

Ifj. Zátonyi Sándor:

Nehézségi erő, súly, súlytalanság

A 66. Országos Fizikatanári Ankéton ezüst minősítést nyert műhelyfoglalkozás anyaga alapján

Kivonat

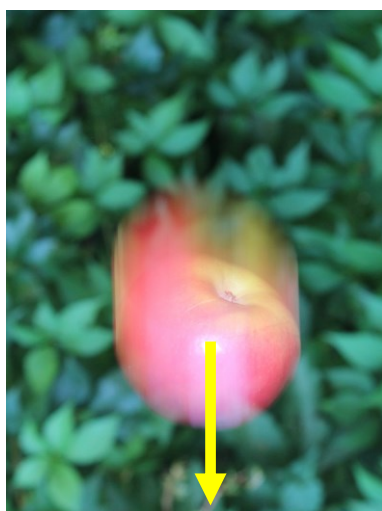
Kapu Tibor úrutazása után különösen aktuális a súlytalanság fizikai háttere. A műhelyen először a nehézségi erő, a súly és a súlytalanság fogalmait jártuk körbe. Olyan egyszerű kísérleteket is elvégeztünk, melyek már általános iskolában is bemutathatók, és jelentős motivációs hatásuk is van. Ezután a mikrogravitáció kifejezéssel foglalkoztunk. Elemeztük a szó jelentését, elvégeztünk néhány egyszerű számítást és megmutattuk, hogy e kifejezés használata félreértéseket, ellentmondásokat szülhet, és így gátolja a fizikai lényeg megértését. Végezetül megvizsgáltunk néhány olyan jelenséget, amelynél a súly fogalmának használata már indokolatlannak is tűnhet? A műhelyhez készült internetes anyagok itt^[3] érhetők el.

Nehézségi erő, tartóerő, súly, súlytalanság

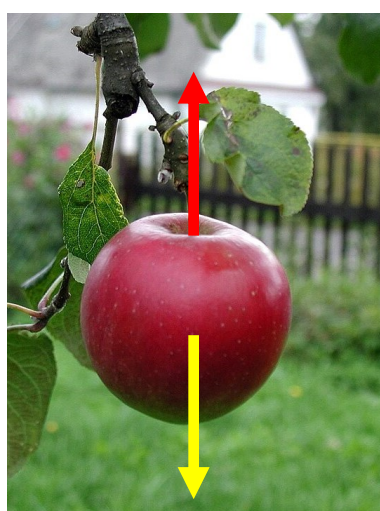
A szabadon eső alma g gyorsulással mozog függőlegesen lefelé, gyorsulását (alapvetően) a Föld gravitációs vonzása okozza. Ezt a hatást a *nehézségi erővel* jellemezzük (1. ábra), melynek nagysága:

$$F_{\text{neh}} = m \cdot g.$$

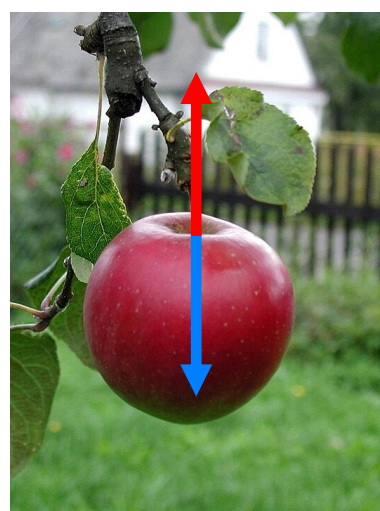
Amikor azonban az alma még a fán függött, akkor nem gyorsult, sőt nyugalomban volt. Ez csak úgy lehetséges, hogy a faág felfelé húzta az almát, ezt az erőt *tartóerőnek* hívjuk (2. ábra).



1. ábra



2. ábra



3. ábra

Nyugalom esetén a tartóerő és a nehézségi erő ugyanakkora, de ellentétes irányúak egymással. Érdeemes megemlíteni, hogy a nehézségi erő és a tartóerő is ugyanarra a testre hat.

A hatás–ellenhatás törvényének megfelelően azonban nem csak a faág húzza felfelé az almát, hanem az alma is húzza lefelé a faágat, ezt az erőt *súlynak* nevezzük. (3. ábra) A tartóerő és a súly ugyanakkora, de ellentétes irányúak egymással. Lényeges, hogy a tartóerő és a súly két különböző testre hat (az almára, illetve a faágra).

Első kísérletként egy gyurmagolyót helyeztünk egy két végén alátámasztott műanyag vonalzó közepére, amelyre ezen a helyen előzőleg egy néhány milliméteres lyukat fűrtünk. A gyurmagolyó *súlya* alatt a vonalzó meghajlott, a *tartóerő* viszont kissé belapította a gyurmagolyó alját, illetve jól látszott a vonalzóra fűrt lyuk lenyomata is. Mindezeket összegezve definiáltuk a súly fogalmát: *Azt az erőt, amelyet a test az alátámasztásra vagy a felfüggesztésre kifejt, súlynak nevezzük.*

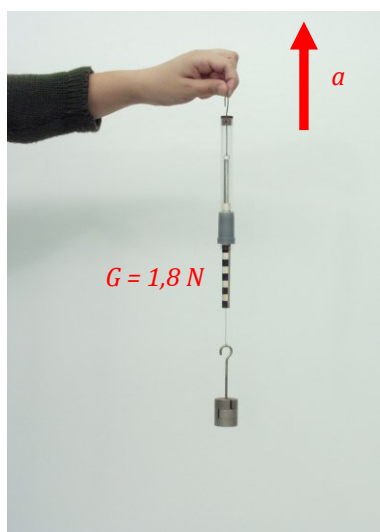
E három erő jellemzőit az alábbi táblázatot elemezve foglaltuk össze.

