

Međunarodni sustav jedinica i uloga metrologije u njegovom razvoju

Lučić, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:292742>

Rights / Prava: [In copyright](#)/Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-25**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO – MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Domagoj Lučić

MEĐUNARODNI SUSTAV JEDINICA I
ULOGA METROLOGIJE U NJEGOVOM
RAZVOJU

Diplomski rad

Zagreb 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: FIZIKA, nastavnički

Domagoj Lučić

Diplomski rad

**Međunarodni sustav jedinica i uloga
metrologije u njegovom razvoju**

Voditelj diplomskog rada: prof. dr. sc. Damir Veža

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2017.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Damiru Veži na pruženom znanju, strpljenju i pomoći pri pisanju ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se dr. sc. Maji Planinić na pomoći pri pisanju metodičkog dijela diplomskog rada.

Najviše se zahvaljujem svojoj obitelji na razumijevanju, strpljenju i podršci. Ovaj diplomski rad posvećujem vama.

Sadržaj

Međunarodni sustav jedinica najrasprostranjeniji je sustav mjernih jedinica u svijetu. Svoje ime „SI – sustav“ (franc. *Système International d'unités*) dobio je 1960. godine na 11. Generalnoj konferenciji za utege i mjere, a od 1971. godine do danas temelji se na 7 dobro utvrđenih osnovnih jedinica iz kojih se, ovisno o njihovom međusobnom odnosu, matematičkim operacijama mogu izvesti sve ostale, tzv. izvedene jedinice. Osnovne jedinice SI sustava su: metar (m), kilogram (kg), sekunda (s), amper (A), kelvin (K), kandela (cd) i mol (mol). Znanost o mjerenju naziva se metrologija i za nju možemo reći da nosi titulu najstarije znanosti svijeta. Mjerenje je postojalo puno prije nego je nastao SI sustav, štoviše možemo reći da je mjerenje staro gotovo koliko i čovječanstvo jer se pojavom prvih ljudi javlja početak čovjekovog metrološkog koncepta. Iako smo od te polazne točke daleko, kako vremenom tako i prostorom, ljudi su i tada, slično kao i danas, stavljali naglasak na važnost točnog mjerenja. Do razvoja i pojave metarskog sustava, kada su predstavljani prvi međunarodni mjerni standardi u obliku tvornih pramjera metra i kilograma, postojao je velik broj različitih mjernih jedinica koje su služile za mjerenje iste veličine što je otežavalo trgovinu, promet, oporezivanje i ostale ljudske djelatnosti. Razvojem znanosti i ljudske djelatnosti povećavao se broj potrebnih mjernih jedinica, što je povlačilo potrebu za međunarodnim mjernim jedinstvom kako bi zemlje i narodi olakšali komunikaciju i širenje ideja. U ovom radu opisan je razvoj SI sustava jedinica, počevši od antropometrijskih mjernih jedinica koje predstavljaju početak čovjekovog metrološkog koncepta, preko Konvencije o metru i SI sustava koji je danas u upotrebi pa sve do prijedloga o redefiniranju postojećeg SI sustava jedinica, čija se odluka očekuje 2018. godine. Također, opisani su osnovni metrološki pojmovi, poput mjerenja i mjerne jedinice, te koncepti i ideje metrologije, a u metodičkom dijelu opisani su problemi sa učeničkom interpretacijom rezultata mjerenja i pripadajuće pogreške mjerenja, te je napravljen osvrt na članak o istraživanju učinka grafičkog prikaza rezultata na učeničko razumijevanje rezultata i pripadajuće pogreške mjerenja.

The International System of Units and the role of metrology in its development

Abstract

The International System of Units is the most widespread system of units in the world. The name „SI system“ (French for *Système International d'unités*) was given by the 11th General conference on weights and measures in 1960., and as of 1971. it is based on seven well defined base units from which all the other units can be derived using an appropriate mathematical operation. The SI base units are: the metre (m), the kilogram (kg), the second (s), the ampere (A), the kelvin (K), the candela (cd) and the mole (mol). Metrology is the science of measurement and we can safely say that it is the oldest science in the world. Measurement is almost as old as humanity because with the emergence of man came the birth of his metrological concepts. Although it seems like we are far away from that point, both in time and space, people then, much like today, emphasized the importance of correct measurement. Until the birth of the metric system, when the first international standards were made and introduced in the form of objects (the metre and the kilogram), there was a huge number of physical units that were used to measure the same quantity. This made trade, taxation and other human activities very difficult. As science and human activities evolved, the need for international unity in the world of units was apparent. In this thesis the evolution of the SI system is described, beginning with the anthropometric units which mark the beginning of mans metrological concepts, and ending with the proposition to redefine today's SI system of units. Also, the basic metrological ideas and concepts are described.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Povijest mjernih jedinica u svijetu prije pojave SI sustava jedinica.....	3
2.1. Prapovijest i antropometrijske jedinice.....	3
2.2. Standardizacija mjernih jedinica.....	10
2.2.1. Od karata do kilograma.....	12
2.2.2. Lakti i druge prastare jedinice.....	16
3. Metarski sustav i konvencija o metru.....	19
3.1. Metar i metarski sustav.....	19
3.2. Konvencija o metru.....	20
4. Metrologija.....	25
4.1. Nezaobilazni dio svakodnevnog života.....	25
4.2. Zadaci i podjela metrologije.....	26
4.3. Mjerenje fizikalne veličine, mjerne jedinice, pramjere ili etaloni.....	31
4.3.1. Fizikalne veličine i mjerenje fizikalnih veličina.....	31
4.3.2. Nepouzdanost ili pogreška u mjerenju.....	33
4.3.3. Analiza rezultata mjerenja.....	35
4.3.4. Mjerna jedinica i mjera.....	37
4.3.5. Etaloni ili pramjere.....	38
5. CGS, MKSA i SI sustav jedinica.....	42
5.1. CGS sustav jedinica.....	42
5.2. Giorgi ili MKSA sustav jedinica.....	43
5.3. Međunarodni (SI) sustav jedinica.....	44
6. Mjerne jedinice SI sustava.....	45
6.1. Osnovne jedinice.....	45
6.2. Izvedene jedinice.....	46

