

## TEŽINA I SILA TEŽA – TEŠKOĆE SA ZNAČENJIMA I DEFINICIJAMA

Vjera Lopac

Zavod za fiziku, Fakultet kemijskog inženjerstva  
i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu  
vlopac@fkit.hr

Primljeno: 18. 12. 2012.

*Fizičari, filozofi i edukacijski stručnjaci još uvijek nisu suglasni o značenju i definiciji naziva težina. Većina fizičara prihvaća teorijsku (konceptualnu) definiciju prema kojoj je težina umnožak mase i lokalnog ubrzanja slobodnoga pada, u skladu s definicijom težine u međunarodnoj normi ISO 80000-4. Ta definicija vodi računa o položaju motritelja i uzima u obzir inercijske sile u ubrzanim sustavima. Na površini Zemlje lokalno je ubrzanje vektorski zbroj gravitacijskog i centrifugalnog ubrzanja. Ista definicija objašnjava i pojam bestežinskoga stanja tijela koje slobodno pada ili se giba u orbiti. Neki autori zagovaraju operacijsku definiciju težine koja vodi računa isključivo o rezultatu mjerenja sile opružnom vagom. U članku se analizira pristup težini u nastavi fizike i naglašava se potreba da se operacijska definicija težine zamijeni međunarodno dogovorenom definicijom.*

**Ključne riječi:** težina, sila teža, teorijska definicija, operacijska definicija, bestežinsko stanje, ubrznani sustav, inercijske sile, lokalno ubrzanje slobodnoga pada, sila teretnica

### 1. Pojam težine u znanosti, tehničarima i svakodnevnom govoru

Kada se neka riječ u fizici prihvati kao stručni naziv, njezino se značenje može razlikovati od značenja koje ima u svakodnevnom govoru. Posebno mjesto među takvim riječima pripada nazivu *težina*, koji čak i u običnom govoru ima dva značenja. U brojnim se primjerima težina dovodi u izravnu vezu s masom tijela, dok se u drugima doživljava kao sila kojom neki predmet pritiskuje podlogu. Pojavljuje se i

s drugim naznakama (tjelesna težina, težina zadatka, osjećaj težine i slično). O značenju naziva *težina* još se uvijek raspravlja među fizičarima, metodičarima i filozofima, a istraživanja pokazuju da je veoma teško dobiti zadovoljavajući jednoznačan odgovor koji bi bio usklađen sa stvarnim činjenicama i dogovorima a ujedno prikladan za nastavu na osnovnoškolskoj, srednjoškolskoj i sveučilišnoj razini (Iona, 1975 i 1999; Leong i Chin, 2009).

Nesporazumi pri definiciji težine prelaze granice struka, ali i jezika. Navodimo hrvatske nazive i iza njih u zagradi redom prijevode na engleski, francuski, njemački i ruski jezik: *težina* (weight, poids, Gewicht, вес); *sila teža* (gravity, pesanteur, Gewichtskraft, сила тяжести); *vaga* (balance – weighing scale, balance, Waage, весы – баланс); *opružna vaga* (spring balance, balance à ressort, Federwaage, пружинные весы); *polužna vaga* (beam balance, balance à fléau, Balkenwaage, рычажные весы); *vagati* (weigh, peser, wiegen, весить – взвешивать); *vaganje* (weighing, pesage, Wiegen, взвешивание); *masa* (mass, masse, Masse, масса); *uteg* (weight, poids, Gewicht, гиря); *lokalno ubrzanje slobodnoga pada* (local acceleration of free fall, accélération locale de la chute libre, lokale Fallbeschleunigung, местное ускорение свободного падения). Definicije naziva kojima se služi fizika mogu se naći u bazi podataka projekta STRUNA (STRUkovno NAzivlje) (Lopac i Nahod, 2013), na mrežnoj stranici <http://struna.ihjj.hr>. Valja napomenuti da u engleskom i francuskom jeziku izraz *sila teža* opisuje pojavu gravitacijskoga privlačenja. Istodobno, u ruskom i njemačkom *sila teža* može označavati i veličinu koja se drugdje naziva težinom, a ta se praksa ponegdje održala i u hrvatskim tekstovima (Paar, 2009, 26).

## 2. Međunarodni dogovori o veličinama i jedinicama u fizici

Kako je naziv *težina* nemoguće potpuno izbaciti iz upotrebe, njegovo bi značenje i definiciju valjalo odrediti međunarodnim dogovorom koji će biti opće prihvaćen za upotrebu u znanosti i nastavi. Mehanizam za takvo dogovaranje postoji još od 1867. godine, kada se kao posebna znanost počelo razvijati mjeriteljstvo ili metrologija. Na Međunarodnom geodetskom kongresu u Berlinu te je godine potaknuto pitanje stvaranja jedinstvenoga sustava utega i mjera u Europi. Godine 1870. osnovan je Međunarodni ured za utege i mjere (International Bu-

reau of Weights and Measures, Bureau international des poids et mesures, BIPM) odgovoran Općoj konferenciji za utege i mjere (General Conference on Weights and Measures, Conférence générale des poids et mesures, CGPM) sa sjedištem u Parizu. Krajem godine 2012. ured BIPMa imao je 54 države stalne članice (među njima je i Hrvatska) i 37 pridruženih članica.

Prauzorak kilograma kao jedinice za masu, valjak visine i promjera 39 mm načinjen od 90% platine i 10% iridija, uveden je godine 1889. Isti prauzorak vrijedi još i danas, a njegova zamjena suvremenijom definicijom kilograma ne očekuje se prije 2015. Ubrzano se razvijaju nove mjerne metode, među kojima se ističu one utemeljene na preciznom određivanju dviju prirodnih konstanta, Avogadrove i Planckove (Davis, 2012).

