

# Kako predstavljamo sile

dr. Mojca Čepič

Pedagoška fakulteta, Univerza v Ljubljani

Pri predavanjih iz mehanike in didaktike fizike se s študenti pogosto zapletemo v debato, kako sile narisati nazorno, brez dvomov o njihovi velikosti, smeri, prijemališču in podobno.

Priznati moram, da odgovor ni popolnoma enostaven, saj upoštevanje samoumevnih pravil včasih vodi do zelo nepreglednih slik. Ker se prezentacije sil neposredno navezujejo na prejšnjo komunikacijo o silah, se jim posvetimo.

## Splošna pravila za risanje sil

Najprej povejmo nekaj splošnih pravil za risanje, ki vključuje sile. Silo predstavimo z usmerjeno daljico, torej s črto določene dolžine in smeri, ki ima označeno prijemališče sile in s puščico označeno smer delovanja sile. Puščica je običajno na enem koncu, a najdemo tudi predstavitev, kjer so puščice narisane na sredini črte, ki predstavlja silo, ali celo kjerkoli, kjer je na skici ostal prostor. O kraju, kjer je sila narisana glede na telo, na katero deluje, in prijemališču nekoliko kasneje.

Učenci zelo radi rišejo majhne slike. Smiselno je, da so slike dovolj velike, da je mogoče uporabiti primerna merila in so dobro vidne razlike med dolžinami vektorjev. Tako čez prst, enostavna slika naj zasede četrtno lista A4, nekoliko bolj kompleksna pa vsaj polovico lista v zvezku.

Poznamo tri načine prezentacij (slik, risb, skic):

- Slike so lahko *kvalitativne*, torej kažejo le, da na telo neka sila deluje, ne sprašujemo pa se o njeni velikosti. Običajno je informacija o smeri vseeno predstavljena. Kvalitativne slike so med fiziki redke.
- Ker se pri silah običajno pogovarjamo tudi o njihovih primerjalnih velikostih, torej ali so večje, manjše ali enake od nekega izbranega standarda na sliki, vsebuje mnogo več informacij *semikvantitativna* predstavitev. Taka predstavitev sicer ne omogoča razbiranja, kako velike sile dejansko so, iz puščic, a omogoča primerjavo sil, ugotavljanje, ali so sile med seboj enake ali ne, in podobno. Semikvantitativna prezentacija zahteva tudi, da so sile, ki se močno razlikujejo po velikosti, močno različnih dolžin tudi na sliki. Kadar so sile močno različne, npr. teža je desetkrat večja od vzgona, je semikvantitativno risanje kot ilustracija pojava tudi edino mogoče.
- *Kvantitativne* slike vsebujejo podrobnosti. Predstavljeno je merilo: npr. puščica, dolga 1 cm, predstavlja silo z velikostjo 1 N. Vse sile so narisane v skladu z merilom. Njihove vsote ali komponente so narisane natančno, sledeč navodilom za risanje sestavljenih rezultatov in razstavljenih komponent, iz slike lahko izmerimo dolžine neznanih sil ali njihovih komponent in iz teh dolžin izračunamo njihove dejanske velikosti.

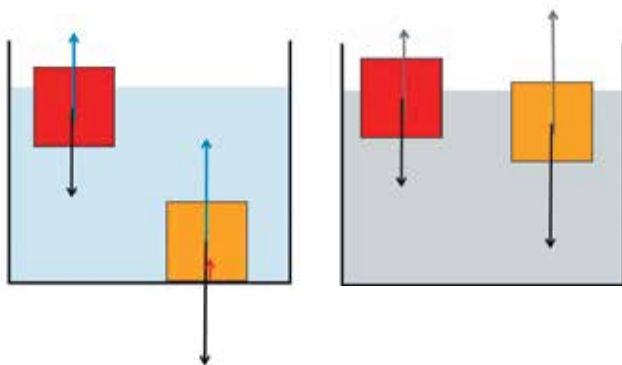
Moje izkušnje kažejo, da je semikvantitativno risanje zahtevnejše od kvantitativnega. Pri zadnjem učenci in študentje togo sledijo pravilom, ki jih vodijo do rezultata. Semikvantitativna skica zelo pogosto zahteva tudi razmislek, ocene, primerjave in podobno. Taki razmisleki so mnogo lažji s konkretnimi številkami, zato se učenci pogosto raje zatečejo k računom. Najlepše se težavnost razmisleka pokaže pri standardni predstavitvi vzgona, ki ga kaže slika 1.

### Naloga je enostavna

Kocki z enakim robom z gostoto  $1,2 \text{ kg/dm}^3$  in gostoto  $0,8 \text{ kg/dm}^3$  vržemo najprej v vodo. Iz vode kocki prestavimo v koncentrirano slanico z gostoto  $1,3 \text{ kg/dm}^3$ .