6.3. Jedinice izvan SI sustava.....	49
6.4. Predmeci SI jedinica.....	50
6.5. Realizacija jedinica metar, kilogram i sekunda.....	50
6.5.1. Metar.....	50
6.5.2. Kilogram.....	52
6.5.3. Sekunda.....	52
7. Budućnost SI sustava.....	55
8. Metodički dio.....	58
8.1. Problemi s interpretacijom mjerenja i pogreške mjerenja u srednjoškolskoj nastavi fizike.....	58
8.2. Rezultati i zaključak.....	61
9. Zaključak.....	66
Dodaci.....	67
A – Test sa grafičkim prikazom rezultata.....	67

1. Uvod

U starom Egiptu, otprilike 3000 godina pr. Kr., smrtna kazna smiješila se državnom službeniku koji je zaboravio ili zapostavio svoju dužnost baždarenja standardne mjerne jedinice za duljinu svakog punog mjeseca. Takva kazna prijetila je i arhitektima na kraljevskom gradilištu u antičkom Egiptu odgovornim za izgradnju faraonskih hramova i piramida. Iako nam se čini kao da smo toliko daleko od te točke, kako vremenom tako i prostorom, čovječanstvo je i tada, isto kao i danas, stavljalo velik naglasak na važnost *točnog* mjerenja. U ranom stadiju poznavanja prirode javila se potreba za mjerenjem fizikalnih veličina i ona je rasla s razvojem društva, usložnjavanja proizvodnje i čovjekove znanstvene djelatnosti. U skladu sa čovjekovim razvojem stvarala se i razvijala njegova djelatnost pa je time rastao i broj fizikalnih veličina, a time i broj potrebnih mjernih jedinica kojima su se te veličine mjerile. Utezi i mjere su, dakle, jedni od prvih alata koje je primitivni čovjek izumio.

Mjerenje je staro gotovo koliko i čovječanstvo i svima je dobro poznato jer je integrirano u naš svakodnevni život, bez obzira da li smo svjesni te ovisnosti ili nismo. Najjednostavniji primjer koji vrijedi za svakog pojedinca su naša osjetila. Oči nam pružaju najviše informacija o vanjskom svijetu. Gotovo jednako bitne su uši, koje primaju i registriraju zvukove. Osjetilo njuha može biti od presudne važnosti u slučaju neispravnog ventila na plinskoj boci u vašoj kuhinji. Pomoću naših osjetila moguće je uspoređivati težine i čvrstoće predmeta, kvalitetu površine, toplinu i hladnoću. Svi ti naši mjerni „instrumenti“ pomažu nam u stjecanju znanja o vanjskom svijetu i oni su „ugrađeni“ u svakog pojedinca. No ipak, na osjetila se ne možemo u potpunosti osloniti zbog toga što nam ona daju subjektivnu percepciju svijeta koji nas okružuje i često su podložna nepouzdanosti i pogreškama. Poznato je da se neke pojave ponavljaju uvijek i na jednak način ako su izazvane jednakim poticajima i pod jednakim okolnostima. Međutim, pojave oko nas ne doživljava svaki čovjek na isti način, nego je to doživljavanje uvjetovano našim zdravljem, trenutnim raspoloženjem itd. Stoga svaki čovjek reagira na određene poticaje na drugačiji način, pa čak ni ista osoba na ponovljenu pojavu neće reagirati na isti način. U doba kada su ljudi živjeli u malim skupinama taj subjektivni doživljaj svijeta možda i nije predstavljao veliki problem, ali kako su se ljudi razvijali razvijala se i znanost, a znanost se ne može temeljiti na subjektivnom ljudskom doživljaju svijeta. Znanost se temelji na objektivnim činjenicama i iskustvu, a objektivne činjenice i iskustvo se utvrđuju i stječu samo mjerenjem. Može se slobodno reći da znanost počinje onda kada je započelo mjerenje.

Dakle, rađanjem znanosti rodila se i potreba za *točnim* mjerenjem. Znanost o *mjerenju*, a ona se ujedno smatra i najstarijom znanošću, zove se *metrologija*.

Kako su zajednice u kojima su ljudi živjeli postajale sve veće, tako su i mjerenja postajala kompleksnija. Izumom brojčanih sustava i matematike stvorila se prilika da se stvori cijeli sistem mjernih jedinica koji će se moći koristiti u trgovini, prometu, podjeli zemljišta, oporezivanju, znanstvenom istraživanju i svim ostalim ljudskim djelatnostima. Međutim, zbog ograničene povezanosti zemalja za razmjenu dobara i ideja nije čudno da se u raznim dijelovima svijeta razvilo više različitih sustava mjernih jedinica koje su služile mjerenju istih veličina, nekada čak i u istoj državi. Na primjer, prije Francuske revolucije u Europi je postojala 391 jedinica imena *funta* (pound) i 282 jedinice imena *stopa* (foot), stoga da su se sve razlikovale u veličini.[1] Ta raznolikost mjernih jedinica u određenom stupnju razvoja društva postaje kočnica pri uspostavljanju, razvijanju i širenju trgovačkih, tehnoloških, ekonomskih i znanstvenih veza među državama i narodima. Javlja se potreba za povezivanjem svih mjernih jedinica u jedan *jedinstven mjerni sustav* koji će zadovoljiti potrebe na globalnoj razini.