Ubrzo poslije 1900. došlo je do novih otkrića i izuma. U fizici su objavljene specijalna i opća teorija relativnosti, a u tehnici su sagrađeni visoki neboderi s dizalima, stvoreni su zrakoplovi i rakete. Nakon 1960. lansirani su sateliti, svemirski brodovi i svemirske stanice s ljudskom posadom. Sada je moguće ne samo zamišljati već i dugotrajno promatrati gibanje tijela u slobodnom padu – padanje tijela zajedno s dizalom, lebdjenje u orbiti ili uzlet zrakoplovom do granica Zemljine atmosfere po približno paraboličnoj stazi (Dempsey i sur., 2007). Motritelj više nije nužno na Zemlji, a u svakodnevni se rječnik ubacuje pojam *bestežinskoga stanja*. Vodeći računa o tome proširenju, uvodi se usklađena sveobuhvatna definicija težine, iskazana najprije u međunarodnoj normi ISO 31 (1992), a potom i dotjerana u najnovijoj međunarodnoj normi ISO 80000-4 (2006).

Četrnaest norma ISO 80000 najpouzdaniji su vodič s uputama za upotrebu veličina, jedinica i formula u matematici, fizici i fizikalnoj kemiji. Norme su izvorno objavljene na francuskom i engleskom jeziku, a neke su prevedene i na ruski. U većini zemalja svijeta udžbenici poštuju definicije i upute dane u tim normama. Prihvaćene su i kao norme obavezne za Hrvatsku (*Hrvatske norme* HRN 80000, 2007–2012), o čemu vodi brigu Hrvatski zavod za norme.

### 3. Izvorna definicija težine u mjeriteljstvu

Sve do druge polovice 19. stoljeća kilogram se upotrebljavao i kao jedinica za masu i kao jedinica za silu. Nakon što je uočena neodrživost

takve prakse, prvi je puta jasno razdvojena težina od mase, a svaka je od tih veličina definirana zasebno. Na sjednici održanoj 1901. godine Opća konferencija za utege i mjere donosi deklaraciju s tri bitna zaključka:

- »1. Kilogram je jedinica za masu. Ta je masa jednaka masi međunarodnog prauzoraka kilograma.
2. Riječ *težina* označava veličinu koja ima obilježje sile; težina tijela je umnožak mase tijela i ubrzanja (akceleracije) sile teže. Posebno, 'normirana (standardna) težina' jednaka je umnošku mase tijela i standardnog (normiranog) ubrzanja Zemljine sile teže.
3. Vrijednost ubrzanja sile teže koju BIPM prihvaća kao standardnu jest  $g_n = 980,665 \text{ cm/s}^2$ , koja je već uvrštena u zakonske propise nekih zemalja.«  
(Ta je vrijednost  $g_n$  bila uobičajeni podatak potreban za računanje danas odbačene jedinice »kilogram sile«.)

#### 4. Suvremeni međunarodni dogovor o definiciji težine

Najnovija definicija težine  $F_G$  u Međunarodnoj normi ISO 80000-4 (2006) glasi:

$$F_G = mg_L \quad (1)$$

gdje je  $m$  masa, a  $g_L$  lokalno ubrzanje slobodnoga pada.

Napomene (koje su dio definicije) glase:

»Treba naglasiti da, kada je referentni sustav Zemlja, ta veličina uključuje ne samo lokalnu gravitacijsku silu već i lokalnu centrifugalnu silu uslijed vrtnje Zemlje oko osi. U težinu nije uključen utjecaj atmosferskog uzgona. U običnom se govoru naziv *težina* rabi umjesto naziva *masa*, što treba dokinuti.«

#### 5. Ovisnost težine o položaju motritelja

Uvođenjem norme ISO 80000-4 definicija se težine, koja se u početku odnosila samo na tijela u blizini Zemljine površine, proširuje na tijela na znatnim visinama iznad Zemlje te na tijela koja slobodno padaju u prostoru oko Zemlje ili se gibaju u orbiti. Pri opisu fizikalnih pojava referentni sustav više ne mora biti vezan za Zemlju, nego za položaj gdje se nalazi motritelj, pa može biti odabran i tako da se poistovjeti s položajem tijela koje pada. Valja naglasiti da su u matematičkom pri-

stupu gibanju svi sustavi ravnopravni, ali ih fizičar treba procijeniti i odabrati koji je najprikladniji za opis promatrane pojave.

Iz Newtonovih zakona proizlazi da u ubrzanom sustavu, osim stvarnih sila, valja uzeti u obzir i inercijske (tzv. »prividne«) sile koje su posljedica tromosti (Lopac, 2009, 100; Paar, 1992, 89–97). Dijeljenjem sile s masom dobiva se lokalno ubrzanje. Ono je razlika ubrzanja  $\vec{a}$  koje dolazi od »stvarnih« sila i ubrzanja  $\vec{a}_1$  kojim se giba neinercijski sustav:

$$\vec{a}_L = \vec{a} - \vec{a}_1. \quad (2)$$

## 6. Težina tijela koje miruje na površini Zemlje

Na površini Zemlje lokalno ubrzanje  $g_L$  iznosi približno  $g \approx 9,8 \text{ ms}^{-2}$  i najvećim je dijelom posljedica gravitacijske sile. Za tijelo koje miruje na Zemlji težina je  $F_G = mg$ . Taj umnožak predstavlja iznos sile usmjerene približno prema središtu Zemlje, pri čemu se uzgon ne uzima u obzir. No to se ubrzanje ponešto mijenja ovisno o mjestu na Zemljinoj površini. Razlozi odstupanju su spljoštenost Zemlje, reljef Zemljine površine, promjenljiva gustoća tvari u unutrašnjosti Zemlje i utjecaj rotacije Zemlje. Zbog nje se uz površinu Zemlje javlja inercijska centrifugalna sila, okomita na Zemljinu os vrtnje, koja se vektorski zbraja s gravitacijskom silom usmjerenom prema središtu Zemlje. To daje malu ali nezanemarivu korekciju, izračunatu u Dodatku A.