Neve	Jele	Iránya	Mi fejti ki?	Mire hat?
Nehézségi erő	F_{neh}	le	a gravitációs mező	a testre
Tartóerő	F_t	fel	az alátámasztás a felfüggesztés	a testre
Súly	G	le	a test	az alátámasztásra a felfüggesztésre

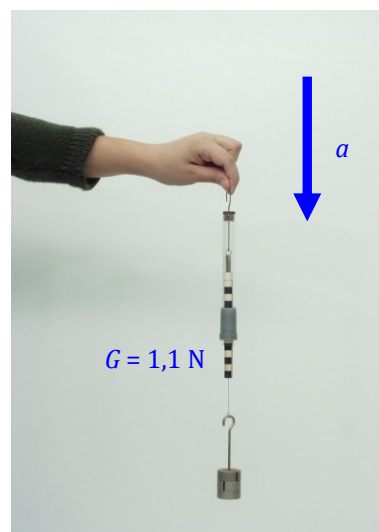
A továbbiakban a függőlegesen gyorsuló testek súlyát elemeztük. Fotók, továbbá a kollégák korábbi kísérleti tapasztalatai alapján megállapítottuk, hogy a felfelé gyorsuló testek súlya nagyobb, a lefelé gyorsulóké kisebb, mint nyugalmi állapotban (4–6. ábra).



4. ábra



5. ábra



6. ábra

A *dinamika alapegyenletéből* kiindulva először a felfelé gyorsuló test súlyát határoztuk meg (7. ábra).

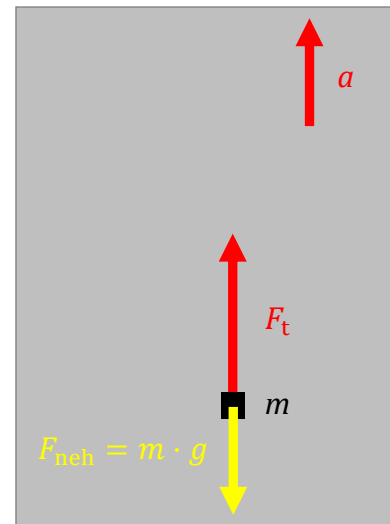
$$m \cdot a = F_t - m \cdot g$$

$$F_t = m \cdot g + m \cdot a$$

$$F_t = m \cdot (g + a)$$

A hatás–ellenhatás törvénye miatt a *felfelé gyorsuló test* súlya ugyanekkor, azaz:

$$G = m \cdot (g + a)$$



7. ábra

A lefelé gyorsuló test súlya ugyancsak a dinamika alapegyenletéből kiindulva határozható meg (8. ábra).

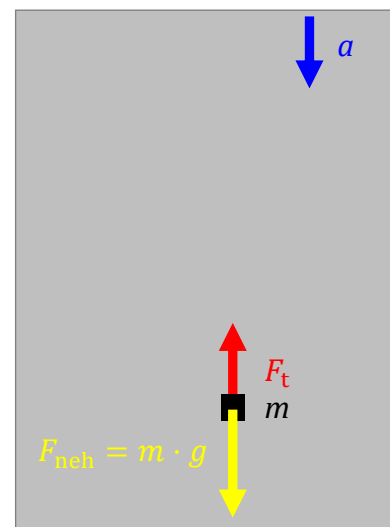
$$m \cdot a = m \cdot g - F_t$$

$$F_t = m \cdot g - m \cdot a$$

$$F_t = m \cdot (g - a)$$

A hatás–ellenhatás törvénye miatt a *lefelé gyorsuló test* súlya ugyanekkor, azaz:

$$G = m \cdot (g - a)$$



8. ábra

A szabadon eső testre csak a nehézségi erő hat, ilyenkor a test lefelé gyorsul (9. ábra). Az előbbi összefüggés szerint:

$$G = m \cdot (g - a)$$

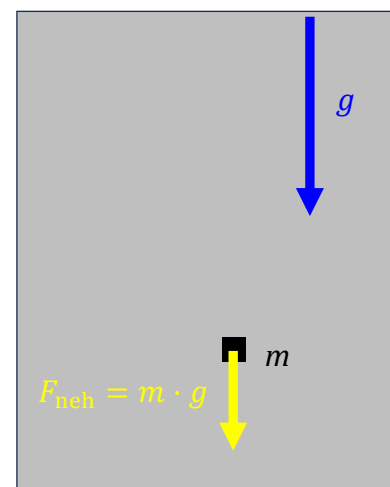
$$G = m \cdot (g - g)$$

$$G = m \cdot 0$$

$$G = 0$$

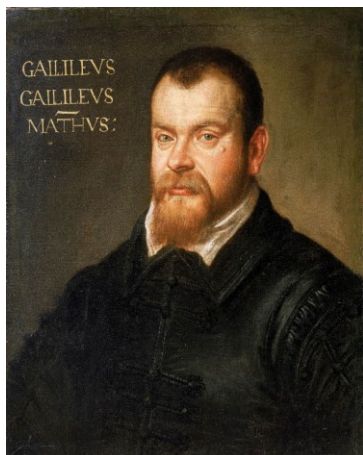
A szabadon eső test tehát *súlytalan*. A hatás–ellenhatás törvénye miatt ugyanekkor a tartóerő is, azaz:

$$F_t = 0$$



9. ábra

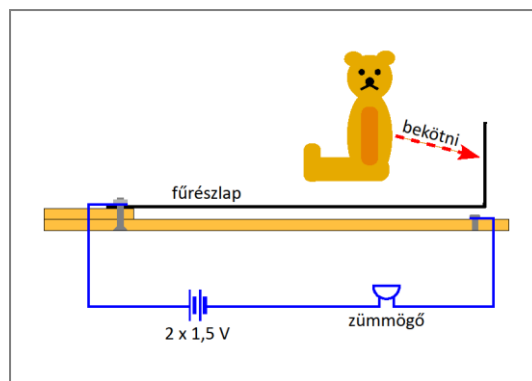
Ezt követően Galilei (10. ábra) súlytalansággal kapcsolatos gondolatait idéztük fel az 1638-ban megjelent *Párbeszéd* című művéből (Heinrich László fordításában):



10. ábra

„Érezzük a vállunkon a súlyt, midőn ellenszegülünk annak a mozgásnak, amelyre a bennünket nyomó súly törekszik, ám ha ugyanolyan sebességgel ereszkednénk alá, amellyel a szabadon eső teher a helyét változtatja, akkor ugyan mi módon tudna bennünket nyomni a súly? Nem látja-e, hogy ez ugyanaz, mintha kopjával akarnók megsebesíteni azt, aki előttünk szalad, velünk egyenlő vagy annál nagyobb sebességgel? Vonja hát le ebből azt a következtetést, miszerint szabad és természetes esés közben a kis kő nem fejt ki nyomást a nagy kőre, azaz nem növeli annak súlyát, ahogyan ez nyugalmi állapotban megtörténik.”