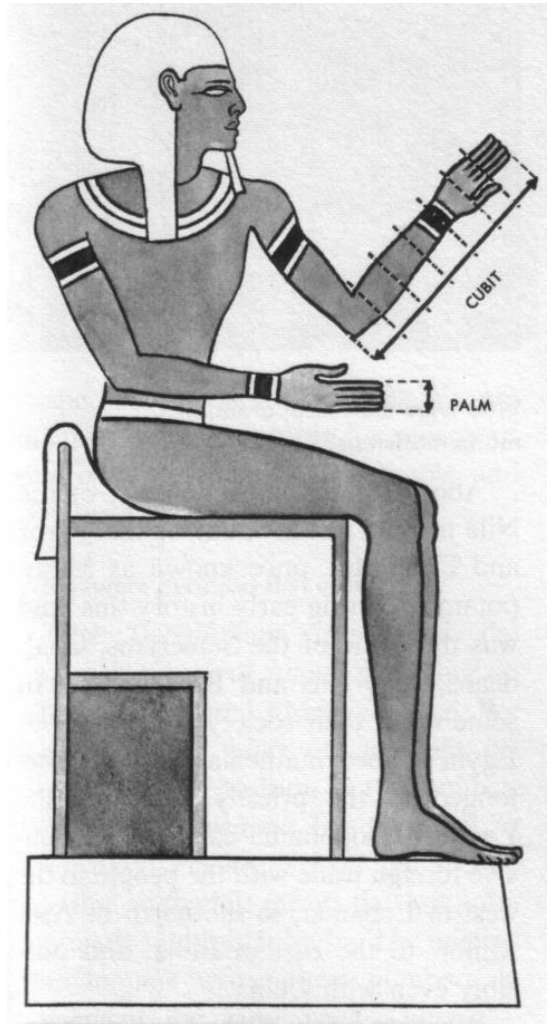
Krajem 18. stoljeća u Francuskoj započinje Francuska građanska revolucija čije je najveće dostignuće bilo ukidanje feudalnih odnosa i nepravdnosti u Francuskoj i u velikom broju drugih europskih zemalja. Jedna od svjetski najutjecajnijih posljedica revolucije bilo je „rođenje“ Metričkog sustava – preteče današnjem Međunarodnom (SI) sustavu jedinica. Tada su prvi puta predstavljene tvarne pramjere metra i kilograma kao definicije navedenih mjernih jedinica, od kojih se model kilograma i dan danas koristi. U Hrvatsku je SI sustav jedinica uveden 1. siječnja 1981. godine. Od tog datuma mjerne jedinice SI sustava su prihvaćene kao standardne, a sve ostale su postale nelegalne. Isto tako je sa svim ostalim zemljama koje su prihvatile SI sustav jedinica kao standard. Zbog toga Apple, jedan od najvećih proizvođača mobitela na svijetu, može proizvoditi dijelove u tvornici u Japanu bez straha da neće odgovarati veličinom. Amerika i Japan pričaju istim jezikom ako pričaju „jezikom mjernih jedinica“.

2. Povijest mjernih jedinica u svijetu prije pojave SI sustava jedinica

2.1. Prapovijest i antropometrijske jedinice

Prapovijest je najstarije i najduže razdoblje ljudske povijesti. Početkom toga doba smatra se vrijeme od pojave prvog čovjeka, a kraj razdoblje kada su napravljeni prvi pisani, historiografski uporabljivi dokumenti, odnosno doba kada se smatra da su ljudi postali pismeni. Budući da se pisani dokumenti kod različitih naroda javljaju u različito doba, granica između prapovijesti i povijesti nije konkretno definirana. Tako je, na primjer, u Egiptu i Mezopotamiji ta granica određena na otprilike 3500. godina prije Krista, dok je u Italiji i Grčkoj potkraj 6. stoljeća prije Krista. Prapovijest se dijeli na dva velika razdoblja – kameno doba i željezno doba.

Utezi i mjere su jedni od prvih ljudskih izuma. Zbog toga možemo reći da je mjerenje staro gotovo koliko i čovječanstvo. Izum „mjerenja“ ne možemo vezati ni za koga, ali možemo reći da je metrološki koncept započeo pojavom prvog čovjeka. Potreba za mjerenjem odnosila se na jednostavne svakodnevne zadatke, kao što su izrada nastambe, izrada odjeće, nakita, posuda, oružja i oruđa, te za trampu različitih dobara. Mjerne jedinice kojima su se služile primitivne skupine ljudi nazivaju se *antropometrijske mjerne jedinice*, koje se oslanjaju na izmjere ljudskog tijela. Neke od najčešće korištenih antropometrijskih jedinica su lakat, prst, raspon, stopa, korak itd. Na primjer, jedna od prvih mjera za duljinu bio je egipatski kraljevski lakat ili drugim nazivom *kubit*. Duljina kubita bila je jednaka duljini podlaktice od lakta do ispruženog srednjeg prsta plus širina dlana (eng. palm) tadašnjeg faraona na vlasti.[2]



Slika 1: Egipatski kraljevski lakat [2]

Veliki korak u napretku, koji je čovjeka zauvijek odvojio od životinja, javio se kada su prvi ljudi počeli obrađivati sirovine poput kamena, kosti, drva i slično za izradu oruđa koja su im pomagala u svakodnevnim zadacima. Poznato je da se neke životinje koriste „alatkama“ koje pronadu u okolini te se njome služe za pronalazak hrane, ali njihovo se ponašanje više temelji na instinktu nego planiranju. Iako, nije svako takvo ponašanje isključivo instinktivno; čimpanze u divljini ponekad love termite grančicom koju oblikuju isključivo za tu svrhu ili koriste kamenje za razbijanje tvrdih plodova, jedan veći kamen koji im služi kao „nakovanj“ i jedan manji koji služi kao „čekić“. Zanimljivo je da majke prenose to znanje svojim mladuncima pa takvo korištenje alata nije više instinktivno, nego naučeno.

Važno je razlučiti uporabu alata od izrade alata. Po svemu sudeći, čovjek je jedino živo biće na Zemlji koje od sirovih materijala izrađuje alate koje koristi za izradu novih alata. Stupanj čovjekovog razvoja može se mjeriti oruđem i oružjem za lov koje je koristio.