## 7. Sila teretnica

U vakuumu su težina tijela i sila kojom tijelo pritiskuje podlogu iznosima jednake. No ako se tijelo koje ima gustoću  $\rho_t$  i obujam  $V$  nalazi u zraku ili drugom fluidu gustoće  $\rho_f$  (manje od gustoće tijela), zbog uzgona je sila kojom tijelo pritiskuje podlogu manja od težine. Ona se naziva silom teretnicom (*load* ili *load force*) (Brezinščak i sur., 1997, 378; Brezinščak, 2005) i iznosi  $Q = mg - \rho_f g V$  ili

$$Q = mg(1 - \rho_f / \rho_t). \quad (3)$$

Neki autori tu silu nazivaju prividnom težinom, što drugi smatraju neprikladnim izrazom koji je bolje izbjegavati (Bartlett, 2010). U udžbenicima se ponegdje upravo teretnicu naziva težinom (Mikuličić, Varićak i Vernić, 1982, 92; Paar, 2009, 144), iako se to kosi s dogovorenim mjeriteljskom definicijom težine (1).

## 8. Bestežinsko stanje tijela u orbiti ili u slobodnom padu

Ako motritelj nije na površini Zemlje već se gibanje promatra u nekom drugom ubrzanom sustavu, onda se i brzina tijela i ubrzanje iskazuju u tom drugom sustavu. Izračun u Dodatku B pokazuje da je u sustavu tijela u kružnoj orbiti na visini  $h$  iznad Zemlje težina prema definiciji (1) jednaka nuli te je ispravno reći da se tijelo nalazi u bestežinskom stanju (Paar, 1992, 89–97). No to vrijedi samo u sustavu tijela. Isto tijelo promatrano u sustavu Zemlje ima težinu različitu od nule, ovisnu o visini  $h$  na kojoj se nalazi.

Ako tijelo na malim visinama blizu Zemljine površine, gdje je  $g$  približno konstantan, pada u fluidu gustoće  $\rho_f$ , brzina padanja tijela razlikovat će se od brzine slobodnoga pada u vakuumu: tijelo će padati sporije. No kako u nastavi fizike slobodni pad prikazujemo kao jednoliko ubrzano gibanje u sustavu Zemlje, i težinu treba promatrati u tom sustavu. Ona je usmjerena prema središtu Zemlje i ima iznos  $F_G = mg$ . Promatrano u sustavu tijela, lokalno je ubrzanje tada jednako nuli te je i težina tijela jednaka nuli (Dodatak C).

## 9. Filozofski pristup: teorijska i operacijska definicija težine

Pitanjima definicija veličina u fizici ne bave se samo znanstvenici i inženjeri nego i filozofi znanosti. U njihovim se tekstovima navode dva tipa definicija: teorijska (konceptualna) i operacijska definicija. Najvažnije je svojstvo teorijske definicije njezina uska povezanost sa zaokruženim sustavom znanja o određenoj pojavi. Ona omogućuje povezivanje veličina u kvantitativno iskazane zakone i predviđanje novih pojava i činjenica na temelju tih zakona. Podrazumijeva poznavanje i prihvaćanje teorija na kojima se temelji. Ne svodi se samo na skup opažanja, već zahtijeva i prihvaćene zaključke o tim opažanjima. Kako se razvijaju teorije i raste znanstveno razumijevanje, poboljšavaju se i teorijske definicije. Službena mjeriteljska definicija težine (1) primjer je teorijske ili konceptualne definicije. Bliska je gravitacijskoj definiciji u kojoj se kao  $g_L$  uzima samo ubrzanje koje potječe od gravitacijske sile.

Nasuprot tome, operacijska definicija neke veličine počiva isključivo na mjerenju. Varijablu, izraz ili predmet ona definira s pomoću specifičnih provjernih testova i operacija. Operacijsku je metodu uveo

Percy Williams Bridgman (1882–1961), dobitnik Nobelove nagrade za fiziku godine 1946. za otkrića i izume u području eksperimentalne fizike visokih tlakova. Definicije koje se oslanjaju na operacije (postupke) uveo je kako bi izbjegao teškoće prisutne pri pokušajima definiranja s pomoću unutarnjih zakonitosti.

Operacijska definicija težine tvrdi da je težina predmeta ono što se očitava prilikom vaganja standardnom opružnom vagom. Nigdje, međutim, nije precizirano koji je to standard. Operacijski se pristup težini pojavio u ruskim udžbenicima nakon 1970. godine, istodobno s reformom školstva koja je imala snažan ideološki predznak (Шамаш и Эвенчик, 1985). Taj je koncept značajno utjecao i na hrvatske udžbenike. Dok je u zapadnoj literaturi odabir tipa definicije većinom bio prepušten prosudbi autora, operacijsku su definiciju prihvatile filozofske struje u zemljama koje su obrazovni proces željele podvrgnuti dogmatskim ideološkim kriterijima vezanima za teorije dijalektičkoga materijalizma. Zanimljivo je pogledati odjeljak iz jedne od kritika operacijske definicije (Ivanović, 1974):

»Operacionalistička namjera da se istakne važnost operacija i da se one u proučavanju što bolje iskoriste u cilju što preciznijeg otkrivanja i određivanja svojstva objekta, izrodila se u neznanstveno shvaćanje da se kao definicije fizičkih veličina i pojava uzmu djelatnosti, operacije čovjeka kao jedini i dovoljan sadržaj tih definicija. Dakle operacionalizam zapostavlja pravi i glavni predmet proučavanja fizike. Pokušaji operacionalista da svoje definicije proture i kroz udžbenike na svim razinama nisu ograničeni ni geografski ni društvenim sustavom.«

Najveći pobornik operacijske definicije težine danas je izraelski metodičar fizike Igal Galili (Galili i Tseitlin, 2010).

