiiMote kontrollor egy fizikaórán*. [Hozzáférés dátuma: 2017.05].
<https://pilath.wordpress.com/wiimote-kontrollor-egy-fizikaoran/>
- K. Piláth, 2017. *Mérések okostelefonnal - A súrlódási együttható mérése*. [Hozzáférés dátuma: 2017.05].
<https://pilath.wordpress.com/merjunk-okostelefonnal-1/>
- K. Piláth, 2017. *Mérések okostelefonnal - Áramjárta vezető mágneses tere*. [Hozzáférés dátuma: 2017.05.].
<https://pilath.wordpress.com/merjunk-okostelefonnal-2/>
- K. Raj, B. Moskowitz & R. Casciari, 1995. Advances in ferrofluid technology. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 149. kötet, pp. 174-180.
- K. Raj & R. Moskowitz, 1990. Commercial applications of ferrofluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 85. kötet, pp. 233-245.
- K. Raj & R.J. Boulton, 1987. Ferrofluids - Properties and Applications. *Materials & Design*, Vol 8. No. 4. July/August kötet, pp. 233-236.
- L. Kasper, P. Vogt & C. Stromeyer, 2015. Stationary waves in tubes and the speed of sound. *The Physics Teacher* ; 53. kötet, pp. 523-524.
- M. D. Wheeler, 2011. Physics experiments with Nintendo Wii controllers. *Physics Education*, 46/1. kötet, pp. 57-63.
- M. Félix, A. Islas, A. Lizárraga & S. Norzagaray, 2010. A Ferrofluid Core LVDT Displacement Sensor. In: *IECON 2010 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Glendale, AZ, USA: ismeretlen szerző, pp. 1769-1772.
- M. Hirth, J. Kuhn & A. Müller, 2015. Measurement of sound velocity made easy using harmonic resonant frequencies with everyday mobile technology. *The Physics Teacher*, 53. kötet, pp. 120-121.

- M. Monteiro, C. Cabeza & A. C. Marti, 2015. Acceleration measurements using smartphone sensors: Dealing with the equivalence principle. 37. kötet, pp. 1303-1-6.
- M. Montiero, és mtsai., 2014. Angular velocity and centripetal acceleration. *The Physics Teacher*, 52. kötet, pp. 312-313.
- M. Zrínyi, 1999. Intelligens anyagok. *Magyar Tudomány*, 6. kötet, pp. 682-691.
- O. Baltag & D. Constandache, 1997. Sensor with Ferrofluid for Magnetic Measurements. *Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 46/2 kötet, pp. 629-631.
- O. Baltag, D. Constandache & A. Salceanu, 2000. Tilt measurement sensor. *Sensors and Actuators A Physical*, 81. kötet, pp. 336-339.
- P. Jenei, 2010. *Szakedolgozat. Budapest.: ELTE TTK.*
- P. Klein, és mtsai., 2014. Classical Experiments revisited: Smartphone and Tablet PC as Experimental Tools in Acoustics and Optics. *Physics Education*, 49/4. kötet, pp. 412-420.
- Q. A. Pankhurst, . K. T. Thanh, S. K. Jones & J. Dobson, 2009. Progress in applications of magnetic nanoparticles in biomedicine. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42. kötet, p. 220301.
- R. Nava, és mtsai., 1997. Response time and viscosity of electrorheological fluids. *Smart Materials and Structures*, 6. kötet, p. 67–75..
- R. Olaru & C. Cotae, 1997. Tilt sensor with magnetic liquid. *Sensors and Actuators A Physical*, 59. kötet, pp. 133-135.
- R. Olaru & D.D. Dragoi., 2005. Inductive tilt sensor with magnets and magnetic fluid. *Sensors and Actuators A Physical*, 120. kötet, pp. 424-428.
- R. Pe´rez-Castillejos, és mtsai., 2000. The use of ferrofluids in micromechanics. *Sensors and Actuators A Physical*, 84. kötet, pp. 176-180.
- R.E. Rosensweig, 1985. *Ferrohydrodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- R.L. Bailey, 1983. Lesser known applications of ferrofluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 39. kötet, pp. 178-182.
- S. Odenbach, 2003. Ferrofluids - magnetically controlled suspensions. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, pp. 171-178..

