

A BME KÍSÉRLETI KÖRE BEMUTATJA: VÍZIRAKÉTA

Palotai Veronika
BME, TTK

Már harmadik éve, hogy a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Természettudományi Karának szakkollégiumán, a Wigner Jenő Szakkollégiumon belül működő öntevékeny kör, a Kísérleti Kör tagjai a nyarat egy egyhetes „nyári iskolával” indítják. Ahogy a név is sejteti, ez kötetlen, csapatépítő jellegű, egyben szakmai esemény. A Kísérleti Kör tevékenységébe azonban nem csak ekkor tudnak beleszólani az új tagok, hanem év közben is számos lehetőség kínálkozik. Elsősorban rendszeres szemináriumokon, ahol a TTK-s hallgatók a fizikai ismereteik mellett elektronikai és

programozási tudásukat is csiszolhatják egy Geiger-Müller-számláló vagy épp egy elektronikus dobókocka elkészítésével (1. ábra). Aki az előadói készségét fejlesztené, annak sem kell messzire mennie, hiszen remek lehetőség a kísérletezős szeminárium, ahol a résztvevők egymásnak mutatnak be érdekes kísérleteket. Építésből, forrasztásból, illetve kísérletek bemutatásából a nyári iskolákban sincs hiány. Minden alkalommal kitűzünk egy központi projektet, ez általában egy komolyabb eszköz elkészítése. Készült már ködkamra és indukciós hevítő is, de jutott idő a résztvevők által bemutatott rövid, frappáns, érdekes kísérletekre is. Régóta célunk, hogy egyfajta adatbázist hozzunk létre az elkészített eszközökről, illetve a bemutatott kísérletekről, így a dokumentálás is a nyári iskolák elengedhetetlen része. A Kísérleti Kör honlapját felkeresve bárki, aki kedvet kap hozzá, böngészheti a már meglévő leírásokat. Az is előfordult, hogy a nyári iskolát nem csak a Kísérleti Kör tagjai, hanem maga a Szakkollégium szervezte. Szakkollégistaként pedig nem csupán a Kísérleti Kör szemináriumain lehet részt venni, hanem számos egyéb szemináriumon is, például gépi képfeldolgozás vagy webszerkesztés témá-



1. ábra. Az elektronikusdobókocka-készítő szeminárium résztvevői az elkészült eszközökkel [1]. Balról jobbra: Träger Magdolna, Madarász Fanni, Hadobás János, Szűcs Ágnes, Buday Csaba, Sánta Botond, Horváth Levente, Kardos Boldizsár, Blaskó Márk.

ban. A szemináriumok mellett a Szakkollégium olyan közéleti eseményeket is szervez, amelyeken a kar bármely hallgatója részt vehet. Ilyenek a nagyelőadások, amelyeket a saját területükön elismert, neves előadók tartanak, vagy a Wigner-konferencia, amelyen a hallgatók egymásnak adnak elő a kutatási eredményeikről.

A vízirakéta-projekt

A 2017-es nyári iskola (2. ábra) fő konstrukciós projektje egy vízirakéta építése volt. A cél egy olyan eszköz megvalósítása volt, amelyet a rakétatestből kiáramló víz hajt, ejtőernyő segítségével képes sérülés-

2. ábra. A 2017-es nyári iskola résztvevői [1]. Első sor balról jobbra: Czémán Mátyás, Sánta Botond, Nyáry Anna, Träger Magdolna. Hátsó sor balról jobbra: Gyökös Réka, Boros Csanád Örs, Palotai Veronika, Balogh Nóra, Madarász Fanni, Hadobás János.



Palotai Veronika a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Természettudományi Kara másodéves Fizika BSc szakos, alkalmazott fizika szakirányos hallgatója. 2016 szeptembere óta cikkíró és tördelő a *Pikkász* című kari lapnál, illetve 2017 februárja óta a kari Wigner Jenő Szakkollégium tagja, ahol 2018 áprilisában az Oktatási és Kapcsolatok Munkacsoport vezetőjének választották. A Szakkollégium Kísérleti Kör nevű öntevékeny körének tagja.

