

Sile in njihove lastnosti

Dr. Mojca Čepič

Univerza v Ljubljani, Pedagoška fakulteta

Kaj opredeljuje silo

Fiziku je sila tako domač pojem, da se običajno ne zaveda, da koncept ni prav enostaven. Z izrazom »sila« poimenujemo interakcijo med objekti, ki (lahko) vpliva na gibanje objekta. Že v prispevku »Energija I: energijski zakon in mehanika« [1] smo povzeli, kaj opredeljuje silo:

- a) reč, na kateri opazujemo učinke sile;
- b) reč, ki silo povzroča;
- c) velikost;
- d) smer;
- e) prijemališče.

V zgornjem zapisu je uporabljena beseda »reč« kot splošno poimenovanje za različna telesa, nežive objekte, rastline, živali in ljudi, a tudi za zrak, vodo in okolico v splošnem, ki so njene podpomenke. Zato se v nadaljnjem besedilu pogosto uporabljajo tudi druga smiselna poimenovanja.

Točka a) se nanaša na spremembe gibanja reči, torej na spremembe velikosti ali smeri hitrosti ali obojega, ter na spremembe oblike te reči/telesa. Običajno obravnavamo le eno spremembo, spremembo gibanja za gibajoča se telesa ali spremembo oblike za mirujoča telesa. Običajno manj poudarjamo, da so deformacije oziroma spremembe oblike prisotne vedno, tudi ob spremembah gibanja, in da so deformacije bolj, manj ali pa sploh ne opazne s prostim očesom bodisi zaradi majhnosti deformacije trdih površin bodisi zaradi hitrosti dogajanja. Za zavedanje tega pomagajo upočasnjeni posnetki udarcev teniške žoge s teniškim loparjem, kjer sta lepo vidni deformacija žoge in deformacija mreže (slika 1).



Slika 1: Žogica in mreža se ob stiku deformirata

Točka b) je kriterij obstoja »sile«. Če ni telesa, ki silo povzroča, potem sile ni. Seveda ob tem lahko naletimo na problem polj, a polja pospravimo z razmislekom o njihovem vzroku in silah na daljavo. Kriterij b) lepo pojasni sistemske sile v pospešenih in vrtečih se sistemih, npr. centrifugalno ali Coriolisovo, katerih učinke opazovalec vidi ali občuti, a reči, ki bi silo s takimi učinki povzročala, ni mogoče najti. Izzvani kognitivni konflikt pojasnim s primeri gibanj, ko stik z vrtečo ali pospešeno premikajočo se podlago izgine, ni več lepenja in telesa se nenadoma gibljejo premo in enakomerno v mirujočem sistemu ter pospešeno glede na pospešeni sistem.

Točki c) in d) sta običajno najmanj problematični, saj je velikost in smer najlažje navezati na vsakdanje izkušnje, na smer na spremembe gibanja ali na obliko opažene deformacije reči. Prav tako je smer in velikost enostavno povezati z izkušnjami učencev, ki se nanašajo na potiskanje, vleko, dvigovanje in podobne aktivnosti.

Točki e) se pogosto ne posvečamo zelo podrobno. Ob točkovnih silah pri stiku je prijemališče sile očitno, pri prostorskih silah na daljavo prijemališče pripisemo težišču, pri ploskovnih silah pa običajno sprejmemo različne dogovore, ki tiho izhajajo iz površinskega integrala prispevkov k rezultanti in točki, v kateri bi sila, enaka rezultanti, povzročila enak navor, čeprav o tem navadno ne razpravljamo, saj se sile obravnavajo pred navorom ali pa navorov sploh ne obravnavamo. A vendar je prijemališče sile zelo zelo pomemben podatek, saj premik prijemališča sile omogoča izračun energije, ki se je prenesla med rečema, med katerima deluje sila, prek mehanizma, ki ga imenujemo mehansko delo. Še več, premik prijemališča sile omogoča ugotavljanje, ali je mehansko delo sploh bilo opravljeno ali pa se je povečala ena ali več oblik mehanske energije na račun zmanjšanja notranje (kemijske) energije istega telesa [1, 2].

Pregled v šoli obravnavanih sil

Preden se lotimo posameznih sil in njihovih predstavitev, se na hitro posvetimo še razvrstitvam sil. Načeloma sile razvrščamo na sile ob stiku in na daljavo. Poleg tega je za analizo prenosa energije pomembno, ali sila deluje točkovno, ploskovno ali prostorsko. Sile, s katerimi se pri pouku srečujemo, lahko enostavno naštejemo. V tabeli so poleg splošnega poimenovanja sile in razvrstitev zapisani tudi vzroki zanje.