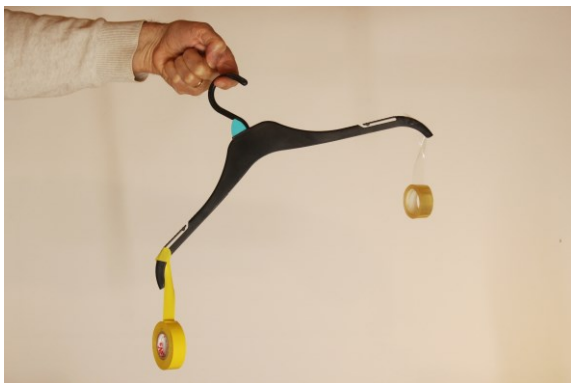
A súlytalanság közvetlen szemléltetésére két kísérletet végeztünk el. Az első kísérletben egy saját készítésű űrhajómodellt használtam (11. ábra). Ennek fő alkatrésze egy deszkalapra csavarozott, L alakban meghajlított fűrészlap volt, amely a rá rögzített játékmaci („űrhajós”) súlya alatt lehajlott, és így zárt egy érintkezőt. Ez működtette a deszkalapra szerelt, két darab AAA méretű, 1,5 V-os elemről üzemelő zümmögőt. Ha ezt az eszközt (űrhajómodellt) elejtettük, akkor az „űrhajós” súlytalanná vált, így a fűrészlap visszanyerte eredeti alakját. Emiatt az áramkör megszakadt, és így a súlytalanságban a zümmögő elnémult.



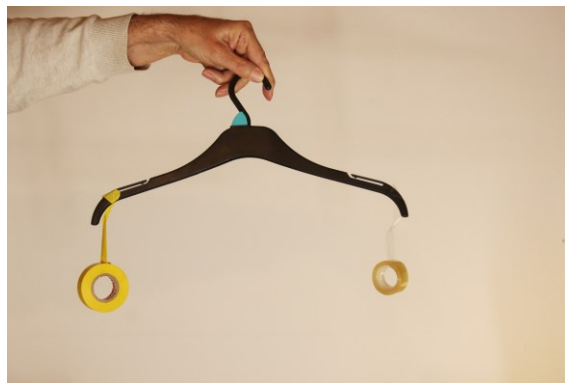
11. ábra

A második kísérletben egy kiegyensúlyozatlan kétkarú mérlegmodell szabadesését vizsgáltuk. A modell valójában egy műanyag vállfa volt, amelynek egyik végére egy tekercs szigetelőszalagot, a másikra egy tekercs celluxot függesztettem*. (A tekercsekből egy-egy darabot letekerve a vállfa végeire ragasztottam őket.) A vállfa kampóját a mutatóujjamra akasztva a vállfa elbillent, mivel a két tekercs súlya eltérő volt (12. ábra).

* A leérkezéskor a szigetelőszalag és a cellux nem sérül, és a padlót sem károsítja.



12. ábra



13. ábra

Ha azonban a vállfát vízszintes helyzetben tartottam (13. ábra), majd elejtettem, esés közben megtartotta vízszintes helyzetét. Szabadesés közben ugyanis mindkét tekercs súlytalan volt, így egyik sem húzta a mérlegmodell (vállfa) karjait.

A súly, illetve a súlytalanság több fizikai jelenséget is befolyásol, a műhelyfoglalkozáson ezzel kapcsolatos kísérletek következtek. A vízszintes lapon meglökött test a *súrlódás* miatt hosszabb–rövidebb úton megáll. Ebben az esetben a test súlya nyomja a lapot (a lap pedig a tartóerővel nyomja a testet). Ha azonban a testet tartó lapot leejtjük, akkor esés közben a test súlya és a tartóerő is megszűnik, tehát a felületeket nem szorítja össze semmi. Ennek következtében megszűnik a súrlódás, így a test lassulás nélkül végigcsúszik a lapon. Ezt a jelenséget egy rövid *YouTube* videóval^[4] szemléltettem.

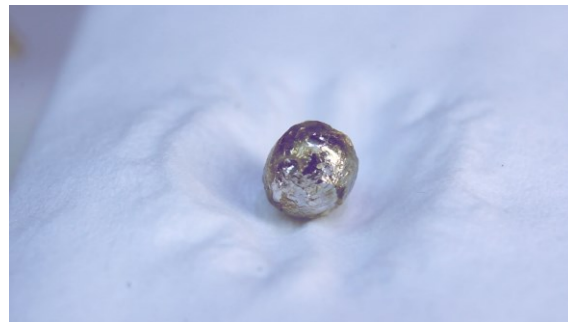
Ehhez kapcsolódóan bemutattam azt a közismert kísérletet is, melyben egy könyvecsomag alsó kötetébe helyezett papírlap a súrlódás miatt nem húzható ki a lapok közül (helyette a papírlap elszakad). Ha azonban a könyvecsomagot leejtjük, akkor a lap könnyedén kicsúszik. Esés közben ugyanis a könyvek súlya és a tartóerő is nulla, így nyomóerő hiányában a súrlódás is megszűnik. Papírlapként én mindig WC-papírt szoktam ehhez a kísérlethez használni, mert az nyugalmi helyzetben a perforáció mentén biztosan elszakad. (Ezt a kísérletet a 2012. évi győri fizikatanári ankéton már bemutattam, az erről készült videó a *Videotoriumban* is elérhető^[5]).

Mivel a hidrosztatikai nyomás a folyadék súlyából származik, ezért súlytalanságban nincs hidrosztatikai nyomás. Az ezzel kapcsolatos közismert kísérletet szintén videón néztük meg. A PET palackból a megfestett víz a palack oldalán fűrt lyukon kifolyik. Ha azonban a palackot leejtjük, akkor a súlytalanság miatt a hidrosztatikai nyomás is megszűnik, ezért esés közben nem folyik a víz. A bemutatott *YouTube* videó^[6] lassítva mutatja meg a jelenséget.