mentesen landolni, illetve repülése során különböző műszereket hordozva a fedélzetén méréseket végez. A Kísérleti Kör néhány tagja már korábban is megkísérelte ezt, így rendelkezünk egy kezdetleges modellel. Ez azonban koránt sem volt tökéletes, ezért egy komolyabb, összetettebb eszközt akartunk építeni. Első lépésként az interneten a „vízirakéta” kulcsszó alatt fellelhető elgondolások széles tárházából ki kellett választanunk az erőforrásainkhoz illeszkedő ideális koncepciót. Tudtuk, hogy a rakétatest alapanyaga PET-palack lenne, de döntenünk kellett, hogy egy vagy több palack alkotja-e majd. Előbbi a lehető legyszerűbb megoldás, azonban a többpalackos verziót sem nehéz elkészíteni, hiszen a hossz tengelyük mentén a palackok jól összeragaszthatók. Ezzel növelhetjük a rakéta térfogatát, ami nagyobb hasznos teher cipelését teszi lehetővé – a maximálisan elérhető magasság rovására. E verzióknak azonban van egy komoly buktatója is: a nyomásállóság miatt ügyelni kell az illesztések pontosságára. Ha kellően meg tudjuk erősíteni a falat, akkor nagyobb nyomást érhetünk el, így magasabbra tudunk repülni. Idáig csak az egyfokozatú rakétákról esett szó, azonban többfokozatúak készítése is lehetséges. Igazán ezekkel növelhető meg a repülési magasság. A második fokozat nemcsak magasabbról indul, hanem kezdősebességgel is rendelkezik. Ugyanakkor problémát jelent az első fokozat leválasztása, illetve a második fokozat indítása. Természetesen nem csak PET-palackot használhatunk alapanyagként, de a másfajta, erősebb anyagból készült, egyedileg gyártott rakétákkal már világcsúcsokat szöktak dönteni.

Mi végül egy többpalackos, egyfokozatú rakéta elkészítése mellett döntöttünk. Azonban hiába láttuk már szinte a levegőben a rakétát, a tervezéssel koránt sem voltunk készen, még jó néhány problémával kellett megbirkóznunk. Többek között a kilövőállás nyomás alá helyezésével, a (táv)kioldással, vész esetén a nyomás leengedésével, illetve a kilőtt rakéta visszacszerzésével. Nem lennénk Kísérleti Körösök (és fizikusok), ha csak a látvánnyal beérnénk, így a rakéta segítségével elvégezhető méréseket is kidolgoztunk, amelyek később akár egy komolyabb rakéta- vagy drónprojektben is a segítségünkre lehetnek. Ezek közül a legfontosabb a magasság és a sebesség mérése, illetve a rakéta repülésének kamerával való rögzítése. Továbbá célunk volt, hogy információkat szerezzünk a külső hőmérsékletről, valamint a rakéta gyorsulásáról is. A rengeteg feladat miatt a rakéta elkészítésével kapcsolatos tennivalókat előzetesen elosztottuk egymás között, így a nyári iskoláig hátra lévő hetekben mindenki igyekezett a saját részfeladatához



3. ábra. a) A vízirakéta kilövőállása a földhöz rögzítve. b) és c) Palack csatlakoztatása és kioldása. d) A tartórészre felszerelt elektronika [1].

szükséges ismereteket, alapanyagokat összeszedni, illetve – amennyire időnk és a feladat jellege engedte – nekikezdeni.

Előzetes részfeladatok

A rakéta kilövőállásának elkészítése (Balogh Nóra)