Najčešće oruđe preostalo od prvih ljudi jest kremenjača. Izrađivači oruđa prvo kameno oruđe oblikovali su metodom okresivanja (kamen o kamen) ili udaranjem štapom kako bi s njega skidali višak tzv. odbojke oblikujući kamen u oruđe poput sjekira. Nakon sjekire, šiljak je bio idući izum koji je služio za rezbarjenje rogova i kosti te pravljenje figurica (uglavnom ženskih) od istih materijala. Majstori su izrađivali i finije predmete koji su se upotrebljavali za precizne radnje, kao što su igla i udica. Do sljedećeg važnog iskoraka došlo je kada su izrađivači oruđa otkrili da mogu kombinirati materijale. Tako su vezanjem kamene oštrice za drveni štap rođene prve sjekire. Kombiniranjem dlaka sa malim štapićima izrađivali su kistove kojima su oslikavali špilje.



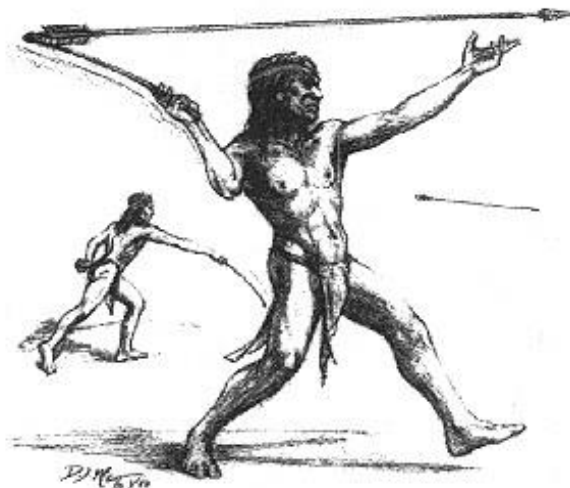
Slika 2: Kremenjača [3]

U prapovijesnom razdoblju se javljaju i počeci lončarstva. Najstariji lončarski proizvodi stariji su od 12 000 godina i potječu iz Japana. Jednom od tehnika komad gline se izdubljivao prstima, a drugom tehnikom se jedan jedinstveni komad gline valjao i rastezao, a zatim omotao u željeni oblik. Stanovnici Afrike i Bliskog istoka tu su tehniku otkrili oko 3000 godina kasnije.[4]

Jedni od ključnih izuma kamenog doba bili su „izbacivač koplja“ i „luk i strijela“. Izbacivač koplja služio je kao produžetak ruke, omogućujući prvim lovcima izbacivanje

koplja dodatnom snagom. Luk i strijela je omogućila ciljanje i veću udaljenost s koje se moglo loviti te tako promijenila lov zauvijek. Vrhovi strijela i koplja bili su napravljeni od kamena što je zahtjevalo preciznu izradu.

Luk i strijela nisu se samo koristili za lov, možemo reći da su luk i strijela zajedno jedan od prvih mjernih instrumenata. Kako ljudske izmjere, odnosno antropometrijske jedinice, nisu baš bile praktične kada se mjerila veća udaljenost, „domet strijele“ koristio se kao mjerna jedinica za udaljenost.[5] Domet strijele predstavlja najdalju udaljenost iz luka ispaljene strijele. „Domet kamena“ je također jedna mjerna jedinica koja se koristila.[5] „Domet strijele“ je bila široko rasprostranjena mjerna jedinica koja se koristila u mnogim civilizacijama, a njena upotreba je umrla sa „smrti“ luka i strijele.



Slika 3: Lovac sa izbacivačem koplja [6]

Oko 8000. g. pr. Kr. stanovnici Bliskog istoka počeli su uzgajati usjeve. Uzgajali su uglavnom vrste pšenice i ječma. Divlje vrste pšenice nisu bile idealne za prehranu, jer su se njihovi dozreli klasovi raspadali. Uzgajivači su to riješili hibridizacijom (kombiniranjem različitih vrsta pšenice) kako bi stvorili nove vrste. Nove vrste pšenice koje su uzgojili polako su se proširile Sredozemljem, a potom i dalje. Poljodjelstvo se širilo zapadnom Azijom i Europom iz središnjeg područja Sirije, Palestine, Irana, Iraka i Turske. Poljodjelci u jugoistočnoj Aziji svoje su usjeve razvili neovisno, dok su se u Sjevernoj i Južnoj Americi pojavili kasnije, oko 7000. g. pr. Kr.

Kada su počeli uzgajati razne kulture, poljodjelci su pripitomili i razne divlje životinje, npr. svinje i goveda. Na taj način osigurao se izvor mesa bez potrebe za odlaskom u lov, kao i pomoćna radna snaga poljodjelicima. Pripitomljavanje je često mijenjalo izgled određene vrste. Tako su se divlje životinje poput vuka, divlje svinje i Azijskog muflona s vremenom promijenile u psa, svinju i ovcu.

Za vrijeme neolitika se dogodio ubrzani napredak ljudske kulture – primarno zbog zemljoradnje i pripitomljavanja životinja. Novi sjedilački stil tražio je nove tehnologije i oblikovao početak modernog oblika naselja.[7] Gradovi i trgovina počeli su se razvijati istodobno s poljodjelstvom, na istim područjima svijeta. Prvi stanovnici grada bili su obrtnici, svećenici i trgovci. Prehrana im je ovisila o okolnim poljodjelicima na imanjima, a trgovina o udaljenim područjima. Prvi gradovi nastali su na mjestima s pouzdanim izvorima vode; uz obližnje planine na kojima su stanovnici mogli uzgajati divlje usjeve i s dovoljno kiše za usjeve. Jerihon, na Bliskome istoku, vjerojatno je bio prvi grad, podignut oko 8000. g. pr. Kr. Imao je snažan kameni zid, kulu i obrambeni opkop te brojno i dobro organizirano stanovništvo.



Slika 4: Ilustracija antičkog Jerihona [8]

U razdoblju od 7000. do 6000. g. pr. Kr. ljudi su otkrili da određene vrste stijena, rude, pri zagrijavanju daju čisti metal. Metal se potom mogao iskovati ili se mogao taliti i lijevati u kalupe, čime su se dobivali korisni predmeti.[4]

U Europi se pojavljuju prvi veliki kameni spomenici zvani *dolmeni*. Potječu približno iz 4500. g. pr. Kr., a riječ je o ostacima starodrevnih komora, s plosnatim kamenom postavljenim na uspravljeno kamenje, što je dokaz velikog poznavanja graditeljske vještine.