A *felületi feszültségből* származó erők általában lényegesen kisebbek, mint a folyadék súlya, így a nyugvó folyadék jellemzően az edény alján helyezkedik el, felveszi az edény alakját, szabad felszíne pedig vízszintes. Súlytalanságban azonban a folyadékot a felületi feszültség gömb alakúra húzza össze. Például a megolvasztott forrasztóon a páka alsó végén gyűlik össze (14. ábra), végül pedig lecseppen.



14. ábra



15. ábra

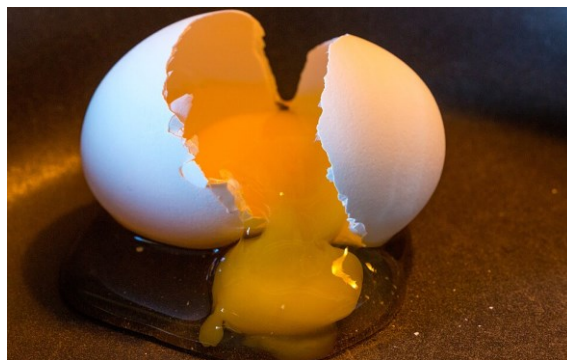
A folyékony forrasztóon esés közben súlytalan, így a felületi feszültség gömb alakúra húzza össze. Ha a leeső öncsepp kb. 1 centiméter magasságból vízbe esik, akkor a vízben a forrasztóon lehül és megszilárdul, így megőrzi gömb alakját (15. ábra). (Nagyobb magasságból leesve a vízbe csapódáskor a gömb alak eltorzul.) A kísérletet a *Sörét forrasztóonból* című *FizKapu* videón^[7] mutattam be. (A 18. század végétől a 20. század közepéig ehhez hasonlóan gyártották a sörétes vadászfegyverekben használt sörétet).

Végül egy önként jelentkező kolléga élhette át a súlytalanságot: feladata az volt, hogy ugorjon le egy székről. Mivel esés közben g gyorsulással mozgott lefelé, így rövid időre súlytalan volt. A kísérlet után a *négyzetes úttörvény* alapján kiszámítottuk, hogy mennyi ideig tartott a kolléga súlytalansága a kb. 0,5 méter magas székről történő leugráskor:

$$s = \frac{g}{2} \cdot t^2 \quad \Rightarrow \quad t = \sqrt{\frac{2 \cdot s}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,5 \text{ m}}{10 \text{ m/s}^2}} = 0,3 \text{ s}$$

Huzamosabb súlytalansághoz nagyobb magasságból kellene leugrani, például 50 méter magasból kb. 3,2 másodperces súlytalanság lenne elérhető. Ez nagyjából megfelel egy 17 szintes épület magasságának ($17 \times 3 \text{ m} = 51 \text{ m}$). A 3,2 másodpercnyi (50 méteres) esés után azonban a sebesség kb. 32 m/s, azaz kb. 115 km/h lesz. Ez azonban még semmiféle károsodást nem okoz, hiszen a test végig súlytalan.

A probléma a talajra érkezéskor jelentkezik, ugyanis ilyenkor a test felfelé gyorsul. Mivel ekkor rövid idő alatt nagy sebességváltozás történik, így nagy lesz a gyorsulás felfelé. A $G = m \cdot (g + a)$ összefüggésnek megfelelően tehát leérkezéskor nagy lesz a test súlya, és ez nagy becsapódási krátert hozhat létre, továbbá ugyanilyen nagy lesz a tartóerő is, ez pedig nagy



16. ábra

deformációkat okozhat a testen (16. ábra). *A súlytalanság nem veszélyes, de a talajra érkezés sérüléseket okozhat!*

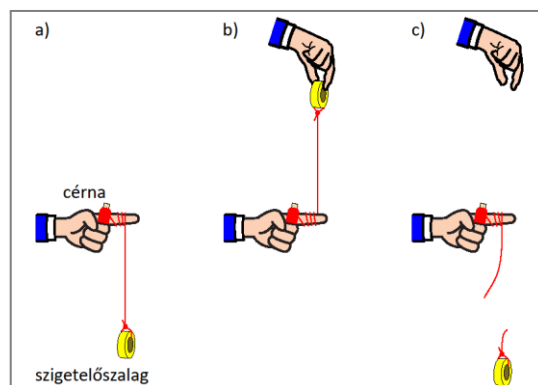
Ezt a tényt három kísérlettel is szemléltettem, az első és a harmadik akár tanulókísérletként is elvégezhető. Az első kísérletben nagyjából 1 m magasról ejtettem le egy gyurmagolyót az asztalra. A tartóerő (és a súly) leérkezéskor lényegesen nagyobb volt, mint a korábban elvégzett (gyurmagolyó a vonalzón) kísérletben, és ennek eredménye jól látszott a gyurma sokkal nagyobb deformációján is.

A második kísérletben egy tojást helyeztem az asztalra, de a tartóerő (és a súly) nyugalomban olyan kicsi, hogy nem okoz deformációt. Ha azonban a tojást kb. fél méter magasságból az asztalra ejtjük, akkor leérkezéskor a tartóerő (és a tojás súlya) lényegesen nagyobb, mint nyugalmi állapotban, ezért a tojás széttörik. (A leejtés előtt a tojást egy átlátszó műanyag zacskóba tettem, és a zacskót bekötöttem. A deformáció így azonnal látszik, mégsem kell utána takarítani.)