- S. Odenbach, 2009. *Colloidal magnetic fluids - Basics, development and application of ferrofluids*. Lecture notes in physics 763 szerk. Berlin: Springer.
- S. Odenbach & S. Thurm, 2002. Magnetoviscous effects in ferrofluids. In: S. Odenbach, szerk. *Ferrofluids - Magnetically Controllable Fluids and Their Applications*.:Springer Berlin Heidelberg, pp. 185-201.
- S.S. Papell, 1964. *Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles..* hely nélk. Szabadalom száma: US Pat. 3 215 572.
- T. Beke, 2015. Kerékpár mozgásjellemzőinek meghatározása iskolai projektfeladatban. *Fizikai Szemle*, 2015/10. kötet, pp. 344-348.
- T. Stonawski, 2015. *A digitális média alkalmazása a tanulói kreativitás, problémamegoldás és önálló kísérletezés fejlesztésére általános és középiskolában*. ELTE TTK: Doktori értekezés
- W. Greiner, 1991. *Klassische Elektrodynamik*. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch.
- WiiBrew, 2014. *WiiBrew*. [Hozzáférés dátuma: 2017.03].
<http://wiibrew.org/wiki/Wiimote>
- Y. Qingxin, F. Yanqing, S. Qiao & L. Xuehui, 2010. A New Method of Showing Magnetic Field Based on Ferrofluid. *Physics Procedia*, 9. kötet, pp. 210-215.
- Z. Dongchen, D. Ziyun, Z. Yun & C. Xianfeng, 2009. Temperature sensor using ferrofluid thin film. *Microfluid Nanofuid*, 7. kötet, pp. 141-144.

Mellékletek

1. számú melléklet

Ismeretterjesztő előadásaim listája:

Dátum	Elért célközönség	Téma	Intézmény, város, program
2010.11.18	62	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Szegedi Ipari Szolgáltató és Szakközép Iskola, Szeged
2011.09.20	32	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Lovassy László Gimnázium, Veszprém
2011.09.23	145	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Kutatók Éjszakája 2011, Veszprém
2012.03.23	40	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	PE Hlavay Diákkonferencia 2012, Veszprém
2013.02.07	26	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Thuri György Gimnázium, Várpalota
2013.03.07	26	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Medgyaszai István SZIGK, Veszprém
2013.03.21.	28	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Egry József Középiskola, Zánka
2013.04.05	40	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	PE Hlavay Diákkonferencia 2013, Veszprém
2013.05.12	82	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Gizella napok, Veszprém
2013.06.07	73	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Bánki Donát Szakképző Iskola, Ajka
2013.07.05	32	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	PE Nyári egyetem középiskolásoknak, Tihany
2013.11.12	197	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Lovassy László Gimnázium, Veszprém
2013.11.21	48	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Ipari Szakgimnázium, Veszprém
2013.11.29	50	Intelligens folyadékok	Gödöllői Református Liceum Gimnázium, Gödöllő
2014.01.25	37	Intelligens folyadékok	PE Nyári egyetem középiskolásoknak, Tihany
2014.01.25	37	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	PE Nyári egyetem középiskolásoknak, Tihany
2014.01.30	39	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Közösségi Ház, Úrkút
2014.03.21	50	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	PE Hlavay Diákkonferencia 2014, Veszprém
2014.04.16	15	Intelligens folyadékok	Békéscsabai Keresztyén Ifjúsági Egyesület, Békéscsaba
2014.04.16	107	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Békéscsabai Vásárhelyi Pál Szakközépiskola, Békéscsaba
2014.04.16	15	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Békéscsabai Keresztyén Ifjúsági Egyesület, Békéscsaba