A cél a Kísérleti Kör korábbi, eléggé kezdetleges kilövőállásának továbbfejlesztése volt. Az elsődleges problémát a nem megfelelő szigetelés jelentette a palack nyakánál, itt ugyanis nagyjából 3 bar nyomásnál a víz kezdett kiszivárogni a palackból. Ezen egy egyszerű O-ring szigetelőgyűrűvel segíteni lehetne, azonban Nóri egy teljesen új koncepciót dolgozott ki és valósított meg. A korábbi PVC-csőves verzió helyett egy szövetbetétes levegőtömlő képezte a kilövőállás csövét, ami egy kompresszor-gyorscsatlakozóval végződött. A gyorscsatlakozóhoz biciklitömlőt autópumpához csatlakoztató szelepet is vettünk, hogy azt biciklipumpával is használhassuk. A tapasztalat azt mutatta, hogy kitűnően bírta a nagyobb nyomást, csak a szelep megfelelő csatlakoztatására kellett figyelni. A cél egy teljesen szétszerelhető, stabil állvány elkészítése volt. Ezért MEFA-szerelősinéket használtunk, amelyeket fémlapokkal könnyen egymáshoz tudunk csavarozni. Sátorvasakkal pedig a földhöz tudtuk rögzíteni. A cső végére egy mozgatható fejű vizes gyorscsatlakozót (Gardena) szereltünk. A fejre gyorskötözőkkel köteleket rögzítettünk, ezek megáramlásával lehetett a palackot kioldani (3.a ábra). A kioldható csatlakozóban van egy szelep, ami a levegőáramlást csak akkor engedi, ha a palack be van kattintva. Itt a víz visszafolyására kell ügyelni, ezért szilikonos tömlőt ragasztottunk a palackba. Emiatt azonban a víz nehezebben áramlott ki a kilövésnél, ezért végül a tömlő nélküli palackot használtuk. A kilövésre szánt palackokat kétféleképpen készítettük el. Egyrészt használtunk egy egy collos gyorscsatlakozót, amibe a palack kifűrt kupakját ragasztottuk. Ekkor először a palackot és a kupakot ragasztottuk össze, majd a kupakot egy gumis tömítéssel a gardena-csatlakozóba rögzítettük. A kritikus pont itt a ragasztás volt. A melegragasztós verzió nagyon hamar

szétjött, ezért ahol lehet, ott kétfázisú ragasztót használtunk. A másik lehetőség az volt, hogy a palackok nyakáról lecsiszoltuk a meneteket és úgy ragasztottuk bele kétfázisú ragasztóval egy 3/4 colos gyorscsatlakozóba. Ez a verzió kicsit hosszabb előkészítést igényelt, de strapabírónak bizonyult (3.b és 3.c ábra).

Ejtőernyő készítése a rakétához (Träger Magdolna)

Kilövés után a rakéta visszazuhan a földre, és mivel esés közben nagy sebességet érhet el, könnyen megsérülhet. Ezért szükséges (főleg az orr-részben található elektronika védelme miatt) ejtőernyővel felszerelni a rakétát, amely ideális esetben a pálya legmagasabb pontján kinyílik. Magdi először egy vékonyabb anyagból készített nyolcszög alakú próbajejtőernyőt, amelyhez madzagokat erősített. Az ernyőt kicsire összehajtogatva helyeztük a rakéta orrába, egy kis rekeszbe az elektronika mellé. Zuhanáskor az ernyőt tartó rekesz ajtaját szervomotor segítségével nyitottuk ki. A szervomotorral mobiltelefonon keresztül kommunikáltunk. Az első sikeres tesztek után Magdi erősebb anyagból is elkészítette az ejtőernyőt, ez került a rakéta végleges verziójába.

Elektronikatartó-rész kialakítása (Madarász Fanni)

A komoly elektronika – amit sokáig szeretnénk használni – komolyabb védelmet és rögzítést igényelt. Ehhez egy olyan műanyag foglalatot építettünk, amely egyben az ejtőernyőt is rögzíti. Alapanyagként vízálló polipropilén hullámkartont (corriflute) használtunk, mivel olyan anyagra volt szükségünk, ami viszonylag könnyű, hiszen az elektronika, illetve az ejtőernyő éppen elég súlyt fog jelenteni a rakéta orrában. Ugyanakkor gondolnunk kellett a landolásra is, szeretnénk volna elkerülni, hogy földet éréskor valamilyen szenzor károsodjon, így szintén fontos szempont volt, hogy alapanyagunk strapabíró is legyen. Ez a fajta hullámkarton mindkét szempontból tökéletes választásnak bizonyult.