A hegymászók és sziklamászók kötéllel biztosítják magukat, illetve egymást a lezuhanás ellen (17. ábra). Ennek modellezésére cérnára függesztettem egy tekercs szigetelőszalagot (hegymászó modell). Rögzítésként a cért néhányszor az egyik kezem mutatóujjára tekertem úgy, hogy a szigetelőszalag csak 10–15 centiméternyi cérnán lógott. A cérna ekkor,



17. ábra



18. ábra

nyugalomban még elbírt a test súlyát. Ha a másik kezemmel a szigetelőszalagot a rögzítési pont fölé emeltem, majd elengedtem, akkor 20–30 centiméternyi esés után, a cérna megfeszülésekor a felfelé gyorsulás miatt megnövekedett súly még mindig kisebb volt, mint a cérna elszakadásához szükséges erő. Ha azonban a szigetelőszalagot ennél hosszabb, kb. 50–60 centiméteres cérnára kötöttem, és így ismételtam meg a kísérletet, akkor a leérkezéskor a cérna elszakadt (18. ábra). A nagyobb esési magasság miatt ugyanis leérkezéskor nagyobb volt a sebesség, így nagyobb volt a felfelé gyorsulás is. Emiatt a súly is lényegesen nagyobb volt, mint kisebb cérnahossz (kötélhossz) esetén. Tanulság: Ha túl hosszú a kötél a kikötési pont és a mászó között, akkor zuhanáskor a mászó túl nagy sebességre gyorsulhat. Amikor végül a kötél megfeszül, a felfelé történő gyorsulás olyan nagy lehet, hogy a mászó súlya nagyobb lesz annál, mint amennyit a kötél elbír, és a biztosítókötél elszakad.

Lényeges, hogy *a test nemcsak a szabadesés közben súlytalan, hanem bármilyen hajítás közben is.* (A hajítás nem szabadesés, mert hajításnál van a testnek kezdősebessége, szabadesésnél viszont nincs.) Ehhez a már megismert macis űrhajómodellt használtam. Egyrészt ferde hajítással eldobtam, majd elkaptam, másrészt az asztal lapjára helyezve meglöktem úgy, hogy az asztalon végigcsúszva vízszintes hajítással a padlóra essen. Mindkét kísérletben a zümmögő elnémult, jelezve, hogy hajítás közben is súlytalan volt a maci (űrhajós). A hajítás közbeni súlytalanságot szemlélteti az a fotó is, amelyen vadvízi evezősök láthatók (19. ábra). Körülöttük a fröccsenő vízcseppek mozgása mindig hajítás. A kinagyított képen (20. ábra) jól látható, hogy hajítás közben a súlytalanság miatt a cseppek gömb alakúak.

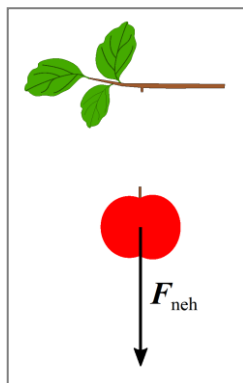


19. ábra

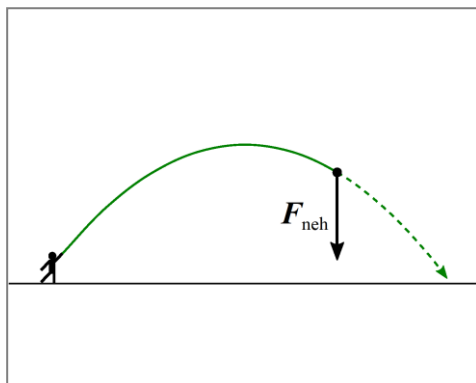


20. ábra

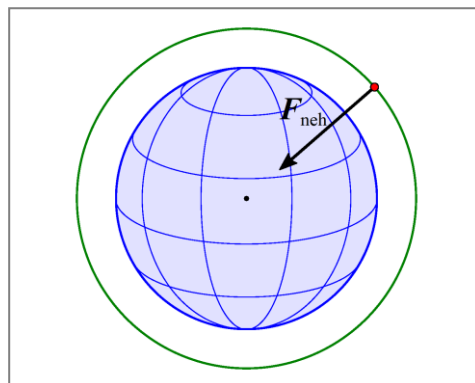
Mindezek alapján megállapítottuk, hogy *ha a testre csak a nehézségi erő hat, akkor a test súlytalan*. Ezt szemléltetik a 21–23. ábrák is.



21. ábra



22. ábra



23. ábra

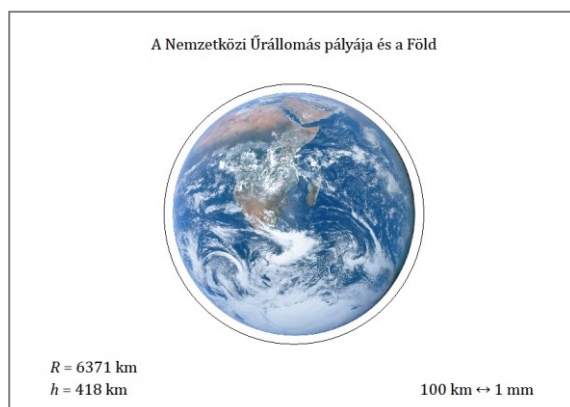
Mikrogravitáció (?)

Az űrhajóban lévő (a külső környezettől elzárt) megfigyelő gyakorlatilag nem érzékeli a gravitációt. (Az elengedett test nem esik le, a meglökött test egyenes vonalú egyenletes mozgást végez.) Az űrhajó belsejében magára hagyott testeknél csak a földfelszíni gravitáció kb. milliomod részének megfelelő gyorsulások mérhetők (az űrhajóhoz viszonyítva). Emiatt a súlytalanság helyett gyakran használt kifejezés a *mikrogravitáció*. Azonban a mikro- a szóösszetételekben a vele összetett fogalom kicsiny voltát jelöli. *A mikrogravitáció kifejezés tehát azt sugallja, hogy az űreszközre, és az abban lévő személyekre, testekre gyakorlatilag nem hat gravitáció.* A Nemzetközi Űrállomás (ISS) azonban „csak” 418 km távolságban*, megközelítőleg körpályán kering a 6371 km sugarú Földtől. Az arányok jól láthatók a méretarányosan megszerkesztett 24. ábrán.

Itt még jelentős a Föld által kifejtett gravitációs erő. Ezt a műhelyfoglalkozáson számításokkal is igazoltuk.

Elsőként felírtuk a Nemzetközi Űrállomás mozgására a dinamika alapegyenletét:

$$m \cdot a = \Sigma F$$



24. ábra

* A magasság 10–20 kilométert változhat, a továbbiakban a cikk írásakor aktuális 418 km értéket használom.