## **10. Operacijska definicija težine u nastavi i udžbenicima u Hrvatskoj**

U hrvatskim je udžbenicima do tada svugdje prisutnu gravitacijsku definiciju težine oko godine 1985. zamijenila drukčija, operacijska definicija. Prema toj definiciji težina je sila kojom tijelo djeluje na podlogu ili na ovjes. Hvatište više nije u težištu tijela, nego u točki ovjesa ili dodira s podlogom. Ta definicija ne govori o vektorskom karakteru težine niti naglašava njezin smjer, a pripisuje joj svojstva elastične, a ne gravitacijske sile. Za gravitacijsku se silu uvodi naziv *sila teža*. Kao

argument za uvođenje operacijske definicije u udžbenike predočene su slike predmeta i osoba u tzv. »bestežinskom stanju« koje su se pojavile s razvojem svemirskih programa, a stanje »bez težine« nije se uklapalo u gravitacijsku predodžbu težine.

Vidljiva promjena koja se dogodila u Hrvatskoj oko 1985. može se pratiti kroz udžbenike i priručnike iz toga doba. Usporedit ćemo izdanja Repetitorija fizike Z. Šporera i A. Kuntarića iz različitih razdoblja.

U drugom izdanju (Šporer i Kuntarić, 1975) ovako se definira težina:

»Težina ( $G$ ) tijela koje miruje na nekom mjestu na Zemlji jest sila kojom Zemlja privlači to tijelo. Ako tijelo leži na čvrstoj podlozi, onda je težina tijela jednaka sili kojom to tijelo u zrakopraznom prostoru pritiska podlogu... Težina tijela ('sila teža') je rezultanta gravitacijske sile  $F_{gr}$  i vertikalne komponente centrifugalne sile  $F_{cf}$ , koja se javlja zbog rotacije Zemlje. Težina tijela mase  $m$  na mjestu s ubrzanjem  $\vec{g}$  dana je izrazom  $\vec{G} = m\vec{g}$ .«

Međutim, u petom izdanju (Šporer i Kuntarić, 1986) i svim kasnijim izdanjima, primjerice dvadesetom (Šporer i Kuntarić, 1995), piše:

»Težina  $G$  tijela koje miruje na nekom mjestu na Zemlji jest sila kojom tijelo zbog Zemljina privlačenja djeluje na podlogu ili na ovjes ako visi. Težina tijela mase  $m$  na mjestu s ubrzanjem  $g$  dana je izrazom  $G = mg$ .

Sila teža je rezultanta gravitacijske sile  $F_{gr}$  i vertikalne komponente centrifugalne sile  $F_{cf}$ , koja se javlja radi Zemljine vrtnje. Stoga je sila teža na tijelo mase  $m$  na mjestu s ubrzanjem  $g$  jednaka  $F = mg$ . Hvatište sile teže je u težištu tijela.«

U istoj knjizi, promjena definicije težine očituje se i u promijenjenom opisu uzgona i Arhimedova zakona.

## 11. Mišljenja znanstvenika o definiciji težine

Da bi se dobila slika o pristupu težini u nastavi fizike u Hrvatskoj, upućena je zamolba istaknutim znanstvenicima, nastavnicima fizike i autorima udžbenika da opišu kako u svojim predavanjima i knjigama definiraju težinu i pristupaju uzgonu. Anketa provedena 2010. godine dala je veoma korisne podatke. Navodimo najprije djelomične navode iz mišljenja sveučilišnih nastavnika opće fizike, iz kojih je vidljivo da u većini podupiru gravitacijsku ili konceptualnu (teorijsku) definiciju težine (1).

»U engleskoj literaturi upotrebljava se naziv *težina* (engl. *weight*) za silu  $\vec{F}_G$  kojom Zemlja privlači tijelo. Takva se praksa širi i u hrvatskoj literaturi. Za



silu  $\vec{F}_n$  koja se može mijenjati u ovisnosti o danoj situaciji upotrebljava se opisni izraz *sila kojom tijelo djeluje na podlogu.*« (A. D.)

»Za svoja predavanja iz Osnova fizike koristim udžbenik *University Physics* (Young and Freedman) u kojem je težina definirana kao i u normi koju spominjete. U toj knjizi uzgon nije nigdje eksplicitno naveden kao sila koja se uzima u obzir kad se računa prividna težina ali se to sigurno mislilo. Za ovu rezultatnu silu koja opisuje pritisak na podlogu koristi se pojam prividna težina.« (Mi. P.)

»Na tijelo s inercijskom masom djeluje na Zemlji niz sila: gravitacijska, zatim prividna (radi neinercijalnosti Zemlje od rotacije) i konačno uzgon. Ja bih naveo sva tri utjecaja te zaključio da je težina kolokvijalni termin pod kojim razni autori mogu podrazumijevati razne stvari. Apsolutni termini su gravitacijska sila (gravitacijska akceleracija), sila na uravnoteženo tijelo u vakuumu s odgovarajućom akceleracijom to jest uključenjem neinercijskog dijela akceleracije te konačno rezultatna sila na tijelo u mediju. Pod ovom posljednjom većina bi ljudi podrazumijevala težinu. ('Tijelo uronjeno u tekućinu gubi na težini.')

»Nisam uključivao uzgon u pojam težine, dakle, uzimao sam samo gravitacijsku i inercijsku silu za tumačenje pojma težine. Uzgon sam objašnjavao kao *prividnu* promjenu težine. Razlog je što je uzgon sila kojom okolina djeluje negravitacijskim silama na tijelo, ali možda više što se sile uzgona u nekim situacijama ne razlikuju od sila tvrde podloge. Npr., tijelo pliva na vodi, i ako uzmemo uzgon kao dio sile težine, ono nema težine. Onda vodu hlađenjem zamrznemo, onda to tijelo stoji na tvrdoj podlozi i najedanput ono ima težinu. Takvih se primjera može smisliti koliko hoćete.« (K. I.)