A rakétatest elkészítése (Palotai Veronika)

Egy strapabíró rakétatest kialakítására volt szükségünk. Tesztelésekppen, hogy a rendelkezésünkre álló üdítő palackokból kiválasszuk a legalkalmasabbat, egypalackos prototípusokat készítettünk. Végül egy 2,5 literesre esett a választásunk. A többpalackos rakétatest esetünkben két palackot takart. Az egyik palack nyílását úgy alakítottuk ki, hogy azt csatlakoztatni lehessen a kilövőálláshoz. A kilövéskor ez volt az a palack, amit megtöltöttünk (az üzemanyagként használt) vízzel. A másik palackból készült a rakéta orra, amelyben az elektronikát, illetve az ejtőernyőt helyeztük el. Ezt az egyharmadánál kettévágtuk, majd az elkészült tartórészt az elektronikával, illetve az ejtőernyővel abba a részbe helyeztük, amelyiken a palack nyílása volt. Áramlástan okokból a palack nyakát a csavaros menettel együtt levágtuk, helyére pedig egy hungarocellból készült, lekerekített tetejű testet helyeztünk, amely formáját tekintve követte a palack felső részének alakját. A rakétatest után a terelőszár-

nyak következtek. Ezek szintén hullámkartonból készültek, és melegragasztóval erősítettük őket a rakétatestre. Ez a megoldás egészen tartósnak bizonyult, a terelőszárnyak ritkán törtek le a rakétatestről, de nem minden szempontból volt a legjobb döntés, mert a meleg hatására a palack deformálódni kezdett.

A rakétában használt szenzorok ismertetése (Hadobás János)

Szerencsére ma már igen sok olcsó és egyszerűen használható, sokoldalú integrált áramkör áll rendelkezésre, így első lépésként a számunkra legmegfelelőbbeket kellett kiválasztanunk. Az adatlapok átolvasása után az alábbi szenzorok mellett döntöttünk:

- GY-521 (MPU6050) giroszkóp, gyorsulás szenzor;
- GY-68 (BMP180) nyomás és hőfokmérő.

Még egy Raspberry Pi-t is beszereztünk, amelyet szenzoradatgyűjtőként használtunk. Jani feladata a függvények mérirása volt a szenzorok kiolvasásához. Ezt követően a – Fanni által kialakított – tartóréssze felszerelte az elektronikát (3.d ábra), ügyelve arra, hogy az ejtőernyő kioldását semmi se akadályozza.

Kamera beüzemelése a rakétához (Gyökös Réka)

A rakéta emelkedését a rakéta „szemszögéből” is szeretnénk volna látni, így a rakétatestre egy kamerát telepítettünk. Kínából egy igen olcsó és sokoldalú, kis méretű kamerát rendeltünk, amelyet a rakéta elektronikatartó-részébe építettünk. A kamera 720p-s felvételeket készít, és µSD kártyára rögzíti azt. Az eszköz 5,8 GHz-en real-time analóg videót is képes sugározni (ehhez megfelelő vevőre lenne szükség, de most szándékosan nem vettünk). Réka a beépítés előtt tesztelte a kamerát, összeállította annak tápegységét, illetve egy védőburkolatot készített hozzá.

Szimulációs kód, GUI fejlesztése (Buday Csaba, Boros Csanád Örs)

A rakétaegyenleteket és fizikatudásunkat felhasználva szimulációt készítettünk a rakéta működéséről. A kód alapjait Csabi írta meg, Örs pedig a megírt kódhoz kialakította a felhasználóbarát GUI-t (Graphical User Interface, azaz grafikus felhasználói felület). Bizonyos paramétereket a kilövés során mérésrel tudunk meghatározni, így egy idő után a szimuláció továbbfejleszhetővé vált. A modellben található kísérleti paramétereket Örs határozta meg a mérések alapján.

Pneumatikus összeállítás készítése (Buday Csaba)

Szeretnénk volna egy kicsit fejlettebb kilövőrendszert, ami a következő kritériumoknak felel meg:

- levegő felengedés;
- vízzel feltöltés;
- vész-leeresztés;
- távvezérelhetőség;
- a nyomás távolról való leolvashatósága;
- a vizes és a levegős rendszer különválík (a levegős rendszerbe nem kerülhet víz);
- biztonsági szelep (túl nagy nyomás ellen).



4. ábra. A kész rakéta a kilövőálláson, indításra várva [1].

Az elkészült indítóállomás (4. ábra) végül nem minden célnak felelt meg, de ezt további fejlesztéssel javítani lehet (elsősorban visszacsapó szelepre lenne szükség). Az elkészült rendszerben egy T idomban egyesül a vizes és a levegős rendszer. Fontos, hogy először a vízzel feltöltést kell elvégezni, utána következhet a levegő betöltése. Lényeges szempont az is, hogy a levegő betöltése során a levegős rendszer nyomás alatt legyen (a víz ne tudjon visszafolyni), valamint a kompresszor magasabban legyen a rakéta vízszintjénél (szintén visszafolyás megakadályozása). Csak levegős nyomásmérővel rendelkeztünk, így nem tudtuk közvetlenül mérni a palack nyomását. Ehhez egy vizes nyomásmérőre (is) szükség lenne.