Iako su antropometrijske mjere na prvi pogled praktične, ako bolje razmislimo zaključiti ćemo da postoji jako puno prostora za nespornost i da se ne možemo uvijek sasvim pouzdati u njihovu točnost. Nepraktičnost antropometrijskih jedinica uviđamo tek kada na njih gledamo kroz filter 21. stoljeća. Kako potrebe društva variraju ovisno o tome u kojem vremenu i okolnostima se nalazi, tako varira i potreba za točnim i preciznim mjerenjem. Antropometrijske jedinice su bile vrlo praktične iz dva razloga: bile su općenito razumljive i uvijek dostupne. Manje nedosljednosti zbog razlike u duljini udova svakog pojedinca nisu sa sobom nosile velike posljedice, na primjer duljina noge pa samim time i koraka ili prsta pa time i pedlja.[5] Ako bi došlo do sukoba, iako rijetkog, uglavnom bi se postigao kompromis da obje strane budu zadovoljne. Reprezentativna priroda antropometrijskih jedinica osiguravala je mjerenje različitih stvari s različitom jedinicom. Tako se *stopa* koristila kada se sadio krumpir, *korak* kada se mjerila udaljenost općenito, a *lakat* kada se šivala odjeća. Svakodnevni zadaci određivali su mjerne jedinice sustava.

Dakle, možemo reći da je najraniji stadij razvoja čovjekovog metrološkog koncepta upravo korištenje antropometrijskih jedinica, koje odgovaraju dijelovima ljudskog tijela. Tek u kasnijem stupnju razvoja se javljaju jedinice izvedene iz uvjeta, ciljeva i ishoda ljudskog rada. Smjer u kojem će se metrološki sustav razviti ovisio je o uvjetima života i rada. Društva koja su raspolagala obiljem zemlje uglavnom su imala loše razvijen sustav za mjerenje površine. Međutim, Ašanti iz Afrike, u čijoj ekonomiji zlatna prašina služi kao valuta, imaju vrlo dobro razvijen sustav utega kojima mjere težinu zlatne prašine. Njihov pronalazak oduševio je ljude diljem svijeta jer na prvi pogled izgledaju kao nasumične male metalne skulpture, ali zapravo svaka od skulptura ima poznatu masu. U drugu ruku, nomadi iz Sahare, kojima je točna udaljenost do najbližeg bunara od životne važnosti, imaju vrlo bogat riječnik za mjerenje velikih udaljenost. Oni se služe izrazima kao što su *domet strijele* ili *kamena*, udaljenost koja se najdalje vidi iz stajaćeg položaja ili sa devinih leđa, *pješaka* udaljenost od zore do sumraka, *pješaka* udaljenost bez tereta ili s teretom itd.



Slika 5: Primjeri utega koje su koristili Ašanti iz Afrike [9]

Potencijalnih antropometrijskih jedinica je bilo mnogo pošto postoji mnogo dijelova tijela koja mogu koristiti kao mjera. Međutim, intelektualna prekretnica dogodila se prijelazom sa konkretnih na apstraktne koncepte – sa *moj lakat* ili *tvoj lakat*, na općeniti *lakat*. Takva bi se jedinica zvala „lakat općenito“ ili „lakat kao takav“; njena veličina bila je ustaljena u svakom trenutku (iako se mijenjala tokom vremena) i bila bi nešto duža ili kraća od „vašeg lakta“. Jedan primjer određivanja „stope općenito“ možemo vidjeti na slici (6) – nekolicina ljudi bi se stala u kolonu tako da im prsti stopala diraju petu onoga ispred sebe, zatim bi se izmjerila ukupna duljina tako poredanih stopala te bi se ta duljina podijelila sa ukupnim brojem ljudi u koloni. Mjere poput *lakta*, *stope* i *pedlja* bile su u upotrebi do nedavno, dok metarski sustav nije preuzeo ulogu u gotovo cijelom svijetu.

Jedno je sigurno – antropometrijske jedinice, nakon što su se tisućama godina razvijale i usavršavale, jednom kada su se razvile u koherentni sustav jedinica poslužile su ljudima jako dobro. Omogućile su ljudima da zadovolje svakodnevne potrebe i da ostave iza sebe besmrtna umjetnička i građevinska djela, kao što su npr. piramide.



Slika 6: Drvrez - određivanje duljine „stope općenito“ – Frankfurt 1536. [10]

2.2. Standardizacija mjernih jedinica

Odličan opis standardizacije jedinica dan je u tekstu [12]. Ovdje ću ga citirati u cjelosti.

„Mjerenje, načini mjerenja i mjerne jedinice zbog osobite važnosti za društveni poredak (razmjenu dobara i usluga, raspodjelu uroda, ulova ili plijena, plaćanje poreza, izmjenu zemljišta i dr.) u ljudskim su društvima od davnina dogovarani i uređivani, a u urednim društvima i propisivani prvim zakonima. Zakonitost mjernih jedinica u korijenima je društvene primjene mjeriteljstva od tih prvih ljudskih zajednica sve do današnjih država i suvremenoga globaliziranog svijeta.

Ustaljivanje (standardizacija) se mjernih jedinica (duljine, ploštine, obujma, mase, vremena i dr.), od pamtivijeka provodilo na nekoliko načina. Ponajprije je to ustaljivano običajima, potom dogovorima neke društvene skupine, a u organiziranim društvima propisima nekog autoriteta, obično vladara, vjerskog poglavara i sl. Tako ustaljene polazne mjerne jedinice i njihove mjere, tzv. pramjere, objavljivale su se proglasima, propisima,

zakonima, te svima na znanje izlagale na javnim mjestima: trgovinama, javnim spomenicima, u hramovima, javnim zgradama i sl.

