

A dinamika születése

A három Newton-axióma

CSORBA F. LÁSZLÓ – BOTH MÁRIA

Isaac Newton (1642-1727) angol fizikus, matematikus. Majdnem pontosan egy évvel Galilei halála született, s munkássága is sok szempontból olyan, mintha azt folytatná, amit Galilei abbahagyott. A Cambridge-i Egyetemen matematikát tanult, majd 1665-ben a nagy angliai pestisjárvány elől vidéki birtokára, Woolsthorpe-ba vonult vissza. Itt fogalmazta meg későbbi nagy munkáinak első változatait. Cambridge-be visszatérve, mint professzor jelentette meg első nagyszerű művét, az Optikát. 1684-ben a csillagász Halley unszolására és segítségével kiadja a Természetfilozófia matematikai alapjai (Principia) című könyvét, amely a kor fizikájának és csillagászatának nagyszabású és matematikailag egységes összefoglalása. 1692-ben, talán a feszített munka hatására, súlyos idegösszeomlást kapott, amiből felépült ugyan, de a hátralévő 35 évben már nem volt jelentős felfedezése. 1703-tól haláláig mint a Királyi Társaság (Royal Society) elnöke, a tudományos és társadalmi élet megbecsült tagjaként élt.

A dinamika

A görög *dünamisz* szó erőt, képességet jelent, s már *Arisztotelész* szóhasználatában a változások (egyik) okát, eredetét jelölte. A kinetika nem az okok kutatását, hanem a jelenségek pontos leírását tartotta feladatának. A 17-18. században kibontakozó dinamika bizonyos szempontból visszatért Arisztotelész alapproblémájához: arra vállalkozott, hogy a kinetika által leírt mozgások okait is megkeresse. Az okot erőnek nevezték (forst, lat., force ang., rövidítve: F), és már mennyiségileg is jellemezni tudták. Ez az erőfogalom azonban alapvetően különbözik Arisztotelészétől. Arisztotelész fizikájában a mozgás folyamat, melynek létrehozásához szükséges az erő. A 17. század dinamikájában a mozgás állapot, melynek megváltoztatásához szükséges az erő. E kor nagy tudósai: *Descartes*, *Huyghens*, *Hooke*, *Leibniz* és Newton gyakran párhuzamosan, fej fej mellett haladva dolgoztak, s mindegyikük nagyszerű részeredményekkel dicsekedhet. Newton volt azonban az, aki a dinamika csaknem minden problémáját átfogó és megoldó elméletet alkotott, így joggal vált közülük a leghíresebbé.

A tehetetlenség. Newton I. axiómája

A tehetetlenség elvét Galilei fogalmazta meg, de Newton általánosította. Galilei a földfelszín egy-egy viszonylag kicsiny vízszintes síkjáról írt, amelyek azonban összességükben gömbfelületet adnak. Rendszerében tehát fontos szerepe volt a Föld középpontjának. Newton elszakad ettől a megkötéstől is. Megfogalmazása szerint minden test megtartja egyenes vonalú egyenletes mozgását vagy nyugalmi állapotát mindaddig, ameddig valamely erőhatás ezt meg nem változtatja. (Newton I. axiómája) Newton tehát elvonatkoztat a Földtől, mint viszonyítási ponttól, hiszen ez a törvény akkor is érvényes maradna, ha a Föld hirtelen megszűnne létezni. Fölmerül azonban a kérdés, hogy ez esetben mihez képest beszélhetünk nyugalomról vagy egyenes vonalú egyenletes mozgásról? A Szentpétervár és Moszkva közti csaknem nyílegyenes vasútvonalon haladók például nagyon

A PSzM Projekt támogatásával fog megjelenni a szerzők Tudománytörténet I. című műve. Ebből közlünk részletet.

is kacifántos görbe pályát írnak le, ha egy Földön kívüli pontból (például a Holdról) szemléljük őket.