V semikvantitativnem merilu narišite vse sile, ki na telesi delujejo v vodi in v slanici.

Vse sile iz obeh primerov hkrati uredite po naraščajoči velikosti, uporabite znaka  $<$  in  $=$ .



(a) Kocki v vodi.

(b) Kocki v slanici.

**Slika 1:** Rdeče telo ima gostoto  $0,8 \text{ kg/dm}^3$ , rumeno pa  $1,2 \text{ kg/dm}^3$ . Sile so označene z barvno kodo, teža je črna, vzgon v vodi moder, sila podlage rdeča, vzgon v slanici pa siv.

Prvi problem je konsistentnost obeh slik. Tudi v učbenikih pogosto vidimo zelo različno narisane predstavitve plavajočih in potopljenih teles. Dejansko avtorji obravnavajo različna telesa v različnih tekočinah, a to pogosto vodi do napačnih zaključkov, če iz ene v drugo tekočino prestavimo isto telo. Naslednja težava je izbira »standarda«, ker naloga nima podatkov o velikostih stranic. Nekateri rešijo težavo tako, da si velikost stranic izmislijo, drugim je treba pomagati, le redkim poznavanje nekaterih podatkov in umanjkanje drugih ne dela težav.

Pravilna semikvantitativna slika vsebuje naslednje komponente:

- Puščica, ki ponazarja težo rumenega telesa, je približno polovico daljša od puščice za težo rdečega.
- Velikosti vzgonov na plavajoča telesa morajo biti enake težam teh teles.
- Velikost vzgona na potopljeno telo mora biti večja od velikosti vzgona na plavajoče telo, a manjša od teže

tega istega telesa. Manjkati ne sme približno pravilna sila podlage.

Konsistentnost slike preverja še urejanje sil. Poimenujmo telesi A (rdeče) in B (rumeno), tekočini pa 1 (voda) in 2 (slanica). Sile pa  $F_g$  (teža),  $F_v$  (vzgon) in  $F_p$  (podlaga). Indeksi se podaljšajo s poimenovanji, npr.  $F_{v,1B}$  je vzgon na telo B v vodi. Sil je sedem, v naraščajočem zaporedju si sledijo tako:

$$F_{p,B} < F_{gA} = F_{v,1A} = F_{v,2A} < F_{v,1B} < F_{g,B} = F_{v,2B}.$$

Naloga ima variacije, spreminjamo lahko razmerja stranic, gostote materialov predmetov, gostote tekočin, oblike predmetov, npr. valj namesto kocke, kjer lahko enostavno podvojimo prostornino. Presenetljivo je, kako hitro tudi študentje bleknejo, da ima kocka z robom  $2a$  dvakratnik prostornine. Linearno razmišljanje res sedi zelo globoko v možganih.

## Točkovne sile

Za začetek se lotimo risanja sil, o katerih smo razpravljali zadnjič. Kjer lahko prihaja do problemov z nazornostjo ali s ponazarjanjem fizikalnih zakonitosti, bomo o morebitnem problemu pod tabelami še razpravljali.

**Tabela 1:** Točkovne sile

Vrsta sile	Slika
poteg, vlek	
potisk, stisk	

O točkovnih silah smo že govorili kot o aproksimaciji, da je površina, na katero deluje sila, zelo majhna v primerjavi s površino predmeta. Zato položaj prijemališča sile ni problematičen. Prijemališče sile se nahaja na delu telesa, kjer sila deluje. Toda ali je ta točka tudi nujno »začetek« puščice, ki ponazarja silo? Tukaj so mnenja deljena. Glede na to, da je vektor sile abstraktna predstavitev, ki ga v mnogih postopkih predstavljamo sem in tja po papirju, npr. pri seštevanju sil ali pri risanju diagrama sil na telo, ki ni točkasto, je morda smiselno sprejeti drugačen dogovor. Prijemališče se vedno nahaja v točki, kjer sila deluje. Vektorsko ponazoritev sile pa narišemo tako, da slika ostane nazorna. V drugem primeru, torej pri ponazoritvi »potiska«, je analiza dogajanja lažja, če je okoli sile prostor – pa še ponazoritev opozarja učenca v skladu z njegovimi izkušnjami, da telo potiskamo. Alternativna ilustracija na desni zelo hitro vodi do zaključkov, da predmet vlečemo od znotraj, da je skozi predmet napeljana vrstica itd. Za analizo to sicer ni pomembno, a ker ni v skladu z izkušnjami, učence kaj hitro utrdi v mnenju, da šolska fizika nima povezave z realnostjo.