»Nisam vidio potrebe za dva pojma: 'sila teža' i 'težina'. Posebno me zbunjivao opis 'težine' kao sile kojom tijelo pritiska (horizontalnu) podlogu ili navlači nit o koju je obješeno. Što je težina tijela koje visi, ali tako da je naslonjeno na kosinu? Isključivo sam koristio pojam 'težine' kao 'sile na tijelo', a ne kao sile kojom 'tijelo djeluje na nešto'. Smatram najprikladnijim prihvatiti definiciju iz *University Physics* (Sears and Zemansky). Uzgon? – dakle, 'prividna težina'.« (K. Z.)

U nastavku navodimo mišljenja vodećih nastavnika metodike fizike i autora udžbenika za srednje i osnovne škole. Vidljivo je da oni – djelomično zbog propisa koji su već dulje vremena nametnuti kroz obrazovne standarde i nastavne programe – daju prednost operacijskoj definiciji, ali su skloni prihvaćanju dogovora o međunarodnim mjeriteljskim normama.

»Za koncept težine danas ne postoji jedinstven dogovor na globalnoj razini. U uporabi su dvije inačice: u jednoj težina tijela mase  $m$  jest sila  $mg$  kojom Zemlja djeluje na tijelo. U drugoj inačici je težina sila  $mg$  kojom tijelo djeluje na podlogu ili ovjes. Iako to dovodi do nepotrebne zbrke – primjerice bestežinsko stanje se u dvije inačice opisuje sasvim različito – nije moguće postići

konsenzus čak niti na razini školskog sustava jedne male zemlje.« (Krsnik, 2008, 70–71)

»Ne bih uvodio razliku vakuum – zrak, to bi za većinu učenika bilo zbunjujuće. Bojao bih se na toj razini uvoditi još i inercijsku silu. Mislim da se pri izboru terminologije treba držati i tradicije i razumljivosti za učenike. Treba preformulirati sva mjesta gdje se težina javlja i paziti da razina zahtjevnosti bude prilagođena dobi učenika i znanju nastavnika.« (V. P.)

»O iznosu težine raspravljamo jedino kada tijelo miruje na mirnoj, vodoravnoj podlozi ili visi na ovjesu. Kažemo da su tada sila teža i težina jednake po iznosu (i usmjerenju, hvatišta se razlikuju, izračun je  $G = F_G = mg$ ). Ne računamo iznos težine pri slobodnome padu, već kažemo da u tome slučaju tijelo nema težinu (iako je iznos  $F_G$  neupitan). Ostale primjere ne razmatramo u osnovnoj školi.« (S. P. P.)

»Studente upućujem i na ISO i HRN i upoznam ih sa svim drugim kriterijima i tumačenjima s kojima će se susretati u ostaloj literaturi, a možda jednoga dana i u našoj udžbeničkoj literaturi. U školskoj se praksi moramo držati još uvijek važećih HNOSA. Na nastavničkim fakultetima koristimo obje veličine. Zemlja silom težom djeluje na tijela i hvatište joj je u težištu tijela, a tijela težinom djeluju (u vakuumu i približno u zraku) na Zemlju s hvatištem na podlozi ili na ovjesu. Meni je konceptualno bliži tzv. ruski pristup od ovoga u ISOu 8000–4, uvedenoga 2006., koji potpuno izjednačava pojam težine s uobičajenim pojmom sile teže.« (B. M.)

»Iako mi se pristup težini kao sili kojom tijelo djeluje na podlogu ili ovjes čini bližim operativnoj definiciji težine (načinu kako se ona mjeri), kao i iskustvenom poimanju težine, ne protivim se niti uvođenju nove definicije. U konačnici, to je stvar dogovora među fizičarima i to se mora poštivati. Za učenike je svakako jednostavnije da je težina uvijek jednaka  $mg$ .« (Ma. P.)

Navedeni odgovori potvrđuju da operacijski pristup težini ne omogućuje računanje težine i njezino povezivanje s ostalim veličinama i zakonima fizike. Takva definicija težine, uvjetovana isključivo rezultatima izravnoga mjerenja sile, uključuje i uzgon, što nije u skladu s međunarodnim dogovorom o težini kao umnošku mase i ubrzanja. Njezin se opstanak u školama najčešće opravdava uvjetom da razina zahtjevnosti treba biti prilagođena dobi učenika te da je tako učenicima i nastavnicima lakše.

U okviru anketnog upitnika bio je i numerički zadatak o težini tijela koje pada u vakuumu ili fluidu. Nastavnici koji su zastupali teorijsku definiciju težine jednostavno su ga riješili, dok su oni iz grupe koja se priklonila operacijskoj definiciji pristupili neujednačeno i dobili proturječne rezultate. Igal Galili je, dosljedno svojem stavu da nije potrebno računati, na isto pitanje odgovorio:

»Lijepo je da znate interpretirati numeričke rezultate. No mene više zanima što su ljudi mislili kad su odgovorili na ovaj ili na onaj način. Da bismo razumjeli njihove predodžbe, morali bi nam ih na neki način znati objasniti bez pozivanja na primjene.«

Galili dalje objašnjava da uzgon treba isključiti:

»Nastavnik može objasniti čimbenike koji utječu na vaganje. One koji se mogu isključiti treba isključiti (primjerice, silu uzgona), i to je standardno vaganje. Međutim, inercijska se sila načelno ne može isključiti i zato težinu treba razlikovati od gravitacijske sile.«

Nadalje ističe

»... da je važno napomenuti da težina nije samo rezultat postupka vaganja, nego valja reći da je 'težina rezultat *standardnoga* postupka vaganja'. 'Standardno' ovdje znači da treba isključiti sve čimbenike koji mogu utjecati na rezultat vaganja (silu uzgona ili bilo koju dodatnu potpurnu silu na predmet koji se važe).« (prijevod V. L.)