Ustaljene su mjerne jedinice i njihove mjere, koliko nam je poznato, ponajprije nastale u prvim organiziranim državama Mezopotamije, a iz njih su se trgovinom, seobama, ratovima i drugim dodirima među ljudima širile svijetom.

Polazne se jedinice definiralo oslanjanjem na neke prirodne uzorke ili ih se povezivalo s autoritetima. Tako je, na primjer, mjerna jedinica duljine prst prvotno bio širina ljudskoga prsta, a potom je pouzdanije definirana kao ukupna duljina četiriju zrna nasumce uzetih iz ječmenog klasa. Jedinice su ojačavane i nazivima oslonjenima na autoritete: kraljevske jedinice, hramske jedinice i sl. Podrijetlo se nekih mjernih jedinica pripisivalo bogovima, polubogovima, junacima, važnim predcima, legendarnim pojedincima i dr. Takve nazive i podrijetla ne treba shvaćati doslovno, oni su ponajprije trebali osnažiti autoritarnost tih jedinica.

O postojanju, nazivima, vrijednostima i uporabi tih prastarih mjernih jedinica saznajemo izravno iz usmenih predaja, starih zapisa i natpisa, iz njihovih sačuvanih ostvarenja mjernim štapovima, urezima na spomenicima, posudama, utezima i dr., a posredno iz izmjera građevina, uporabnih ili ukrasnih predmeta i sl., koje se pronalaze pri arheološkim istraživanjima.

U prošlosti su mjerne jedinice, slično kao i novac, bile znak samosvojnosti, pa je gotovo svaki grad kao uređena zajednica imao svoje mjerne jedinice, kako se to nekada nazivalo svoje mjere i utege. Ujednačenost mjerenja ovisila je o veličini zajednice i njezina područja. Tako je Rimsko Carstvo uspostavilo mjerno jedinstvo na velikom području tada poznatoga svijeta. Njegovim raspadom raspalo se i mjerno jedinstvo, koje se samo u tragovima zadržalo u ljekarništvu europskih zemalja tijekom srednjeg i prvih stoljeća novoga vijeka. Do prije samo dva stoljeća u Europi je vladala danas nezamisliva raznolikost mjernih jedinica. Upotrebljavale su se stotine različitih lakata, rifova i aršina, deseci funti i raznih mjerica obujma, sve različiti od mjesta do mjesta, od vremena do vremena, te različiti za razna dobra i primjene.

Porastom prometa, ponajprije željeznicom i brodovima, u počecima industrijske proizvodnje ta je raznolikost mjernih jedinica i slijedno mjernih podataka postojala sve većom poteškoćom pa se, ponajprije u svijetu znanosti i primjene znanstvenih spoznaja,

potom industrije, prometa i trgovine, pojavila zamisao i potreba za međunarodnim mjernim jedinstvom.“

2.2.1. Od karata do kilograma

Jedan od najstarijih mjernih instrumenata na svijetu je *vaga*. Najstarije vage upotrebljavale su se još prije desetak tisuća godina, a bile su napravljene od vodoravne poluge, ovješene ili oslonjene u sredini, s dvjema zdjelicama na krajevima, jedna za predmet koji se važe, a druga za utege. Crteže takvih vaga još uvijek možemo vidjeti na staroegipatskim spomenicima. Vage su se razvijale u nekoliko smjerova: po namjeni kao jednostavne vage za mjerenja u trgovini, kao izdržljive vage u obrtničkim radionicama, industriji i prometu, te kao precizne vage za mjerenja u fizici, kemiji, ljekarništvu, zlatarstvu i draguljarstvu.[11] Po načinu izvedbe razvila su se tri tipa vage: s jednakim krakovima, s različitim krakovima i vage sa sustavom poluga.



Slika 7: Primjer vage izložene u muzeju u Ateni [13]

Prvi utezi koje je čovjek koristio bili su predmeti poznati sudionicima vaganja, na primjer odabrani kamen, rukotvorine ili plodovi neke biljke. Tako se, na primjer, još u Antici za vaganje izradaka od plemenitih kovina i dragulja rabilo sjemenke rogača (grč. *keration*: roščić) koje su podjednake u svim plodovima i imaju težinu oko 200 mg. Feničani su trgovinom uporabu takva utega proširili po cijelome Sredozemlju. Nazivali su taj uteg *karat* ili nekom inačicom u pojedinim jezicima.

Mjerna jedinica *karat* osnovana na tome utegu rabi se do danas. U različitim su se zemljama i u razna vremena rabili različiti karati, u rasponu 188,500 – 207,353 mg. Rabila se i manja jedinica *zrnice*, vrijednosti $\frac{1}{4}$ karata.[11]

Metrički karat, vrijednosti 200 mg, međunarodno je definiran 1907. godine na temelju prijedloga *Povjerenstva za instrumente i rad Međunarodnog odbora za utege i mjere*, te je i danas njegovo korištenje zakonski dopušteno za izražavanje *mase* dijamanta, bisera i dragoga kamena.

Utezi za javnu upotrebu su utjelovljenje neke mjerne jedinice mase, ili njezinog višekratnika ili nižekratnika, te je podatak o njegovoj vrijednosti jasno naznačen i ovjeren žigom od onoga tko ga je umjerio. Bili su napravljeni od kamena, pečene gline ili metala.