## Površinske sile

Površinske sile so večja težava. Pojem »prijemališče« je bolj abstrakten in zahteva dogovor. Sile včasih delujejo vzdolž površin, npr. trenje in lepenje, kar otežuje nazorno risanje. Čeprav so sile površinske, je včasih prijemališče v samem telesu.

Posvetimo se najprej prijemališču. Prijemališče se načeloma nahaja v točki, v kateri bi rezultanta površinsko razporejenih sil imela enak učinek, če bi delovala točkovno. To pravzaprav pomeni, da bi v tej točki rezultanta povzročala enak navor okoli poljubne osi kot prostorsko razporejena sila. V tabelah 2 in 3 so prijemališča označena, a niso vedno enakih barv. Razlika v barvah je nastala zgolj zaradi kontrasta oziroma nazornosti in nima drugega pomena.

Sila podlage je nedvomno površinska sila. Razprave o tem, ali vanjo vključiti tudi lepenje oziroma trenje, ker je zanj vzrok isto telo, ne bom ponavljala [1]. Posvetimo se raje risanju. Sila podlage je za učence vedno problematična, ker ni omejena samo na silo, ki nasprotuje teži, ampak ima lahko poljubno smer in velikost. Pomislimo le na udarec loparja po žogici, »podlaga« udari žogico. Podlaga je zelo splošen pojem in ni nujno povezan z velikimi površinami, ki so le v delnem stiku s predmetom. Zadnja slika v prvi vrsti kaže obrnjeno situacijo, za tla ima vlogo »podlage« predmet, saj povzroča silo na tla zaradi deformacije ob stiku. Dokler je sila podlage omejena

na silo, ki je na podlago pravokotna, je risanje enostavno. Prijemališče sile podlage je v geometrijskem središču stične ploskve. To seveda ne velja popolnoma, če je telo asimetrično obremenjeno, a naj bo to izjema.

Risanje pa postane bolj težavno pri ponazoritvah lepenja in trenja. Na slikah v drugi in tretji vrstici Tabele 2 je najprej predlog, da se lepenje in trenje vedno ponazarjata skupaj z vzrokom zanju. Pri lepenju so to sile, katerih komponente so vzporedne s podlago. Seveda to še ni vse. Lepenja brez sile podlage tudi ni. Ali dodajati še silo podlage povzročeno od sil na telo, ki imajo komponente pravokotne na podlago, je vprašanje. Za popolno in nazorno obravnavo problema seveda morajo biti prisotne. A ob razmišljanju, kaj naj ponazoritev lepenja vsebuje, verjetno zahteva po celoviti sliki dogajanja presega sam dogovor, kako silo risati. Podobno velja za trenje, menim, da slika mora vsebovati relativno smer gibanja enega predmeta na drugega.

Drug problem je prijemališče. Če je stik med ploskvama homogen, torej obe površini stika sta po celotnem stiku enaki, potem je prijemališče sile v »geometrijskem težišču« površine stika. Če narišemo začetek puščice, ki ponazarja lepenje, v tej točki, leži puščica vzdolž črte, ki omejuje telo, kot vidimo pri prvi ponazoritvi lepenja. Na beli tabli je precej enostavno narisati obarvano črto prek črne, v zvezku pa ne. Zato menim, da se je bolje z učenci dogovoriti in puščico premakniti na rob predmeta. Pri

tem je treba vedno ozaveščati, da je tak način namenjen zgolj lažjemu in bolj nazornemu risanju ter opozarjati, da prijemališče sile lepenja/trenja še vedno ostaja, kjer je bilo. Prijemališče je sicer označeno na sliki v Tabeli 2 in je fizično ločeno od ponazoritve sile, vendar menim, da je v tem posebnem primeru bolje izpustiti označevanje prijemališča.

Podoben razmislek velja za upor sredstva, potrebna je oznaka hitrosti z ustrezno označenim vektorjem. Za prijemališče upora sredstva velja podobno kot za potisk, zato predlagam, da je prijemališče v »središču« površine (vsaj za simetrična telesa to velja), puščica, ki ponazarja velikost in smer upora sredstva, pa ima vrh v prijemališču. Na ta način je slikovno ponazorjeno dejansko dogajanje pri premikanju teles skozi sredstvo, sile v prostoru okoli telesa pa so v tem primeru bolj nazorne.