Newton úgy oldja meg a problémát, hogy bevezeti az abszolút tér és az abszolút idő fogalmát. „Az abszolút, valóságos és matematikai idő önmagában véve, lényegének megfelelően, minden külső vonatkozás nélkül múlik. (...) Az abszolút tér, saját lényegénél fogva, külsőleg egyáltalán semmihez sem viszonyítva mindenkor egyenlő és változatlan marad.” (Principia) Newton tehát azt javasolja, hogy a Föld vagy bármely más égitest helyett válasszuk viszonyítási rendszernek azt a végtelen és nyugalomban levő teret, amelyben a mozgások lezajlanak. Ezt inerciarendszernek is szokás nevezni. Szigorúan véve csak ebben az inerciarendszerben érvényes Newton I. axiómája. Hol van ez a rendszer? Létezik-e? Olyan kérdések, amelyek már inkább a filozófia, mint a fizika területére tartoznak. Bizonyos, hogy semmilyen gyorsuló rendszer nem lehet az, hiszen azokban nem érvényes az I. axióma (Sőt: éppen arról vesszük észre a gyorsulást, hogy nem érvényes!) A gyakorlatban általában megfelelő, ha a földi mozgások leírásakor a föld felszínét, a bolygómozgások leírásakor pedig a Napot tekintjük mozdulatlanak, inerciarendszernek.

Tömeg és erő (Newton II. axiómája)

A földön heverő malomkerék és kavics egyaránt, de nem azonos mértékben tehetetlen: mindegyik „igyekszik megőrizni” mozgásállapotát (jelen esetben nyugalomát), a kavicsot azonban sokkal könnyebb elmozdítani. A tehetetlenségnek tehát mértéke van, amit Newton javaslatára tömegnek neveznek, és m -mel jelölnék. Mértékegysége a kilogramm (kg), és ezredrésze, a gramm (g). $1kg$ annak a testnek a tömege, amely ugyanolyan tehetetlenségű, mint $1dm^3$ $4C$ -os víz. A test mozgásállapotát két adat jellemzi: a test tömege és sebessége. E kettő szorzatát impulzusnak, vagy kifejező magyar szóval lendületnek is szokás nevezni.

$$I = mv$$

$$F = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t}$$

Erő ahhoz szükséges, hogy a testek mozgásállapota (lendülete) megváltozzon.

Elképzelhető-e, hogy egy test tömege megváltozzon (anélkül, hogy valamit hozzáadnánk, vagy elvonnánk belőle)? Newton, igen óvatosan, nem zárja ki ezt a lehetőséget, noha a hétköznapi tapasztalatok világában erre nemigen látunk példát. Csak a 20. század fizikája tudta kimutatni, hogy igen nagy sebességek esetén a tömeg valóban megnő (Lásd *Einstein*). Az esetek túlnyomó többségében azonban nyugodtan eltekinthetünk ettől a hatástól, azaz a tömeget a sebességtől függetlennek, állandónak vehetjük. Ez esetben az erő csak ahhoz szükséges, hogy a testet gyorsítsa (illetve lassítsa). Az erő tehát az időegység alatti sebességváltozással, vagyis a gyorsulással arányos, és az arányossági tényező éppen a test tömege.

$$F = \frac{m\Delta v}{\Delta t}, \text{ és mivel } \frac{\Delta v}{\Delta t} = a, \text{ ezért } F = ma$$

Ez Newton II. axiómája.

A képletből adódik az erő mértékegysége is: $1kgm/s^2$, amit Newton iránti tiszteletből 1 newtonnak neveztek el. Rövidítése: 1N.

Az erőket gyorsító hatásuk alapján mérni legtöbb esetben elég nehézkes és pontatlan. Ha azonban valamely rugalmas testre (rugóra) engedjük hatni a mérendő erőt, úgy az erőhatás nagyságával arányos megnyúlást idéz elő. (Legalábbis bizonyos határok között). Ha a megnyúlás mértékét egy hitelesített skálán mérni is tudjuk: rugós erőmérőt (dinamométert) kapunk. Ezt a lehetőséget Newton kortársa, *Robert Hooke* ismerte föl.

Gravitáció és súly. Tömegmérés

A légüres térben eső test g nehézségi gyorsulással mozog, tehát, a II. axióma szerint az m tömegű testre függőlegesen lefelé irányuló mg nagyságú erő hat. Ez a gravitációs erő.

Ha a testet fölfüggesztjük vagy alátámasztjuk, akkor ezzel megakadályozzuk az esését. Ilyenkor erőt fejt ki az alátámasztási vagy felfüggesztési pontra („húzza” vagy „nyomja” azt), amit a mindennapi életben a test súlyának neveznek. Jele G (gravitas = súlyosság, lat.), mértékegysége szintén a N . Ezért a súly, miként minden más erő, mérhető rugós erőmérővel is.