Az m tömegű űrállomás gyorsulása megegyezik a pálya magasságában mérhető g nehézségi gyorsulással, és az űrállomásra csak a gravitációs erő hat, ezért:

$$m \cdot g = \gamma \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

Az egyenlet mindkét oldalát oszthatjuk az űrállomás tömegével, így a kapott összefüggés alapján az űrállomás magasságában mérhető g nehézségi gyorsulás kiszámítható. (A pálya sugara $r = R + h = 6789 \text{ km} = 6\,789\,000 \text{ m}$.)

$$g = \frac{\gamma \cdot M}{r^2} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \cdot 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{(6\,789\,000 \text{ m})^2} = 8,64 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Ehhez az értékhez jutunk akkor is, ha a sebesség ismeretében kiszámítjuk az ISS centripetális gyorsulását. A centripetális gyorsulásra vonatkozó ismert összefüggés szerint:

$$a_{\text{cp}} = \frac{v^2}{r}$$

A Nemzetközi Űrállomás aktuális sebessége és a földfelszíntől mért távolsága például a www.n2yo.com oldalról kérdezhető le. (A cikk írásakor a sebesség $7,66 \text{ km/s}$, a távolság 418 km volt.) Ezeket az adatokat felhasználva:

$$a_{\text{cp}} = \frac{v^2}{r} = \frac{\left(7660 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{6\,789\,000 \text{ m}} = 8,64 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Ez az érték megegyezik az előző számításban kapott értékkel, hiszen a Föld körül (megközelítőleg) körpályán keringő űrállomás centripetális gyorsulása azonos az űrállomás magasságában mérhető g nehézségi gyorsulással. (A centripetális erő pedig azonos a nehézségi erővel.) Ez nagyjából a Föld felszínén mérhető nehézségi gyorsulás 90%-a, tehát *nem tekinthető mikrogravitációnak*.

Természetesen a Földtől távolabb a nehézségi erő (és vele a nehézségi gyorsulás) is kisebb lesz. Emberek eddig a Földtől eltávolodva csupán a Hold közelébe jutottak. Emiatt kiszámítottuk, hogy mekkora a $384\,000 \text{ km}$ távolságban (közelítőleg) körpályán keringő Hold centripetális gyorsulása. Kiindulásként a centripetális gyorsulást most a pálya sugara és a szögsebesség segítségével írtuk fel:

$$a_{\text{cp}} = \omega^2 \cdot r = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot r$$

A Hold keringési ideje $T = 27,32 \text{ nap} \approx 2\,360\,000 \text{ s}$, így

$$a_{\text{cp}} = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot r = \left(\frac{2\pi}{2\,360\,000 \text{ s}}\right)^2 \cdot 384\,000\,000 \text{ m} = 0,0027 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

A Hold centripetális gyorsulását a földi gravitáció okozza, a centripetális gyorsulás tehát azonos a Hold pályája mentén mérhető g nehézségi gyorsulással. Ez a gyorsulás így kiszámítható a már látott módon, a dinamika alapegyenlete alapján is:

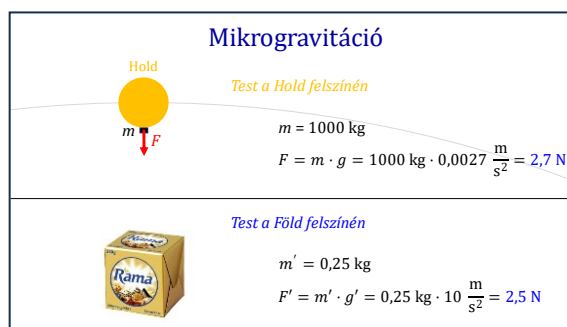
$$m \cdot a = \Sigma F$$

$$m \cdot g = \gamma \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

$$g = \frac{\gamma \cdot M}{r^2} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \cdot 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{(384\,000\,000 \text{ m})^2} = 0,0027 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Ez természetesen megegyezik az előző számításban kapott értékkel.

Ennek a nehézségi gyorsulásnak az érzékeltetésére kiszámítottuk, hogy mekkora nehézségi erővel hat a Föld(!) a Hold felszínén elhelyezkedő 1000 kg tömegű* testre (25. ábra). Az előzőekben kiszámított nehézségi gyorsulás alapján a keresett erő $F = 2,7 \text{ N}$. Ez az erő nagyjából ugyanakkora, mint egy csomag margarinra a Földön ható nehézségi erő, azaz $F' = 2,5 \text{ N}$. Ennek alapján megállapíthatjuk, hogy a földi gravitáció még ilyen távolságban (a Holdnál) is jól érzékelhető.



25. ábra

Mindezek miatt *nem tartom célszerűnek a mikrogravitáció kifejezés használatát*, helyette nyugodtan *használjuk a súlytalanság fogalmát!*

- Összhangban van a nehézségi erő és a súly fogalmával.
- Fizikai szempontból pontos, nem félrevezető.
- Magyar kifejezés.

A felfelé ható súly (?)

A műhelyfoglalkozás (időhiány miatt tervezetten) itt véget ért, de a *PowerPoint* bemutató [\[3\]](#) még folytatódik, és végül sikerült ezt a részt is mindkét műhelyfoglalkozáson megtárgyalni.

* Nagyságrendileg ekkora volt az első holdjármű, a szovjet *Lunahod-1*, illetve az amerikai Apolló program űrhajósai által használt *Lunar Rover* holdautók teljes tömege.

A függőlegesen lefelé gyorsuló testek súlyának vizsgálatakor csak az $a \leq g$ eseteket vizsgáltuk, az $a > g$ elemzése kimaradt. A test csak akkor mozoghat g -nél nagyobb gyorsulással lefelé, ha a nehézségi erővel együtt még egy F_t erő gyorsítja ebbe az irányba (26. ábra). A dinamika alapegyenlete alapján:

$$m \cdot a = m \cdot g + F_t$$

$$F_t = m \cdot a - m \cdot g$$

$$F_t = m \cdot (a - g)$$

A hatás–ellenhatás törvénye miatt a test G súlya ugyanekkora, azaz:

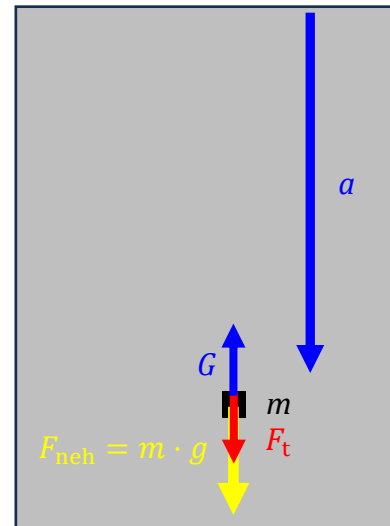
$$G = m \cdot (a - g)$$

A súly azonban a hatás–ellenhatás törvénye szerint az F_t erővel ellentétes irányú, tehát *ebben az esetben a súly felfelé hat*. (Kérdés, hogy lehet-e ezt az erőt még súlynak nevezni? Erre még visszatérünk.) Ezt a meglepő tényt két kísérlettel és egy videóval szemléltettem.