## 12. Mjerenja mase, težine i ubrzanja slobodnoga pada na površini Zemlje

Do pomutnje pri definiciji težine došlo je i zbog načina na koji se ona mjeri. Objesimo li predmet na dinamometar, očitat ćemo iznos sile koja isteže oprugu. Međutim, prema definiciji (1) dobiveni rezultat mjerenja u zraku nije jednak težini nego sili teretnici (3). Da bismo doznali težinu, treba odvojeno mjeriti dvije veličine: masu tijela i lokalno ubrzanje slobodnoga pada.

Tehnike mjerenja mase važan su segment praktičnih djelatnosti mjeriteljskih organizacija (Brezinščak, 2005). Temeljni uređaj koji se pri tome rabi je vaga. Razlikuju se opružne i polužne vage. Masa tijela gustoće  $\rho_t$  određuje se vaganjem na polužnoj vagi jednakih krakova, tj. uspoređivanjem nepoznate mase  $m$  na jednom kraku s poznatom masom utega  $m_u$  na drugom kraku. Kako je  $m_u g = mg$ , to je  $m = m_u$ . Ako se vaganje obavlja s pomoću opružne vage u zraku ili drugom fluidu gustoće  $\rho_f$ , izmjerena sila nije težina tijela  $mg$ , već manja sila teretnica  $Q$  (3). Tada je masa tijela  $m = Q / [(1 - \rho_f / \rho_t)]$ .

Za mjerenje ubrzanja slobodnoga pada na raznim mjestima Zemljine površine danas postoje razrađene metode. Time se bavi specijalno područje geofizike, gravimetrija, a postoje zemaljske i svemirske gravimetrijske metode. Svemirski projekt NASAe Gravity Recovery and

Climate Experiment (GRACE) djeluje s pomoću dvaju satelita i tako omogućuje prikaz vrijednosti ubrzanja Zemljine sile teže na karti svijeta. Takva karta prikazuje prostorne i vremenske promjene Zemljina gravitacijskoga polja.<sup>1</sup> Različitim su bojama prikazana izmjerena odstupanja od vrijednosti za glatku idealiziranu Zemlju oblika rotacijskoga elipsoida. Empirijski dobivena geodetska formula za elipsoid sadrži ovisnost o geografskoj širini  $\alpha$  i glasi

$$g_{\text{normal}} = 9,780327 (1 + 0,0053024 \sin^2\alpha - 0,0000058 \sin^2 2\alpha) \text{ ms}^{-2}.$$

Odstupanje od nje izraženo je jedinicom 1 Gal = 1 cm s<sup>-2</sup>. U Tablici 1 prikazane su vrijednosti ubrzanja  $g$  na nekim mjestima Zemljine površine, zajedno s geografskom širinom i nadmorskom visinom.

**Tablica 1.** Vrijednosti lokalnog ubrzanja  $g_L$  na raznim mjestima Zemljine površine

Mjesto	Geografska širina	Nadmorska visina/m	$g_L/\text{ms}^{-2}$
Kilimandžaro	-3,07°	5895	9,758
Mount Everest	+27,99°	8850	9,763
Rio de Janeiro	-22,90°	16	9,786
Sydney	-33,87°	37	9,796
New York	+40,71°	38	9,803
Dubrovnik	+42,65°	51	9,806
Sljeme	+45,90°	1035	9,806
Split	+43,51°	10	9,807
Osijek	+45,55°	87	9,808
Pula	+44,87°	19	9,808
Rijeka	+45,33°	23	9,809
Zagreb	+45,81°	116	9,809
Pariz	+48,86°	45	9,813
Stockholm	+59,33°	45	9,818
Sjeverni pol	+90°	0	9,832

<sup>1</sup> Dostupno na: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/56/Geoids\\_sm.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/56/Geoids_sm.jpg).

### 13. Zaključci i preporuke

Među fizičarima, filozofima i edukacijskim stručnjacima još se uvijek vode rasprave o značenju naziva *težina*. Istraživanje je pokazalo da znanstvenici na fakultetima u Hrvatskoj prihvaćaju teorijsku definiciju težine. Određena kao umnožak mase i lokalnog ubrzanja slobodnoga pada, ta definicija težine vodi računa o položaju motritelja i u skladu je s normom ISO 80000-4, a za tijela na površini Zemlje ne uključuje uzgon.

Nastavnici metodike fizike uglavnom zagovaraju operacijsku definiciju težine prema kojoj se težina ne doznaje računanjem nego mjerenjem s pomoću opružne vage a koja je, prema ruskim uzorima, od 1985. godine u Hrvatskoj postala obvezatna za školsku nastavu i udžbenike. No i oni se većinom slažu da bi u budućnosti u nastavu trebalo uvesti sveobuhvatnu konceptualnu definiciju sadržanu u normi ISO 80000-4, jer ona vodi računa o položaju motritelja i omogućuje izračun težine tijela kao umnoška mase i ubrzanja  $g$  u blizini Zemljine površine, ali i težine jednake nuli za tijela u orbiti i u slobodnom padu.

Za ishode buduće nastave fizike u školi važno je analizirati gravitaciju i uzgon, a u prikladnom opsegu i inercijske sile. Učenike je potrebno upozoriti na nazive (*sila teža* i *težina*) čija se značenja u osnovnoj i srednjoj školi još uvijek razlikuju od onih koji se susreću na fakultetu. Običaj da se u nastavi računa s grubom aproksimacijom  $g \approx 10 \text{ ms}^{-2}$  valjalo bi napustiti. Učenike, studente i nastavnike treba upoznati s definicijama zadanima u međunarodnim normama i općenito s važnošću mjeriteljstva za napredak fizike i njezinih primjena.