Jedinice mase drevnoga Rima bile su oslonac srednjovjekovne europske mjerne jedinice mase, osobito u ljekarništvu. Bile su to *libra*, *uncia* (1/12 libre), *sicilius* (1/4 uncie), *sextula* ili *solidus* (1 i 1/2 siciliusa), *drahma* (1 i 1/3 sextula) i dr.[11]

Do uvođenja *Metarskog sustava* i njegove mjerne jedinice mase *kilograma* upotrebljavale su se brojne stare jedinice mase. Svaka je kultura imala svoje jedinice mase. *Funta*, koja se oslanjala na rimsku *libru*, stoljećima je bila jedna od često upotrebljavanih jedinica mase. Naziv je, u mnogim europskim zemljama, dobila prema latinskom nazivu *pondus* za *uteg*: njem. *Pfund*, engl. *pound*, hrv. *funta* itd. Ona je u doba drevnog Rima bila vrijednosti $\approx 333,3434$ g. Danas se u engleskome govornom području još rabi UK funta i US funta (znak lb) vrijednosti lb $\approx 453,59237$ g, a dijeli se na 16 unca (engl. *ounce*; znak oz) od 28,3455 g.[11] U nas se tijekom srednjeg vijeka i novovjekovlja rabilo nekoliko funti, na primjer *bečka ljekarnička funta* i *građanska ili trgovačka funta*. Uvođenjem Metarskoga sustava, razne mjerne jedinice mase zamijenjene su kilogramom, odnosno njegovim nižekratnicima, u sljedećim vrijednostima[11]:

NAZIV	IZNOS
Bečka funta	0,56006 kg
Ljekarnička funta	0,42004 kg
Carinska funta	0,5 kg
Bečka marka	0,28067 kg
Bečka centa	56,006 kg
Carinska centa	50 kg
Bečki lot	17,502 g
Bečki karat	0,20597 g
Dukat (zlatni)	3,4909 g

Prelaskom na jedinice Metarskog sustava, stare jedinice su otišle u zaborav, ali se njihovi tragovi i tragovi o njihovim vrijednostima još mogu naći u starijoj literaturi, starim izrekama, starim kuharskim receptima itd.

Kilogram

Od svih osnovnih jedinica Međunarodnog sustava, kilogram je najjednostavnije definiran. On se i danas ostvaruje pomoću tvorne pramjere, odnosno oslanja se na predmet umjesto na neku prirodnu pojavu. Njegova definicija glasi: *kilogram je masa međunarodne pramjere kilograma, valjka slitine 90% platine i 10% iridija, koji je pohranjen u Međunarodnom uredu za utege i mjere.*

Međutim, povijest kilograma je znatno složenija od njegove definicije. U začecima Metarskog sustava za jedinicu mase predložena je jedinica *grave* (lat. *gravitas* – težina), koja je bila definirana litrom vode pri 4°C kada je voda najveće gustoće. Međutim, jedinica *grave* nikada nije ušla u upotrebu, a razlog tomu je danas neobičan. Naime, Metarski sustav razvio se za vrijeme Francuske revolucije, a riječ *grave* podsjećala je na njemačku grofovsku titulu (njem. *Graf*, franc. *count*), te je zbog toga riječ *grave* bila politički nepoželjna.

Za osnovnu jedinicu mase, 1795. godine, predložen je *gram* (grč. *gramma* – mala težina; znak g), definiran kao kubni centimetar vode na temperaturi ledišta. Zbog toga što je gram premalen i time nespretn za svakodnevnu uporabu, predložena je tisuću puta veća jedinica

kilogram (grč. *kilioi* – tisuću; znak k), pa mu je znak *kg*, a definiran je masom kubnog decimetra vode pri najvećoj gustoći, odnosno pri temperaturi od 4°C.

1799. godine izrađen je *etalon kilograma* ili *prakilogram* u obliku valjka od platine, te je bio neznatno veće mase od kubnog decimetra vode. Poznat je i pod imenom *arhivski kilogram* zbog toga što je predstavljen i pohranjen u Arhivu republike Francuske.

1879. godine, zbog odluke donesene potpisivanjem *Konvencije o metru*, izrađen je novi *međunarodni prakilogram* u obliku valjka izrađenog od slitine 90% platine i 10% iridija visine jednake promjeru baze (39,17 mm). Izrađena su tri primjerka, od kojih je onaj koji je bio najbliži *arhivskom kilogramu* 1889. godine na prvoj Generalnoj konferenciji za mjere i utege jednoglasno prihvaćen i proglašen *Međunarodnim prakilogramom*. Zatim je taj izabrani međunarodni prototip kilograma predan Međunarodnom uredu za utege i mjere na čuvanje i upotrebu, te su istodobno određeni i propisi za njegovo čuvanje.

Do 2003. godine izrađeno je sveukupno 84 etalona kilograma. Ove kopije su podijeljene zemljama potpisnicama Konvencije o metru da bi služili kao *nacionalni prakilogrami*, a nekolicina njih predana je Međunarodnom uredu za utege i mjere da bi služili kao tzv. *svjedoci* međunarodnog prakilograma ili kao *radni* etaloni. Svjedoci i radni etaloni vrlo se rijetko preciznim postupcima umjeravaju s međunarodnim prakilogramom ili međusobno, svega četiri puta u sto godina. Nacionalni prakilogrami umjeravaju se s radnim etalonima, u iznimnim situacijama sa *svjedocima*. [11] Kilogram je jedina preostala osnovna jedinica SI sustava koja se realizira tvornom pramjerom, jer se sve preostale jedinice reproduciraju koristeći prirodnim pojavama. Na primjer, jedinica duljine metar reproducira se duljinom puta koju svjetlost prijeđe u vakumu u određeno vrijeme, jedinica vremena sekunda zakonitostima kvantnih pojava u atomima itd. [14] Problem leži u tome što masa prakilograma nije stalna te na nju mogu utjecati oštećenja ili prljavština. To je ogromna poteškoća uzme li se u obzir da se po masi toga predmeta određuje masa tisuća drugih predmeta.

Metrolozi rade na tome da se i jedinica mase kilogram realizira putem prirodnih pojava na temelju Planckove konstante *h*, te je u planu do 2018. godine zauvijek odbaciti zadnju preostalu tvornu pramjeru iz upotrebe.

2.2.2. Lakti i druge prastare jedinice

Od lakta do metra se proteže gotovo pet tisućljeća dugo razdoblje. Lakat spada u najstarije mjerne jedinice duljine. Koristio se više od 4 tisućljeća, sve dok se u 19. stoljeću nije pojavio metar i zamijenio lakat i još mnoge stare jedinice. S laktom je povezan i niz starih manjih i većih antropometrijskih mjernih jedinica duljine, oslonjenim na izmjere ljudskog tijela.