Mi a kapcsolat a gravitációs erő és a súly között? A tapasztalat azt mutatta, hogy ugyanazon test súlya kismértékben ugyan, de egyértelműen eltérő aszerint, hogy hol mérjük. Magashegységekben és az Egyenlítő közelében alacsonyabb értéket mértek, mint a tengerszinten és a Sarkok vidékén. Ez csak úgy lehetséges, ha a gravitációs gyorsulás (g) értéke helytől függő. De erősen befolyásolja a súly nagyságát a közeg felhajtóereje is, Arkhimédész törvényének megfelelően. A jelenség arra figyelmeztet, hogy a súly nem csupán az adott testet, hanem a testnek és környezetének a kölcsönhatását jellemzi. Érvényes viszont Galilei azon megállapítása, hogy a Föld egy adott pontján minden test gyorsulása azonos. Ez teszi lehetővé a tömegek pontos mérését: a mérleg segítségével. Már Arkhimédész megállapította, hogy a mérleg két karja akkor van egyensúlyban, ha a forgástengelytől azonos távolságra függesztett két test súlya egyenlő.

$$m_1g = m_2g$$

Mivel pedig g egyenlő, a tömegek is azok. A tömegmérés a Föld vagy akár a világűr bármely pontján azonos eredményre vezet, a testek tömege rájuk jellemző állandó.

Példa. Mennyit nyom egy 80 kg-os sarkkutató az Északi sarkon és az Egyenlítőn? A g értéke a Sarkokon $9,83\text{m/s}^2$, az Egyenlítőn pedig $9,78\text{m/s}^2$.

Válasz: mérlegeléssel nem mutatható ki különbség, hiszen a mérősúlyok is arányosan könnyebbek illetve nehezebbek lettek. Rugós erőmérővel azonban más eredményt kapunk.

A Sarkon:

$$G_{\text{Sark}} = mg_{\text{Sark}} = 80\text{kg} \times 9,83\text{m/s}^2 = 786,4\text{N}$$

Az Egyenlítőn:

$$G_{\text{Egy}} = mg_{\text{Egy}} = 80\text{kg} \times 9,78\text{m/s}^2 = 782,4\text{N}$$

A súlytalanság

Ha a felfüggesztési vagy az alátámasztási pont ugyanazzal a sebességgel mozog, mint a vizsgált test, akkor természetesen nem fogják „nyomni egymást”. Ez a súlytalanság állapota. Előáll minden szabadon eső testben. Például egy zuhanó lift belsejében egy cérnaszál tetszőleges tömegű testet elbír, hiszen azonos gyorsulással mozognak.

A kölcsönösség (Newton III. axiómája)

Arra a kérdésre, hogy egy testre mi módon hathat egyáltalán valamiféle erő, a leg-egyszerűbb válasz az, hogy közvetlen érintkezés útján, ütközés során. (Ütközésről általában akkor beszélünk, ha az erőhatás pillanatszerű.) Mi történik például, ha két azonos tömegű és sebességű ágyúgolyó szembetalálkozik? Egy pillanatra mindkét golyó szerkezete eltorzul, miközben sebességük nullára csökken. A továbbiakban két szélső eset közti mindenféle átmenet elképzelhető. Az egyik szélsőség a tökéletesen rugalmas ütközés. Ekkor mindkét ágyúgolyó visszapattan, azaz az eredetivel azonos nagyságú, de ellentétes irányú sebességgel folytatja útját. A másik szélsőség a tökéletesen rugalmatlan ütközés. Ennek során az ütközés erejét teljes egészében fölemészti a golyók szerkezetének átrendeződése: a két test tehát megáll és lezuhan. Bármelyik esetben igaz azonban, hogy a két ágyúgolyó lendületváltozása azonos volt, azaz amekkora erővel hatott az A golyó a B-re, ugyanakkorával hatott a B az A-ra. A gondolatmenet általánosítható különböző tömegű és sebességű golyókra vagy másféle testekre is. Newton III. törvénye szerint

minden hatással együtt egyenlő nagyságú és ellentétes irányú ellenhatás is fellép, tehát minden hatás: kölcsönhatás.