2014.04.29	22	Intelligens folyadékok	Táncsics Mihály Szakközépiskola, Veszprém
2014.06.11	138	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Szilágyi Keresztény Iskola, Veszprém
2014.07.04	40	Intelligens folyadékok	PE Nyári egyetem középiskolásoknak, Tihany
2014.07.04	40	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	PE Nyári egyetem középiskolásoknak, Tihany
2014.07.19	65	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Kerekerdő Tábor, Bakonyszentlászló-Bakonyszentkirály
2014.07.21.	11	Intelligens folyadékok	Csongrád Megyei Fizikatábor 2014, Mártély
2014.10.11	19	Intelligens folyadékok	”Színpadon a Tudomány”, MTA ATOMKI, Debrecenben
2014.11.20.	82	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Környezetmérnök Szakest, Veszprém
2015.04.01	29	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Bródy Imre Gimnázium, Ajka
2015.04.15	171	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Béke Utcai Általános Iskola, Szeged
2015.06.05	71	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Bánki Donát Szakképző Iskola, Ajka
2015.07.01	29	Intelligens folyadékok	PE Nyári egyetem középiskolásoknak, Tihany
2015.07.01	29	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	PE Nyári egyetem középiskolásoknak, Tihany
2015.09.25	127	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Ifjú Kutatók Délutánja - 2015, Veszprém
2015.09.25	178	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Kutatók Éjszakája 2015, Veszprém
2015.12.14	60	Intelligens folyadékok	Debreceni SZC Vegyipari SZKI, Debrecen
2015.12.14	30	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Hőgyes Endre Gimnázium, Hajdúszoboszló
2016.04.14	87	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	PE Hlavay Diákkonferencia 2016, Veszprém
2016.05.05	104	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Tóparti Gimnázium, Székesfehérvár
2016.07.06	36	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	PE Nyári egyetem középiskolásoknak, Tihany
2016.07.07	36	Intelligens folyadékok	PE Nyári egyetem középiskolásoknak, Tihany
2017.02.06	16	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Civil Hálózatért Közhasznú Egyesület, Veszprém
2017.02.08	10	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Gamási Általános Iskola, Gamás
2017.02.17	19	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Civil Hálózatért Közhasznú Egyesület, Veszprém
2017.03.10	22	Kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	Civil Hálózatért Közhasznú Egyesület, Veszprém

2. számú melléklet

Egy 45 perces cseppfolyós nitrogént alkalmazó demonstrációs előadás kísérleteinek listája javasolt didaktikai sorrendben:

Cseppfolyós nitrogén viselkedése szobahőmérsékletű környezetben

1. A nitrogén tulajdonságainak vizsgálata
2. Oxidáció és a nitrogén
3. Hosszú cső belemerítése folyékony nitrogénbe
4. Folyékony nitrogén lezárt lufiban
5. Légpárnás kréta
6. Labda táncoltatás
7. Pingpong pörgettyű készítése
8. Cseppfolyós nitrogén-szökőkút

Hétköznapi anyagok a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletén

9. Gáztörvények – lezárt lufi hűtése
10. Gáztörvények – rugalmas membránnal lezárt lombik hűtése
11. Rugalmas gumilabda hűtése
12. Szobahőmérsékleten rugalmas anyagok törékenysége

Fémek és elektronikai alkatrészecskék viselkedése a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletén

13. Bimetall melegítése-hűtése
14. Hangvilla frekvenciájának vizsgálata
15. Örvényáramok bemutatása – mágnes a rézcsőben
16. Örvényáramok bemutatása – Lentz ágyú
17. Villanykörte izzószála folyékony nitrogénben
18. Fényemittáló dióda hűtése