Seznam je dolg, na njem pa manjkajo še nekatere sile, ki jih pri pouku redko obravnavamo. Taki sta npr. šibka in močna jedrska sila, katerih doseg je omejen na jedra atomov, ali sile, ki se pojavijo zaradi svetlobnega tlaka.

Preden se lotimo posameznih sil in njihovih predstavitev, se na hitro posvetimo še razvrstitvam sil. Načeloma sile razvrščamo na sile ob stiku in na daljavo.

Tabela: Običajno obravnavane sile, razvrstitev in vzroki zanje.

Vrsta sile	Stik/daljavo	Način delovanja	Vzrok
potisk, stisk	stik	točkovna	»stisna« deformacija telesa, ki potiska
poteg, vlek	stik	točkovna	»raztezna« deformacija telesa, ki vleče
sila podlage	stik	površinska	»stisna« deformacija pod celotno površino stika
lepenje	stik	površinska	»kemijska« vezava atomov na stični površini
trenje	stik	površinska	strižna deformacija mikroskopske strukture na stični površini
upor sredstva	stik	površinska	sprememba hitrosti delov sredstva v neposredni bližini gibajoče se reči
vzgon	stik	površinska	hidrostatični tlak tekočine, ki obdaja telo
teža	na daljavo	prostorska	obstoj telesa, ki povzroča privlak
gravitacijska sila	na daljavo	prostorska	obstoj telesa, ki povzroča privlak
električna sila	na daljavo	odvisno od porazdelitve naboja	obstoj nabitih teles
magnetna sila	na daljavo	prostorska	obstoj magnetnega dipola oziroma tokov
	
centripetalna			ni sila, ampak poimenovanje učinka
centrifugalna			sistemska sila
Coriolisova			sistemska sila

Obravnava posameznih sil

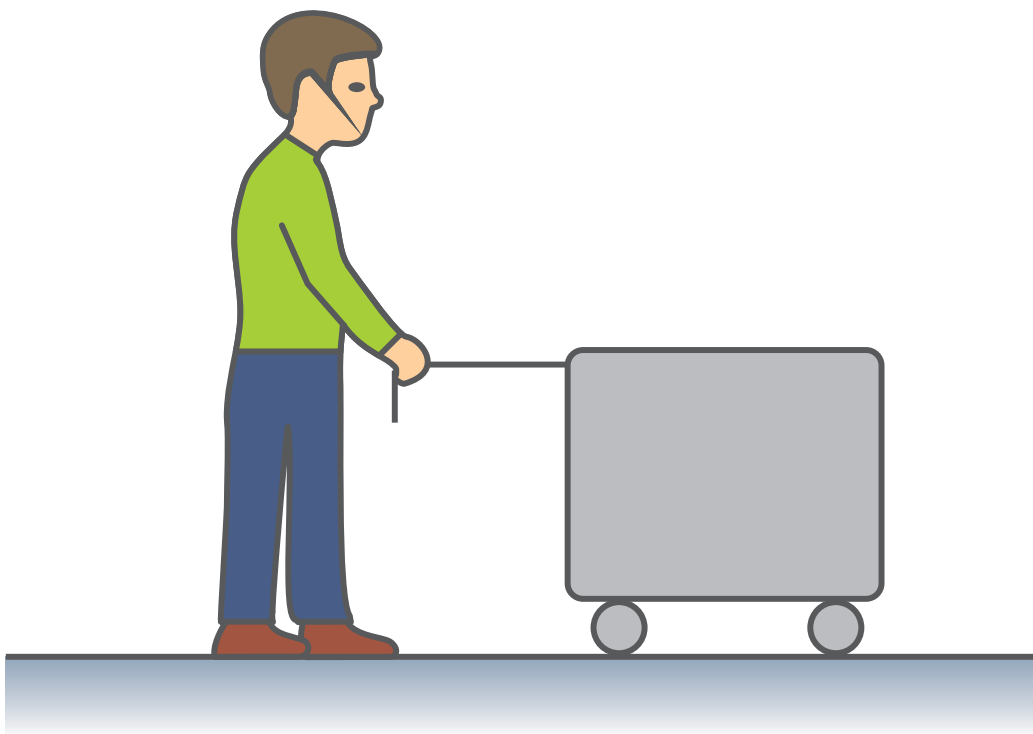
Privoščimo si krajšo razpravo, kaj velja omeniti ob vpeljavi teh sil ali kasneje, ko so učenci/dijaki nanje že vajeni in se jim zdijo že dolgočasne. Začnimo kar po vrsti.