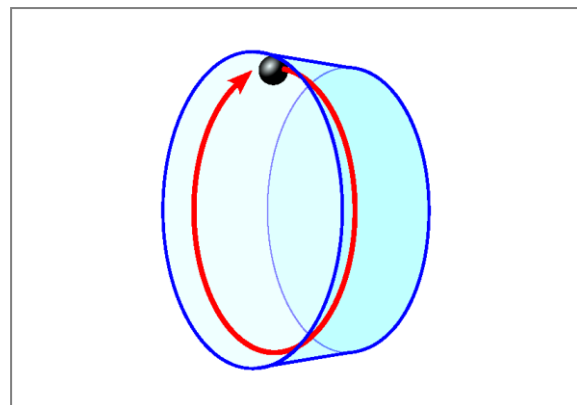
Egy pingponglabdát ejtettem az asztalra, majd az asztallapról visszapattanó labdát ismét az asztallap felé ütöttem a tenyeremmel. A labda leütésekor tehát a nehézségi erő is és a tenyerem is lefelé gyorsította a pingponglabdát, így gyorsulása nagyobb volt, mint g . A tenyerem lefelé nyomta a labdát, a lefelé gyorsuló labda által kifejtett erő viszont felfelé nyomta a tenyeremet, tehát a labda súlya felfelé, a tenyeremre hatott.

A második kísérlet egy egyszerűen megvalósítható ördöghurok volt. Egy kb. 15 cm átmérőjű kerek, műanyag ételdobozba elhelyeztem egy kb. 1 cm átmérőjű acélgolyót, és a fedelével lezártam a dobozt. A dobozt kézben tartva úgy fordítottam, hogy az alaplapja függőleges lett. Ebben a helyzetben az ételdobozt egy függőleges síkban körkörösén úgy mozgattam, hogy a golyó függőleges síkban körmozgásba jött.

Kellő fordulatszámnál a kézzel történő mozgatóást megállítottam, de a tehetetlenség miatt a golyó a nyugvó ételdobozban továbbra is körpályán mozgott (27. ábra). A körpálya felső pontján a golyót a nehézségi erő és az ételdoboz palástja által kifejtett erő nyomta a körpálya középpontja felé. A golyó viszont ebben a helyzetben a doboz palástját nyomta felfelé, tehát a golyó súlya itt is felfelé hatott.

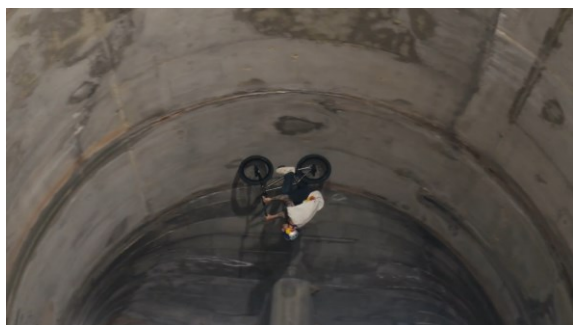


26. ábra

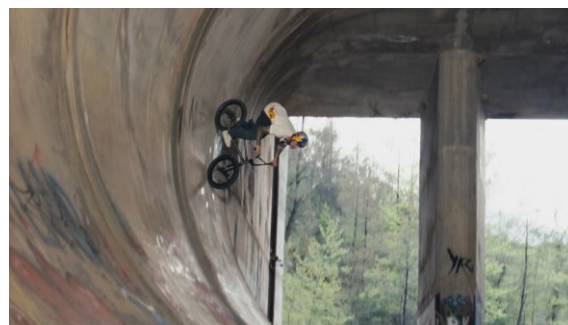


27. ábra

Végezetül egy olyan ördöghurokról készült YouTube videót^[8] mutattam be, melyen egy kerékpáros tett meg egy függőleges kört egy alagút(?) belső hengerpalástján. A hurok felső pontján leállítva a videót megbeszéltük, hogy a kerékpár által a palástra kifejtett erő (súly?) itt is felfelé hat, míg a nehézségi erő és a palást által kifejtett erő a kör középpontja felé gyorsítja a kerékpárost (28. ábra).



28. ábra



29. ábra

A videót olyan pillanatban is leállítottam, melynél a kerékpáros az alagút palástján éppen függőlegesen lefelé haladt (29. ábra). Belátható, hogy ebben a pontban a nehézségi erő függőlegesen lefelé gyorsítja a kerékpárost (érintő irányú erő – növeli a sebesség nagyságát). Az alagút palástja pedig vízszintesen a körpálya középpontja felé nyomja a kerékpárt (centripetális erő). A hatás–ellenhatás törvénye miatt viszont a kerékpár vízszintesen kifelé nyomja az alagút falát (vízszintes súly?).

A fentiek azt jelzik, hogy *a súly fogalma is csak korlátok között használható*. Korlátot jelent például az, hogy a súlyt a pontszerű testekkel kapcsolatban definiáltuk. Kiterjedt testeknél viszont a súly nem egy pontban hat, például egy négy lábú asztal négy helyen nyomja az alátámasztást. Mit értsünk súlyon, ha egy pontszerű test súrlódás nélkül csúszik egy lejtőn, illetve mit értsünk súlyon, ha a tapadási súrlódás miatt nyugalomban van a lejtőn? Mindez ugyan elsőre szokatlan lehet, de *sok más fizikai fogalom is csak korlátok közt alkalmazható*. Például a fénysugár (nagyon keskeny fénynyaláb) fogalma a geometriai optika keretein belül jól használható, de a fényelhajlás, a fénypolarizáció és az atomi fénykibocsátás–fényelnyelés leírására már nem megfelelő.