Kísérletek cseppfolyós oxigénnel

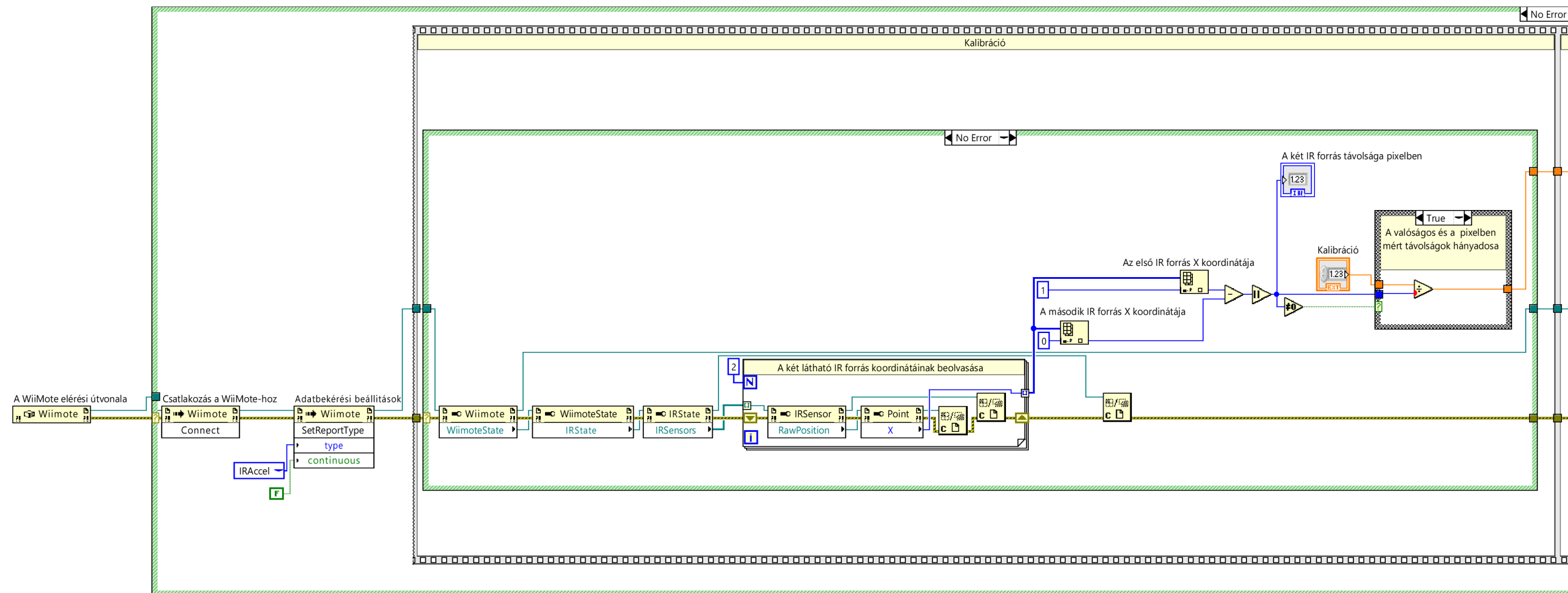
19. Cseppfolyós oxigén előállítása
20. Égő anyag belemerítése cseppfolyós oxigénbe

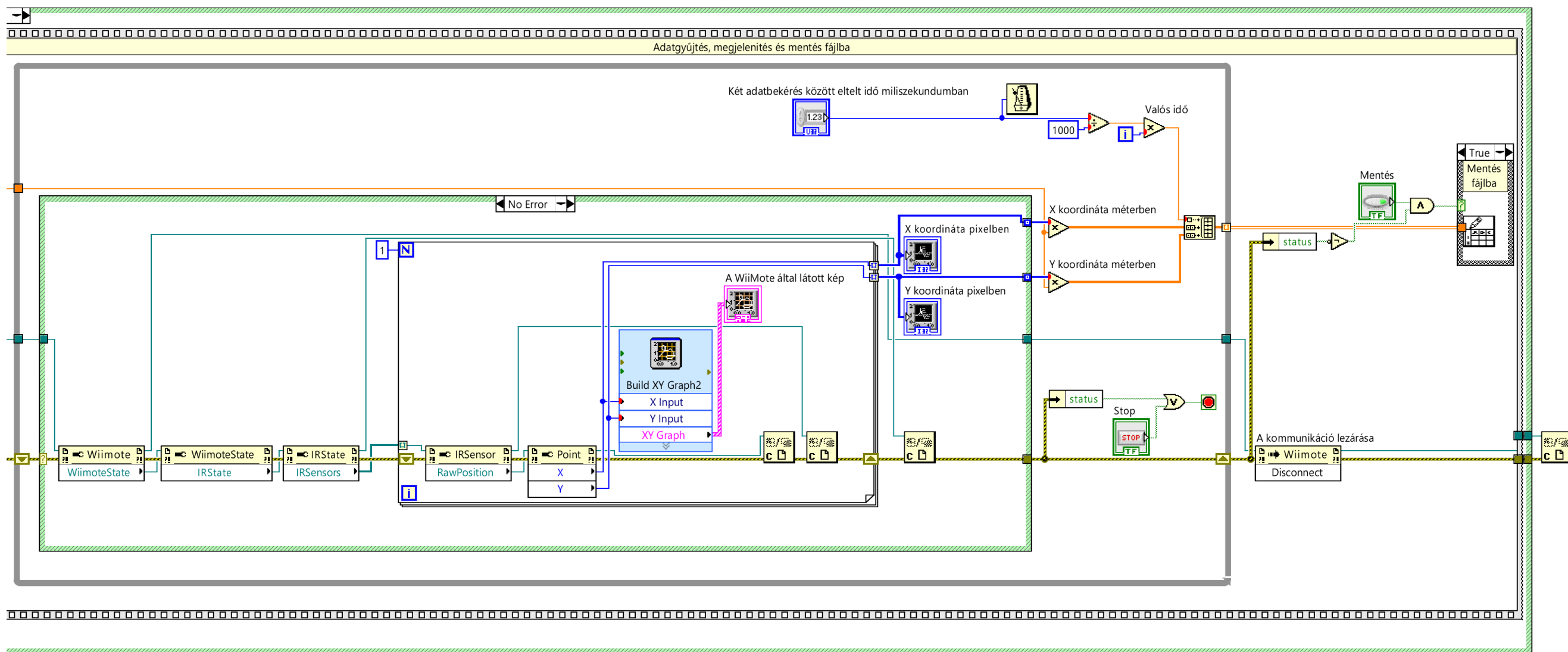
Az élő anyagok és a cseppfolyós nitrogén