A nyári iskola első néhány napjában átbeszéltük, illetve befejeztük a részfeladatokat, hogy a rengeteg munka után végre tesztelhesük a rakétánkat. De mi is történik a kilövést követően? Először tekintsünk át egy, a rakéta viselkedésére vonatkozó egyszerű fizikai modellt.

A vízrakéta fizikai modellje

A rakétát a kiáramló víz hajtja előre. Az energiát a nagynyomású levegő tágulása biztosítja. Egy egyszerű fizikai modellben a következő hatásokat kell figyelembe vennünk:

- víz kiáramlása (rakétaelv);
- gáz tágulása (adiabatikus modell), ami a vizet kinyomja a palackból;
- gravitáció;
- légellenállás;
- a víz elfogyása után a levegő még biztosít egy lökést, ami nagyon gyorsan lezajlik;

A modellhez szükséges paraméterek:

- m_0 (kg): üres tömeg;
- $V_{üzemanyag}$ (m^3): betöltött vízmennyiség (a levegő tömegét elhanyagoljuk);
- $\rho_{üzemanyag}$ ($kg \cdot m^{-3}$): víz sűrűsége;
- g ($m \cdot s^{-2}$): gravitációs gyorsulás;
- p_{g0} (kPa), V_{g0} (m^3): kezdeti gáznyomás és térfogat;
- $\gamma(1)$: adiabatikus együttható;
- $p_{körny}$ (kPa): külső légnyomás;
- $A_{fúvóka}$ (cm^2): fúvóka átmérője;
- A_{homlok} (cm^2): homlokl felület;
- $\rho_{levegő}$ ($kg \cdot m^{-3}$): levegő sűrűsége;
- $C_d(1)$: közegellenállási együttható.

A modell szakaszai:

- *gyorsítási szakasz, víz munkaközeg:* így indul a modell;
- *gyorsítási szakasz, levegő munkaközeg:* a víz elfogyásakor a maradék levegő még némi meghajtást ad, a levegő jóval kisebb dinamikus viszkozitása miatt ez a szakasz jóval gyorsabban lezajlik;
- *lassulási szakasz:* a munkaközeg elfogyott, a rakéta tömege nem változik, innen ballisztikus pályán mozog, a légellenállás és a gravitáció hatnak rá;
- *esési szakasz:* a sebesség megfordulása után a légellenállás és a gravitáció már ellentétes előjellel hatnak. Ha ernyő is van, itt érdemes kinyitni, és akkor ez a szakasz jóval tovább fog tartani.

Mivel a modelltől elsősorban a csúcsmagasságot akarjuk meghatározni, az első két szakasz a mérvadó. Az adiabatikus expanziós modell a folyamat sebességével indokolható. Az egész gyorsítási szakasz jellemzően másodpercek alatt lezajlik, így a gáznak nincs módja energiát felvenni a környezetétől.

A szimulációhoz szükséges állapotváltozók:

- x (m), v_x ($m \cdot s^{-1}$): kinematikai jellemzők;
- V_g (m^3): gáztérfogat.

Az adiabatikus állapotegyenletből meghatározható a pillanatnyi nyomás:

$$p_g = p_{g0} \left(\frac{V_{g0}}{V_g} \right)^\gamma$$

Az adiabatikus változás során a gáz belső energiája teljesen munkává alakul. Ez hajtja a kiáramló vizet.¹

Ezt figyelembe véve a következőket kapjuk (infinitezimális értékek):

- gáztérfogat-változás: δV_g ;
- kiáramló víztérfogat: $\delta V_g = v_{ki} A_{fúvóka} dt$;
- gáz által végzett munka: $dW = \delta V_g p_g$;
- a kiáramló víz mozgási energiája:

$$\frac{1}{2} \delta V_g \rho_{üzemanyag} v_{ki}^2;$$

- a kiáramló vizet viszont nem a vákuumba nyomjuk, hanem a környező levegőbe, így ehhez is munkát kell végezni: $dW_{ki} = -\delta V_g p_{körny}$

¹ Ez természetesen csak ideális esetben igaz. A valóságban hidraulikai veszteségek is fellépnek. Ezekkel később foglalkozunk.