Példa. Egy ember 20kg tömegű vödört húz fel a kútból. Milyen erővel húzza őt a vödör? Newton III. törvénye értelmében ugyanannyival, mint ő a vödört.

$$F=ma, \text{ itt } F=mg=20\text{kg} \times 10\text{m/s}^2=200\text{N}$$

A mindennapi életben persze azt mondjuk, hogy „az ember vizet húz fel a kútból”, s nem azt, hogy a „víz embert húz le a kútba”. Ez azért van így, mert a hétköznapiok nyelve azt a testet tekinti a mozgás okának (az arisztotelészi ható oknak), amelyik a kölcsönhatás során kevésbé változik, többé-kevésbé mozdulatlan marad. Jelen példában az ember a Földön áll, arra nehezedik, s így a kölcsönhatás során a Föld középpontja is elmozdul kissé. Ez azonban a tömegkülönbség miatt észrevehetően kicsi a vödör mozgásához képest.

„Valódi” és „látszólagos” erők

Newton III. axiómája szerint minden hatás: kölcsönhatás, minden erővel együtt megjelenik egy vele ellentétes irányú, de azonos nagyságú ellenerő is. Néha azonban úgy látszik, mintha ez nem volna igaz. A hirtelen elinduló kocsiban hátraeső utas például úgy érzi, hogy valamilyen erő hatott rá. Hogy ez nem csak képzelődés, mutatják a körülötte megmozduló tárgyak is: a szék megbillen, a víz kilöttyen a pohárból, s általában mindaz megtörténik, ami a Galilei által leírt képzeletbeli hajó gyomrában nem volna észlelhető. E jelenségek létrehozásában azonban nagy szerepe van a súrlódásnak. Az utas kapaszkodik és lábával a padlóhoz tapad, miként a szék is, s a pohár elcsúszását is gátolja az asztal felülete. Kapcsoljuk ki a súrlódási erőket oly módon, hogy a személyt és az összes tárgyat egy végtelenül síkos jégpályára helyezzük! Ha sikerülne előállítani e sajátos kísérleti helyzetet, a vizsgálódó személy semmilyen változást nem tapasztalna és semmilyen erőt nem érezne, csak azt látná, hogy a kabin fala hozzá képest gyorsulva mozog. (Mikor a hátsó falhoz ér, persze érez majd ütést, de tegyük fel, hogy hosszú, esetleg végtelen hosszú ez a kabin...)

Ha mozgásunkat – mint ez szokásos – környezetünkhöz viszonyítjuk, akkor *saját* gyorsulásunkat érzékeljük, anélkül, hogy valamilyen erő hatott volna ránk. Ilyenkor szokás „látszólagos” (virtuális) erőkről beszélni, szemben a valódi erőkkel, amelyek úgy gyorsítanak, hogy kölcsönhatásba lépnek velünk. E látszólagos erők csak gyorsuló környezetben (koordinátarendszerben) léphetnek fel, s okuk valójában a testek tehetetlensége. Ebből következik, hogy inerciarendszerben nem léphetnek fel látszólagos erők sem.

Leggyakrabban használt „látszólagos erő”-fogalom a „centrifugális erő”, a földrajzban pedig a „Coriolis-hatás”. Mindkettő félreértések forrása, amennyiben gyakran valóságos erőknek vélik őket.

Summa

A dinamika a mozgások okait, az erőket vizsgálja. Fogalmait és alaptörvényeit Newton foglalta egységes rendszerbe. Tehetlenség: inerciarendszerben a testek megőrzik eredeti lendületüket, mindaddig, amíg valamely erő nem hat rájuk.

Inerciarendszer: az abszolút nyugalom perspektívája, a matematikai tér, amelyben érvényes az I. axióma.

Lendület (impulzus): a test tömegének és sebességének szorzata.

Tömeg: a tehetetlenség mértéke. (kg,g).

Erő: olyan hatás, ami lendületváltozást eredményez. Ha a tömeg állandó, nagysága az általa létrehozott gyorsulással arányos. (1N=1kgm/s²). (II. axióma)

Látszólagos erő: a mozgásváltozás oka valamely gyorsuló rendszerből szemlélve.

Kölcsönösség: minden erő egy vele azonos nagyságú, de ellentétes irányú erőt ébreszt, minden hatás: kölcsönhatás. (III. axióma)