Potrebno je pristupiti reviziji nastavnih programa i drugih službenih dokumenata kako bi se gravitacijska i operacijska definicija težine zamijenile potpunom definicijom iz norme ISO 80000-4, jer se time omogućuje razumijevanje i povezivanje eksperimentalnih rezultata sa zakonima fizike. Autorima udžbenika mora se omogućiti da uvedu i protumače definiciju težine u skladu sa znanstvenim tumačenjem težine i s međunarodnim dogovorima.

I dalje valja isticati važnost eksperimenta, što je bilo temeljno opravdanje za uvođenje operacijske definicije težine. Eksperimentima s opružnom vagom treba dodati i upoznavanje s gravimetrijskim metodama mjerenja  $g$  kao i metodama mjerenja mase, uzgona i drugih veličina. Treba iskoristiti bogatu literaturu i medije za upoznavanje zanimljivih eksperimenata koji nisu ostvarivi na samoj nastavi. Korisno je upozno-

riti da se u slikama i opisima leta kojima se ilustrira bestežinsko stanje prikazuju mjerene vrijednosti  $g_L$  lokalnoga ubrzanja slobodnoga pada, a ne iznosi težine tijela (Dempsey i sur., 2007).

Na kraju se treba ponovno zamisliti nad upornom uporabom riječi *težina* umjesto *masa* u svakodnevnom govoru. Ona upućuje na zaključak da većina ljudi doživljava težinu kao veličinu razmjernu masi, dakle intuitivno prihvaća definiciju  $F_G = mg$ . Zapravo je predodžba o proporcionalnosti težine s masom mnogo zastupljenija od alternativne intuitivne predodžbe o težini kao sili pritiska na podlogu i dodatni je argument za konačno uvođenje jedinstvenog dogovora o definiciji težine kao umnoška mase i lokalnog ubrzanja slobodnoga pada. Naziv *sila teža* i dalje može ostati kao način da se opiše gravitacijsko djelovanje Zemlje i drugih nebeskih tijela na predmete u njihovoj okolini, ali nema nikakvog opravdanja ni potrebe da se *sila teža* uvodi kao posebna mjerena veličina.

## Zahvale

Zahvaljujem kolegama znanstvenicima, sveučilišnim nastavnicima opće fizike i metodike fizike, kao i autorima udžbenika koji su svojim priložima sudjelovali u ispitivanju mišljenja o tumačenju i izračunu težine u nastavi fizike. To su: Antonije Dulčić, Miroslav Furić, Igal Galili, Ksenofont Ilakovac, Rudolf Krsnik, Branka Milotić, Vladimir Paar, Sonja Prelovšek Peroš, Maja Planinić, Mirko Planinić, Anđelka Tonejc i Krešo Zadro. Zahvalna sam Zvonimiru Jakoboviću i Nenadu Nikoliću za brojne razgovore i savjete o nazivlju i pitanjima mjeriteljstva. Sa zahvalnošću se sjećam rasprava i razgovora s Petrom Kulišićem (1940–1995) i Marijanom Brezinščakom (1926–2009).

## Literatura

- Bartlett, Albert A. (2010), »Apparent Weight: A Concept that is Confusing and Unnecessary«, *Physics Teacher*, god. 48, sv. 8, str. 522.
- Brezinščak, Marijan (2005), *Temeljna mjerenja mase*, Zagreb: Hrvatsko mjeriteljsko društvo.
- Brezinščak, Marijan; Jakobović, Zvonimir; Šoljić, Zvonimir (1997), »Vage i utezi«, *Tehnička enciklopedija*, 13. svezak, Zagreb: Leksikografski zavod Miroslav Krleža, str. 377–401.

- Davis, Richard (2012), »Predložena promjena definicije kilograma: Posljedice za zakonsko mjeriteljstvo«, *Svijet po mjeri*, sv. 1, str. 135–142.
- Dempsey, Robert; DiLisi, Gregory A.; DiLisi, Lori A.; Santo, Gretchen (2007), »Thank You for Flying the Vomit Comet«, *Physics Teacher*, god. 45, sv. 2, str. 75–79.
- Hrvatske norme, HRN ISO 80000 (1–14), (2007–2012).*
- Galili, Igal; Tseitlin, Michael (2010), *Excursion to the History of Weight Concept. From Aristotle to Newton and then to Einstein*, Jerusalem: The Hebrew University of Jerusalem.
- Iona, Mario (1975), »The Meaning of Weight«, *Physics Teacher*, god. 13, sv. 5, str. 263.
- Iona, Mario (1999), »Weight – An Official Definition«, *Physics Teacher*, god. 37, sv. 4, str. 238.
- Ivanović, Dragiša M. (1974), *O nekim idejnim pitanjima u nastavi fizike*, Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva.
- Krsnik, Rudolf (2008), *Suvremene ideje u metodici nastave fizike*, Zagreb: Školska knjiga.
- Leong, Wong Chee; Chin, Yap Kueh (2009), *The Semantics Problems on the Definitions of Weight, ERAS Conference 2009*, Singapore: Educational Research Association of Singapore.
- Lopac, Vjera (2009), *Leksikon fizike*, Zagreb: Školska knjiga.
- Lopac, Vjera; Nahod, Bruno (2013), »Kako ćemo govoriti i pisati o fizici? Projekt STRUNA o hrvatskom nazivlju u fizici – metode i rezultati«, *Matematičko-fizički list*, Zagreb, god. LXIII, sv. 2, str. 86–90.
- Mikuličić, Branka; Vernić, Elsa; Varićak, Milena (1982), *Zbirka zadataka iz fizike*, Zagreb: Školska knjiga.
- Paar, Vladimir (1992), *Gibanje i energija – Priručnik za prvi razred gimnazije*, Zagreb: Školska knjiga.
- Paar, Vladimir (2009), *Fizika 1 – Udžbenik za prvi razred gimnazije*, Zagreb: Školska knjiga.
- Шамаш, С. Я.; Эвенчик, Э. Е., ир. (1985), *Научные основы школьного курса физики*, Москва: Педагогика.
- Šporer, Zlatko; Kuntarić, Antun (1975), *Repetitorij fizike*, Zagreb: Školska knjiga (II. izdanje).
- Šporer, Zlatko; Kuntarić, Antun (1986), *Repetitorij fizike*, Zagreb: Školska knjiga (V. izdanje).
- Šporer, Zlatko; Kuntarić, Antun (1995), *Repetitorij fizike*, Zagreb: Školska knjiga (XX. izdanje).