Poimenovanja v prvi skupini sil, ki so tukaj zapisane splošno kot poteg, potisk, vlek, se dejansko ne nanašajo na sile, ampak na dejavnosti, ki te sile povzročijo. Vseeno pa bi predlagala takšna krajša poimenovanja za sile, ki so posledice teh dejavnosti, s katerimi imamo mnogo izkušenj iz vsakodnevnega življenja. Te sile so vedno posledica deformacij, ki jih lahko enostavno ponazorimo z vzmetmi.

Poglejmo si en primer podrobneje. Če vlečemo voziček z vrvico, se vrvica raztegne, zaradi deformacije se pojavijo sile, ki nasprotujejo raztegotanju in vlečejo v nasprotnih smereh »vlačilca« in vozička (slika 2). Ker je deformacija navadno majhna in je ne vidimo, je vrvica pogosto kar pozabljena. Da to »pozabljanje« poudarimo, natančen fizik v nalogi še zapiše, da je vrvica, na katero je privezan voziček, lahka (nima mase) in neraztegljiva. S tem je fizik popravil razmislek, da mora biti vsota vseh sil na lahko vrvico vedno enaka nič, ker bi drugače bil pospešek vrvice neskončen, in da so premiki prijemališč sil na obeh straneh vrvice enaki, ker je neraztegljiva.

Ti razmisleki so zahtevni in učenci se jih navadno ne lotevajo. Posledica take obravnave je, da učenci med reči, ki povzročajo sile na voziček, sploh ne uvrstijo sile vrvice, temveč osebo, ki vrvico vleče. Taka obravnava je izjemno pogosta in strogo gledano ni korektna, zato si z bolj zvedavimi učenci lahko privoščimo tudi nekaj razprave. Zagotovo pa moramo k tej debati dodati še fizikalni pomislek, da reči brez mase in reči, ki jim ne bi bilo mogoče vsaj malo spremeniti oblike, ni.

Zagotovo pa moramo k tej debati dodati še fizikalni pomislek, da reči brez mase in reči, ki jim ne bi bilo mogoče vsaj malo spremeniti oblike, ni.



Slika 2: Deformacije vrvice pri vlečenju ne vidimo

Naslednja skupina sil – sila podlage, trenje ali lepenje – ima isti vzrok, in sicer podlago. Zato v nekaterih učbenikih teče o njih razprava kot o eni sami sili z dvema komponentama – o sili podlage, ki jo imenujemo trenje ali lepenje. Moje osebno mnenje je, da je kljub istemu vzroku komponenti sile boljše ločeno poimenovati, ker so mehanizmi različni in zato učenci koncepte, povezane s temi silami, lažje usvojijo.

Pravokotno komponento sile podlage povzroča tlačna (stisna) deformacija podlage. Mikroskopski razlog je vdiranje elektronov enega atoma v področje drugega atoma in velike sile, ki se pojavijo zato, ker to elektronom/fermionom nikakor ni »dovoljeno«.

Vzporedno usmerjeno lepenje pa se pojavi zaradi hladno zvarjene stične površine med telesoma, ki ju skušamo premakniti drugo glede na drugo, oziroma zaradi kemijskih vezi, ki se na teh »zvarjenih« delih pojavijo med atomi teh dveh različnih teles. Delež take kemijsko vezane površine je med 10^{-5} in 10^{-4} makroskopske stične površine. Zvarjena površina se s pravokotno silo na podlago povečuje. Pri lepenju strižne deformacije vezi med atomi predmetov ob stiku niso dovolj velike, da bi vezi popustile. Podobno je s trenjem, le da med relativnim gibanjem dveh površin take vezi sproti nastajajo in se trgajo, ob tem pa se ob stiku trgajo tudi atomi iz obeh površin in nastajajo fizične poškodbe površine.

Na kratko, mehanizmi so precej drugačni, izrazi, ki omogočajo izračun teh sil, so različni, pri učencih pa generaliziran zapis ene same sile z različnimi komponentami pogosto povzroča zmedo. Ločena obravnava sil je nujna v osnovni šoli, ko razstavljanja sil učenci še ne poznajo in se koncepti komaj vpeljujejo.

Prav posebna sila je upor sredstva. Meni je ljuba ilustracija z luknjo v zraku ali vodi, v kateri je nameščena reč, na katero upor zraka ali vode opazujemo. Ko se reč premakne, ostane za njo v zraku »luknja«, ki jo mora okoliški zrak zapolniti. Da se mirujoči zrak/voda začne premikati, so potrebne sile. Te sile povzročijo reč tako, da odriva in pospešuje zrak/vodo, seveda pa tudi zrak deluje na reč z nasprotno enako silo – s silo upora. Če vlečemo žlico skozi med, lahko to dogajanje tudi opazujemo.