5. ábra. A rakéta trajektóriája [1].

Az utolsó három egyenletből megkapjuk a kiáramlási sebességet:²

$$v_{ki} = \sqrt{\frac{2(p_g - p_{körny})}{\rho_{üzemanyag}}}$$

A kiáramlási sebesség meghatározása után az infinitézimális impulzusváltozás:

- kiáramló tömeg:

$$\frac{dm_{üzemanyag}}{dt} = v_{ki} A_{fűvóka} \rho_{üzemanyag}$$

- kiáramló impulzus:

$$\frac{dp}{dt} = v_{ki}^2 A_{fűvóka} \rho_{üzemanyag}$$

Innen már egyszerűen felírható a dinamikai egyenlet:

$$F = v_{ki}^2 A_{fűvóka} \rho_{üzemanyag} - (m_0 + \rho_{üzemanyag} [V_{üzemanyag} - V_g + V_{g0}]) g - A_{bomlok} \rho_{levegő} C_d v_x^2$$

Tesztelési eredmények, jövőbeli tervek

A fizikai modell leírásakor szó esett arról, hogy az energia kezdetben nyomásként (az összenyomott levegő energiájaként) tárolódik a rendszerben. A túlnyomást egy kompresszor segítségével hoztuk létre.

A kompresszor növeli a gáz nyomását és csökkenti térfogatát, így az energiát lényegében a sűrített levegő biztosítja. Már az első tesztek is meglepően sikeresek voltak, a rakéta 30-40 méter magasra is felrepült, és a vízzel feltöltött részében indítás előtt 7-8 bar nyomást is elértünk. Eleinte nehézséget okozott, hogy az ejtőernyőt a megfelelő pillanatban nyissuk ki. Ezt ki kellett tapasztalunk, de pár kilövést követően sikerült eltalálni a megfelelő időpontot. A kamerával sajnos nem sikerült értékelhető felvételt készítenünk, mivel a kioldás pillanatában a rakétát érő erőhatások következtében leállt. A hőmérséklet- és a gyorsulásmérés azonban sikeres volt, bár előbbi esetében a kis magasság

miatt nem számítottunk igazán érdekes adatokra. A rakétakilövéseket igyekeztünk az összes lehetséges módon dokumentálni, így született meg az az ötlet, hogy a rakéta orrába villogó fényforrást szerelve, sötétedés után készítsünk hosszú záridős képeket, így rögzítve a rakéta pályáját. Ez a próbálkozás meglepően sikeres volt, a 5. ábrán tökéletesen kivehető a rakéta trajektóriája.

Sajnos a kilövések során az orr-rész minden megerősítés ellenére is sokat sérült, így a nyári iskola végén ezt leszereltük a rakétáról, az elektronikát kiszedtük belőle, és egy, az eredetihez hasonló, üres orr-részt készítettünk. Ezt a leegyszerűsített változatot azóta számos fizika-, illetve tudomány népszerűsítő eseményen nagy sikerrel mutattuk be. Ilyen volt a 2017 szeptemberében, a Várkert Bazárban megrendezett *Tudományok Fővárosa*, ahol az érdeklődő gyerekek versenyt futottak azért, hogy melyikük hozza vissza a kilőtt rakétát. Szerencse bőven akadt jelentkező a kilövésre is. A nem sokkal későbbi *Kutatók Éjszakáján* a vízirakéta ismét hasonló sikert aratott, akárcsak az áprilisban megrendezett *A fizika mindenkié 4.0*-án. Ami pedig a Kísérleti Kör nyári iskoláját illeti, a tavalyi sikeren felbuzdulva idén is hasonlóan nagyszabású projektet tervezünk, ám a témája még kérdéses.

Irodalom

1. <https://wjsz.bme.hu/~kiskor/wiki/Vízirakéta>

² Ha a sebességet a Bernoulli-egyenletből vezetjük le, ugyanezt az eredményt kapjuk. A veszteségeket – természetesen – a Bernoulli-egyenlet sem veszi figyelembe.