21. Virágok és élő anyagok törékenysége
22. Leidenfrost effektus – emberi kéz leöntése, cseppfolyós nitrogénbe merítése

3. számú melléklet

A 3.2.5 fejezetben részletezett adatgyűjtő VI blokkdiagramja:





Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Juhász Andrásnak dolgozatom elkészítésében nyújtott nélkülözhetetlen segítségéért és hasznos tanácsaiért.

Köszönet illeti Dr. Tél Tamást és Dr. Juhász Andrást a Fizika Tanítása Doktori Program létrehozásáért, működtetéséért és a konferenciák szervezéséért.

Köszönöm kollegáimnak, Molnár Gergelynek, Teiermayer Attilának, Dr. Gugolya Zoltánnak és Dr. Horváth Barnabásnak hasznos tanácsaikat és ötleteiket.

Köszönöm Dr. Papp Katalin Tanárnőnek és Dr. Kopasz Katalinnak hogy annyi mindent tanulhattam tőlük és hogy az egyetemi hallgatói éveim végén elindítottak a szakmódszertani kutatások útján.

Köszönöm diákomnak, Molnár Áronnak, hogy sosem fogyó lelkesedéssel végezte témavezetésem alatt a néha igen nehéznek bizonyuló kutatómunkát.

Végül, de nem utolsó sorban köszönöm barátaimnak és családomnak a türelmet és a biztatást, ami nélkül ez a munka nem készült volna el.

ADATLAP

a doktori értekezés nyilvánosságra hozatalához

I. A doktori értekezés adatai

A szerző neve: **Medvegy Tibor**

MTMT azonosító: **10028192**

A doktori értekezés címe és alcíme: **Különleges anyagok és multimédiás eszközök felhasználási lehetőségei a középiskolai fizikaoktatás és a természettudományos ismeretterjesztés terén**

DOI azonosító: **10.15476/ELTE.2017.079**

A doktori iskola neve: **Fizika Doktori Iskola**

A doktori iskolán belüli doktori program neve: **Fizika Tanítása Doktori Program**

A témavezető neve és tudományos fokozata: **Dr. Juhász András CSc.**

A témavezető munkahelye: **Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Általános Fizika Tanszék**

II. Nyilatkozatok

1. A doktori értekezés szerzőjeként

a) hozzájárulok, hogy a doktori fokozat megszerzését követően a doktori értekezésem és a tézisek nyilvánosságra kerüljenek az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban. Felhatalmazom a Természettudományi kar Dékáni Hivatali Doktori, Habilitációs és Nemzetközi Ügyek Csoportjának ügyintézőjét, hogy az értekezést és a téziseket feltöltse az ELTE Digitális Intézményi Tudástárba, és ennek során kitöltse a feltöltéshez szükséges nyilatkozatokat.

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 tudásom 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 hozzájárulok a doktori értekezés és a tézisek szövegének plágiumkereső adatbázisba helyezéséhez és plágiumellenőrző vizsgálatok lefuttatásához.

Kelt: Budapest, 2017.06.30.



a doktori értekezés szerzőjének
aláírása