Na hitro omenimo še vzgon, ki nastane zaradi različnega tlaka v različnih globinah. V tem smislu je vzgon površinska sila, saj ga povzroča tlak sredstva, ki telo obdaja. Če telo obdaja več

Pri učencih pa generaliziran zapis ene same sile z različnimi komponentami pogosto povzroča zmedo.

sredstev, npr. del telesa plava v olju, del pa v vodi, k tlaku prispevajo različne tekočine različno, seštevanje prispevkov k rezultanti sile prek vseh površin telesa pa k celotnemu vzgonu. Da to velja tudi za zrak, običajno zanemarimo, razen pri obravnavi balonov.

Teža kot sila, s katero Zemlja privlači telesa, je izkustveno poznana. Teža je pravzaprav samo poseben primer gravitacijske sile. A ker težo obravnavamo posebej, in preden se učenci srečajo s privlakom vesoljskih objektov, je tudi v tej razpravi posebej izpostavljena. Problem teže je, da učenci pogosto pozabijo na njen vzrok. Brez Zemlje teže ne bi bilo. To se še posebej izkaže v okoliščinah, kjer je treba teži poiskati par po tretjem Newtonovem zakonu. Za ilustracijo, da je teža prostorska sila, lahko uporabimo izkušnjo prostega pada. Skoraj v vsakem razredu najdemo učenca ali dva, ki sta prosti pad že osebno preizkusila. Zakaj se zdi, da se padajočemu dvigne želodec? Organi v našem telesu ostajajo na istem mestu zaradi mišic in drugega tkiva okoli sebe. Pri običajnih nadzorovanih legah telesa telo prepozna tudi, v katerem delu želodca je še nepredelana hrana, in to prepoznavanje je skladno z izkušnjami. A pri prostem padu medsebojne sile med deli telesa, torej da zgornji deli telesa pritiskajo na spodnje, izginejo, saj se vsak del telesa enako pospešuje zaradi lastne teže. Odsotnost tega pritiska pa možgani razložijo s tem, da se je hrana »dvignila« kot pri nekem drugem dogajanju, do katerega vodi slaba hrana ali preveč alkohola.

Že obravnavana teža je poseben primer gravitacijske sile, ki obstaja med vsemi telesi z maso. Ob njej velja omeniti, da je sila med običajnimi telesi sicer majhna, znatna postane šele pri telesih z velikimi masami. Fiziki se spomnimo, koliko komplikacij je bilo potrebnih za demonstracijski prikaz obstoja sile med telesi z maso. Na Pedagoški fakulteti poskus imamo, a nam ga še nikoli ni uspelo prepričljivo izvesti, ker je tako občutljiv na najmanjše tresljaje.

Skupina treh sil, gravitacijske, električne in magnetne, so sile, ki učinkujejo na daljavo. Razmislek, da morajo biti prisotna tudi polja, saj informacije o spremembah leg teles ali drugih okoliščin, ki vplivajo na te sile, ne morejo potovati hitreje od svetlobe, sodi k vpeljavi teh sil. Poleg tega za vse tri sile velja, da delujejo na posamezne dele reči, ki imajo določene lastnosti. Če del telesa ni prazen, potem masa in gravitacijska sila na del telesa nista vprašljivi. A razmislek, na katere dele nabitega telesa deluje električna sila, ni več enostaven. Če opazujemo sile med nabitimi kovinskimi telesi, so naboji površinski, in lahko bi tudi za silo rekli, da je ploskovna. Če opazujemo električno silo med nabitimi izolatorji, pa je treba vedeti, kam je bil naboj ob naelektritvi sploh nanesen. Še posebej problematična je električna sila med induciranimi naboji. Huh, o tem bi se dalo razpravljati precej dlje. Podobni razmisleki veljajo za magnetne sile.

Zdaj pa se na kratko posvetimo še zadnjim trem navedbam v tabeli. Centripetalna sila je ime, ki ponazarja učinek sile, ne pa njenega vzroka. Zanj moramo zato vedno opredeliti, katera od sil z gornjega seznama prevzema njeno vlogo. Centrifugalna, Coriolisova pa tudi sila, ki nasprotuje pospeševanju/zaviranju, sploh niso sile. Zanje pri najboljši volji ne moremo najti reči, ki jih povzročajo. Razprava o sistemskih silah, torej silah, za katere se pretvarjamo, da obstajajo, zato da lahko v sistemu, v katerem Newtonovih zakonov ne moremo uporabiti, uporabimo njihove »ponaredke«. Kako si pomagati z mahanjem rok za ponazoritev teh »sil«, je spet daljša zgodba.