Bár a műhelyen csak érintőlegesen került szóba, de érdemes megjegyezni, hogy *a súly és súlytalanság fogalmát Magyarországon kívül általában másképpen értelmezik*. A leggyakrabban súlynak nevezik a testre ható nehézségi erőt, és a nálunk használt súly fogalmát nem használják. Korábban nálunk is általános volt ez a szóhasználat, még klasszikus egyetemi tankönyvben^[9] is. A jelenlegi magyarországi szóhasználat kialakítását *Párkányi László*, az ELTE kísérleti fizika tanszékének docense, a fizika-módszertani csoport vezetője

kezdeményezte az 1966-os fizikatanári ankétot. Azt javasolta, hogy az akkoriban használt négyféle definíció közül a magyarországi fizikatanárok a ma is használt változatot alkalmazzák. Párkányi László *Súly és súlytalanság* című, a *Fizikai Szemle* 1967/2. számában megjelent írása itt^[10] érhető el. További információ erről kérdéskörrel a *Netfizika* című weblapon itt^[11] található. Sajnos külföldön a súlynak és súlytalanságnak ez az értelmezése –minden előnye ellenére– végül nem terjedt el.

Kapcsolódó internetes anyagok

- [1] <https://www.fizkapu.hu> – a *FizKapu* honlap
- [2] <https://www.fizikakonyv.hu> – a *Fizikakönyv* honlap
- [3] https://www.fizkapu.hu/fiztan/toltes/t_0057.html – a műhely letölthető anyagai
- [4] https://www.youtube.com/shorts/qBAdyNVEi_c?feature=share – *YouTube* videó a súlytalanság súrlódásra gyakorolt hatásáról. (Test csúszása deszkalapon.)
- [5] <https://sze-gyor.videotorium.hu/hu/recordings/6082/sulytalansag> – *Videotórium* videó a súlytalanság súrlódásra gyakorolt hatásáról. (Papírlap kihúzása könyvek alól.)
- [6] <https://www.youtube.com/shorts/uIRDm2AsuIY?feature=share> – *YouTube* videó a súlytalanság hidrosztatikai nyomásra gyakorolt hatásáról. (Palackból kifolyó víz.)
- [7] https://www.youtube.com/watch?v=CSBZQoT_xAA&t=5s – *YouTube* videó a súlytalanság felületi feszültségre gyakorolt hatásáról. (Sörét forrasztóónból.)
- [8] <https://www.youtube.com/watch?v=Ntav2u0lQAs&t=82s> – *YouTube* videó kerékpáros ördöghurokról.
- [9] <http://hdl.handle.net/10890/57504> – Budó Ágoston: *Kísérleti fizika I.*, 60. oldal, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1997.
- [10] https://real-j.mtak.hu/7095/1/FizikaiSzemle_1967.pdf – Párkányi László: *Súly és súlytalanság*, *Fizikai Szemle* 1967/2. szám, 50–59. oldal.
- [11] <https://www.netfizika.hu/tudas/node/855> – Vass Miklós: *Súlyos kérdőjelek a súly körül*, netfizika.hu

Képek forrása

1. ábra	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Falling_apple_crop.jpg + saját rajz
2. ábra	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beautiful_red_apple.jpg + saját rajz
3. ábra	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beautiful_red_apple.jpg + saját rajz
4. ábra	https://www.fizkapu.hu/fizfoto/fotok/fizf0029.jpg + saját rajz
5. ábra	https://www.fizkapu.hu/fizfoto/fotok/fizf0030.jpg + saját rajz
6. ábra	https://www.fizkapu.hu/fizfoto/fotok/fizf0031.jpg + saját rajz
7. ábra	saját rajz a kapcsolódó <i>PowerPoint</i> bemutatóból
8. ábra	saját rajz a kapcsolódó <i>PowerPoint</i> bemutatóból
9. ábra	saját rajz a kapcsolódó <i>PowerPoint</i> bemutatóból
10. ábra	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Galileo_Galilei_2.jpg
11. ábra	https://www.fizkapu.hu/fiztan/toltes/t_0057/t0057_03.pdf
12. ábra	https://www.fizkapu.hu/fiztan/toltes/t_0057/t0057_04.jpg
13. ábra	https://www.fizkapu.hu/fiztan/toltes/t_0057/t0057_05.jpg
14. ábra	https://www.fizkapu.hu/fiztan/toltes/t_0057/t0057_06.png (képkocka a videóból)
15. ábra	https://www.fizkapu.hu/fiztan/toltes/t_0057/t0057_07.png (képkocka a videóból)
16. ábra	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Day_017_-_Photo365_-_Eggs_(16299675421).jpg
17. ábra	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rock_Climbing_Bottom_Roping_Session.jpg
18. ábra	https://www.fizkapu.hu/fiztan/toltes/t_0057/t0057_08.pdf
19. ábra	https://www.fizkapu.hu/fizfoto/fotok/fizf0430.jpg
20. ábra	https://www.fizkapu.hu/fizfoto/fotok/fizf0430.jpg – részlet
21. ábra	https://www.fizikakonyv.hu/rajzok/0116.svg
22. ábra	https://www.fizikakonyv.hu/rajzok/0117.svg
23. ábra	https://www.fizikakonyv.hu/rajzok/0118.svg
24. ábra	https://www.fizkapu.hu/fiztan/toltes/t_0057/t0057_09.pdf
25. ábra	saját rajz a kapcsolódó <i>PowerPoint</i> bemutatóból
26. ábra	saját rajz a kapcsolódó <i>PowerPoint</i> bemutatóból
27. ábra	https://www.fizkapu.hu/fiztan/toltes/t_0057/t0057_10.pdf
28. ábra	https://www.fizkapu.hu/fiztan/toltes/t_0057/t0057_11.jpg (képkocka a videóból)
29. ábra	https://www.fizkapu.hu/fiztan/toltes/t_0057/t0057_12.jpg (képkocka a videóból)