Tabela 2: Površinske sile

Vrsta sile	Slika
sila podlage	
lepenje	
trenje	
upor sredstva	
vzgon	

Zadnja površinska sila je vzgon. Vzgon povzroča tlak tekočine okoli predmeta, rezultanta vseh »delnih« sil na dele predmeta pa je enaka teži izpodrinjene tekočine in usmerjena nasprotno teži. O teži lahko govorimo v posplošenem smislu. V pospešenih sistemih se prav tako pojavijo vzgonske sile, ki imajo nasprotno smer od sistemskih sil. A pri risanju obravnavajmo le osnovni primer, kjer se vzgon pojavi zaradi gravitacije. Čeprav je sila površinska, je njeno prijemališče v težišču izpodrinjene tekočine. Natančno narisane slike dobro pokažejo, zakaj se lahko nenadoma obrnejo ledene gore. Pri enostavnih telesih, kot so kocke in krogle, pa pogosto naletimo na težavo. Prijemališče teže in prijemališče vzgona ležita razmaknjeno na isti premici. Smiselno je, da ponazoritvi nekoliko zamaknemo, a se o tem dogovorimo podobno, kot smo se dogovorili za ponazarjanje trenja in lepenja.

## Prostorske sile

Nadaljujmo še s prostorskimi silami, ki smo se jih pri vzgonu že nekoliko dotaknili. Sile v homogenih poljih, npr. gravitacijskem, električnem ali magnetnem, so preproste. Prijemališča sil sovpadajo s težiščem telesa, tudi kadar se pojavi influenza. V nehomogenih poljih pa postane pomembno ponazarjanje prijemališč, saj se lahko pojavijo navori in podobno.

Najprej se posvetimo teži. V homogenem gravitacijskem polju oziroma krajše, na Zemlji, pa seveda na planetih in njihovih lunah, je ta sila enostavna. Kaže vedno proti središču nebesnega telesa, prijemališče ima v sredini homogenega telesa oziroma v masnem središču nehomogenega. Za nehomogeno telo je treba to točko določiti s poskusom ali računom. Na zemlji je s smerjo teže določena navpičnica. Različnost smeri navpičnice v različnih krajih pa lahko opazimo šele na veliki sliki, npr. pri Era-

tostenovem določanju polmera Zemlje ali z opazovanjem sence ob istem času na različnih krajih na Zemlji.

Med telesi v vesolju je gravitacijska sila enostavna, dokler so telesa krogelno simetrična. Tedad je njeno prijemališče v središču telesa. Če pa telesa niso krogelno simetrična, se težišče, kjer je prijemališče gravitacijske sile, in masno središče telesa, ki določa, kako se bo telo gibalo pod vplivom sil, lahko razmakneta. Ta podrobnost je zahtevna za dojetanje učencev, a razprava o padanju v črno luknjo včasih zahteva tudi take podrobnosti.

Tudi pri električnih silah veljajo podobni razmisleki in jih lahko z upoštevanjem smeri zaradi privlaka ali odboja kar preslikamo iz gravitacije. A to velja le tako dolgo, dokler so nabita telesa idealni izolatorji z dielektričnostjo 1. A takih teles ni. V vsakem realnem telesu se pod vplivom električnega polja naboji nekoliko ali močno prerazporedijo in spet: razmakneta se masno središče telesa in središče naboja, kot je nakazano na tretji sliki v vrsti. Naboji se namreč pomaknejo proti nasprotno predznačenim nabojem drugega telesa ali odmaknejo od enako predznačenih zaradi influence in polarizacije. Tudi to je eden od razlogov, da je težko z demonstracijskim eksperimentom pokazati, da se električna sila med nabitima kroglicama zmanjšuje s kvadratom razdalje.

Nazadnje omenimo še risanje magnetnih sil. Pri magnetih se enaki poli odbijajo, nasprotni pa privlačijo, kar kaže slika. A opazimo tudi, da so prijemališča magnetnih sil pomaknjena proti robu paličastih magnetov. Razlog je enak kot pri gravitacijski sili. Magnetna sila je na bližnje dele magnetov večja kot na medsebojno bolj oddaljene, kar premakne prijemališči bližje skupaj. Podobno velja za silo med magnetom in feromagnetnim materialom, le da je premik prijemališča proti magnetu še večji, saj

se feromagnet v magnetnem polju najprej magnetizira, nato pa sila deluje med »novonastalim« magnetom v npr. železu in magnetom, ki je magnetizacijo povzročil.

## Zaključek

Na tem mestu bi razpravo o risanju sil končala. Ko sem se članka lotila, se mi je zdelo, da ni o ničemer razpravljati, a čim bolj sem razmišljala o podrobnostih, več problemov se je porajalo in več razmislekov o rešitvah je bilo potrebnih. Prispevek berite zgolj kot predlog za razmislek, pogovorimo se o teh predlogih in skupaj najdemo učinkovite rešitve.

Tabela 3: Prostorske sile

Vrsta sile	Slika
teža	
gravitacijska sila	
električna sila	
magnetna sila	