## WEIGHT AND GRAVITY – PROBLEMS WITH MEANINGS AND DEFINITIONS

Vjera Lopac

*Physicists, philosophers and researchers in physics education do not agree on the precise meaning and definition of the term weight. Most physicists advocate the theoretical (conceptual) definition, according to which weight is product of mass and the local acceleration of free fall, in line with the definition of weight in the international standard ISO 80000-4. It takes into account both the position of the observer and the inertial forces in accelerated reference systems. On the Earth's surface weight is defined as the product of mass and combined gravitational and centrifugal acceleration. The same definition explains the concept of weightlessness of a body freely falling or moving in an orbit. Some authors advocate the operational definition of weight according to which weight is defined as the result of measurement using the spring balance. The article analyzes the approach to the weight in physics courses and emphasizes the need to replace the operational definition by the internationally agreed definition of weight.*

**Key words:** *weight, gravity, theoretical definition, operational definition, weightlessness, noninertial reference system, inertial forces, local acceleration of free fall, load force*



## D o d a t a k A.

### Centrifugalna korekcija gravitacijskoj sili

Ako se motritelj nalazi na površini Zemlje, u točki s geografskom širinom  $\alpha$ , težina se računa u ubrzanom referentnom sustavu vezanom za tu točku. U njemu je lokalno ubrzanje jednako razlici ubrzanja nastalog zbog gravitacijske sile kojom Zemlja privlači tijelo i centripetalnog ubrzanja vrtnje točke na površini Zemlje oko njezine osi  $\vec{g}_L = \vec{a}_{gr} - \vec{a}_{cp}$  ili, zbog  $\vec{a}_{cp} = -\vec{a}_{cf}$ , zbroju gravitacijskog i centrifugalnog ubrzanja  $\vec{g}_L = \vec{a}_{gr} + \vec{a}_{cf}$ . Iznos gravitacijskog ubrzanja približno je

$$a_{gr} = g = G_N M_Z / R_Z^2,$$

a iznos centrifugalne korekcije ubrzanju

$$a_{cf} = a_{cf}^0 \cos\alpha, \text{ gdje je } a_{cf}^0 = 4\pi^2 R_Z / T^2.$$

$G_N$  je gravitacijska konstanta,  $R_Z$  polumjer Zemlje,  $M_Z$  masa Zemlje, a  $T$  period vrtnje Zemlje oko osi (24 sata). Težina je jednaka umnošku mase i lokalnog ubrzanja

$$\vec{F}_G = m\vec{g}_L = m\vec{a}_{gr} + m\vec{a}_{cf},$$

a približno iznosi  $F_G = mg [1 - (a_{cf}^0 / g)\cos^2\alpha]$ . Omjer  $a_{cf}^0 / g = 0,00345$  je malen pa smjer težine minimalno odstupa od pravca koji prolazi središtem Zemlje. Centrifugalna sila umanjuje iznos težine, a korekcija je najveća na ekvatoru.

## D o d a t a k B.

### Težina tijela koje se giba u orbiti

U slučaju slobodnog gibanja u kružnoj orbiti na visini  $h$  iznad površine Zemlje iznosi gravitacijskog i centrifugalnog ubrzanja su

$$a_{gr} = -G_N M_Z / (R_Z + h)^2$$

i, zbog trećega Keplerova zakona,  $a_{cf} = (R_Z + h)(2\pi / T)^2 = G_N M_Z / (R_Z + h)^2$ . Ukupno lokalno ubrzanje u tom sustavu jednako je nuli:

$g_L = -G_N M_Z / (R_Z + h)^2 + G_N M_Z / (R_Z + h)^2 = 0$ . Prema definiciji težine (1) u tom sustavu i težina tijela je jednaka nuli. U sustavu motritelja koji

miruje na Zemlji, za tijelo koje se slobodno giba u orbiti, ubrzanje je jednako gravitacijskom ubrzanju  $g_{\text{gr}}(h) = -G_{\text{N}}M_{\text{Z}} / (R_{\text{Z}} + h)^2$ , a težina tijela je  $F_{\text{G}}(h) = -G_{\text{N}}mM_{\text{Z}} / (R_{\text{Z}} + h)^2$ . Negativan predznak naglašava da je usmjerena prema središtu Zemlje.

### **D o d a t a k C.**

#### **Težina tijela koje slobodno pada u fluidu**

U sustavu Zemlje, u kojem obično promatramo slobodni pad, težina je  $F_{\text{G}} = mg$ , jer se uzgon ne uzima u obzir. No ukupna sila na tijelo u fluidu jednaka je teretnici (3), a ako tijelo pada u fluidu gustoće  $\rho_{\text{f}}$  ubrzanje sustava vezanoga s tijelom je  $a_{\text{i}} = g(1 - \rho_{\text{f}} / \rho_{\text{t}})$  i manje je od  $g$ . U sustavu tijela lokalno ubrzanje slobodnoga pada iščezava:

$$g_{\text{L}} = Q / m - g(1 - \rho_{\text{f}} / \rho_{\text{t}}) = g(1 - \rho_{\text{f}} / \rho_{\text{t}}) - g(1 - \rho_{\text{f}} / \rho_{\text{t}}) = 0$$

te je u tom sustavu i težina tijela jednaka nuli (Paar, 1992, 89–97).