Označevanje sil

Naj sklenem z nekaj splošnimi razmisleki. Fiziki v izobraževanju pravijo, da moramo za vsako silo vedno eksplicitno zapisovati točki a) in b), se pravi z besedami »sila Mihe na Marka«, pri čemer je Miha vzrok sile, na Marku pa opisujem njene učinke. Vsekakor je to nujno ob vpeljevanju sil. Povezano je z ozaveščanjem vzroka in iskanjem parov po tretjem Newtonovem zakonu, še posebej pri silah, kot so teža, sila podlage, lepenje, trenje in vzgon. A žal postaja govorjenje o silah, če strogo vztrajamo pri poimenovanju npr. »sila, s katero Zemlja deluje na Marka«, »sila, s katero podlaga deluje na Marka«, in tako dalje, dolgovezno, napihnjeno strokovno in oddaljeno od vsakdanje govorice. Morda je nekoliko bolje, če besedico »deluje« zamenjamo z bolj opisnimi glagoli, npr. »privlači«, »potiska«, »vleče«, a še vedno je razprava precej prisiljena. Enako se godi računskim izrazom, pri katerih se utapljam v indeksih, ki navajajo vzroke in posledice. Naš profesor Fizike 1 na fakulteti, prof. Mitja Rosina, je rekel,

Teža kot sila, s katero Zemlja privlači telesa, je izkustveno poznana.

Fiziki se spomnimo, koliko komplikacij je bilo potrebnih za demonstracijski prikaz obstoja sile med telesi z maso.

Razprava o sistemskih silah, torej silah, za katere se pretvarjamo, da obstajajo, zato da lahko v sistemu, v katerem Newtonovih zakonov ne moremo uporabiti, uporabimo njihove »ponaredke«.

da morajo biti indeksi dolgi, da ne pozabimo, kaj smo z njimi imeli v mislih. Pa si pogledjmo enostavno enačbo za pospešek Marka v dvigalu:

$$a_{Marko} = \frac{F_{podlaga\ dvigala\ Marko} - F_{Zemlja\ Marko}}{m_{Marko}}.$$

Če je tak izraz treba še kam vstaviti in izpeljevati naprej, si lahko predstavljamo, da se nam bodo učenci uprli, učitelj fizike pa se jim bo zdel čudak. A vendar pristop olajša marsikaj. Spet moje osebno mnenje je, da krajše oznake vpeljemo postopoma. Ko se učenci prvič srečajo z neko silo, zapišemo in ubesedimo vse na dolgo: »Sila Zemlje, ki deluje na Marka – $F_{Zemlja\ Marko}$ «. Nato postavimo strogo govorico v nekoliko bolj pogovorno okolje z opisom, ki uporabi več vsakdanjih besed: »Sila, s katero Zemlja privlači Marka – $F_{Zemlja\ Marko}$ «. V še naslednjem koraku je ta sila poimenovana še krajše »Sila teže Marka – $F_{g\ Marko}$ «. Ko pa so učenci že dobro usvojili koncept, postane poimenovanje kratko: »Teža Marka – $F_{g\ M}$ «. Za dobro mero pa v različnih obravnavah spomnimo učence še na dolgi/najdaljši zapis in identifikacijo vzroka za silo. Podobno si privoščimo z drugimi prej omenjenimi silami, kjer so dolgi zapisi lahko moteči. Ampak to je samo moje mnenje.

Moram priznati, da je tale prispevek precej dolgočasen. Nasula sem kopico razmišljanj, ki me prevevajo pri odgovorih študentov in pri obiskih študentskih nastopov, a gotovo niso nič novega. V nadaljevanju debate bi se bilo vredno dotakniti še risanja sil ter Newtonovih zakonov oziroma kako jih je mogoče v nekaterih okoliščinah narobe uporabljati.

Spet moje osebno mnenje je, da krajše oznake vpeljemo postopoma.

Literatura

- [1] Čepič, Mojca. Energija I: energijski zakon in mehanika. *Fizika v šoli*. 2017, l. 22, št. 1, str. 55–59.
- [2] Čepič, Mojca. Energija II: energijski zakon in primeri iz vsakdanjega življenja. *Fizika v šoli*. 2017, l. 22, št. 2, str. 54–59.