„Nipurski lakat je najstarija pronađena duljinska pramjera, kojom je ostvarena mjerna jedinica duljine, danas također nazivana nipurskim laktom. Pronađen je 1916. godine pri arheološkim istraživanjima u ruševinama jednoga hrama sumerskoga grada Nipura (sumerski Nibur) jugoistočno od Bagdada, u današnjem Iraku. Datiran je na oko 2650. godina. pr. Kr. Danas je pohranjen u Arheološkom muzeju u Carigradu.



Slika 8: Nipurski lakat u Arheološkom muzeju u Carigradu [15]

Pramjera nipurskog lakta je štap od bakrene slitine, mase 45,5 kg, sa šest urezanih oznaka na različitim razmacima, među kojima su i dva razmaka od oko 51,8 cm. Procijenjeno je da oni ostvaruju lakat srednje duljine 51,83 cm, koji se dijelio na 30 palaca (vrijednosti 1,727 cm). Među razmacima je i manja jedinica stopa, koja sadržava 16 palaca (vrijednosti 27,643 cm), a duljina je cijeloga štapa približno 4 stope (110,573 cm). Na štapu su i razmaci između oznaka od 12 palaca (koji se u antici također rabio pod nazivom dodrans), te od 18 palaca, koji se rabio pod nazivom družijska stopa. Prikazani su i dva razmaka od po četiri palca, koji čine šaku, a 12 šaka čine tzv. megalitski koračaj (vrijednosti 82,93 cm).

Ta pramjera nipurskog lakta prikazuje, dakle, cijeli složeni sustav jedinica duljine. One su bile osnova mjernih jedinica duljine u kulturama bliskoga Istoka i Sredozemlja, koje su u mnogočemu nasljedovale babilonsku. “[15]

Od nipurskog lakta potječe *Egipatski kraljevski lakat* koji se tisućljećima koristio u drevnom egiptu. Poseban naziv „kraljevski“ označavao je autoritet koji ga je propisao. Iz egipatskog kraljevskog lakta razvili su se svi ostali lakti sredozemnih kultura, a on je bio ostvaren kamenom pramjerom. *Stari kraljevski lakat* iznosio je 52,388 cm (1,01015 nipurskih lakata), a *kraljevski lakat* 52,920 cm.[15]



Slika 9: Egipatski kraljevski lakat u muzeju Louvre [16]

Rimski lakat bio je mjerna jedinica duljine cjelovitoga antropometrijskog sustava mjernih jedinica (prst, palac, pedalj, lakat,...). Polazna jedinica bio je *prst* (lat. *digitus*), definiran kao ukupna duljina četiriju ječmenih zrna, procijenjen na 1,85 cm. Veće su jedinice bile *palac* (lat. *pollex* ili *uncia*) vrijednosti 1 i 1/3 prsta, tj. 2,47 cm, *pedalj* ili *šaka* (lat. *palmus*) vrijednosti 4 prsta, tj. 7,40 cm, a potom *stopa* (lat. *pes*) vrijednosti četiri pedlja, tj. 29,60 cm, te *lakat* (lat. *cubitus*) vrijednosti 6 pedalja, tj. 44,40 cm i dr. Iz rimskih su mjernih jedinica nastajale srednjovjekovne mjerne jedinice europskih zemalja, sličnih naziva, ali mjesno i vremenski prilično različitih vrijednosti. Trag je nekih od njih u današnjim angloameričkim jedinicama duljine.

Pramjere mjernih jedinica duljine, većinom u obliku metalnih štapova, izlagane su na javnim mjestima samostalnih gradova (trgovima, hramovima, spomenicima, zidinama i sl.), među ostalim i kao znak samosvojnosti.[15]

Također, valja spomenuti *Biblijske lakte* koji se spominju na nizu mjesta u Bibliji. U Starom zavjetu spominje se *lakat* vrijednosti znatno kraće od nipurskog i egipatskog lakta, oko 45 cm. Lakat koji se spominje u Novom zavjetu procjenjuje se na duljinu od oko 55 cm.

Turski lakat ili *aršin* rabio se u zemljama Osmanskog carstva. Postojali su vremenski, mjesno i uporabno različiti aršini, kao što su graditeljski, trgovački i krojački, svi vrijednosti između 65 i 75 cm.

Bečki lakat, koji je posljednji put definiran pramjerom 1853. godine, bio je službena mjerna jedinica u zemljama Habsburške Monarhije, dakle i u Hrvatskoj. Ukinut je 1876. godine pri uvođenju *Metarskog sustava*, kada je navedeno kako mu je vrijednost 0,777 m.

Dubrovački lakat bio je službena mjerna jedinica Dubrovačke Republike. Osnivao se na razmaku od lakta do vrha prstiju na kipu viteza Orlanda. Vrijednost mu je 51,2 cm, dakle neznatno je kraći od drevnoga nipurskog lakta.

Stare mjerne jedinice su se kroz povijest često mijenjale, mjesno i vremenski, slično kao i novčane jedinice. Želja da se uvedu jedinstvene mjerne jedinice, neovisne o carevima i kraljevima, tinjala je među znanstvenicima u prvim stoljećima novovjekovlja. Ta ideja ostvarena je nakon Francuske revolucije uvođenjem sustava jedinica koji je prihvatljiv za sve zemlje i ljude, odnosno „za sva vremena, za sve narode“ (*à tous les temps, à tous les peuples*). Na taj način eliminirale su se sve dotadašnje kojekakve promjenjive i prolazne antropometrijske i kraljevske jedinice kao što su lakat, hvat, prst, pedalj, korak itd.

3. Metarski sustav i konvencija o metru

3.1. Metar i metarski sustav

Postojanje mnoštva raznih mjernih jedinica krajem 18. stoljeća kojima su se mjerile jedne te iste fizikalne veličine sputavalo je razvoj industrijske proizvodnje i trgovine u Francuskoj, Europi i drugim državama svijeta. To je potaknulo trgovce, poslovne ljude i znanstvenike Francuske da se 1789. godine obrate vladi sa zahtjevom za uvođenje jedinstvenog sustava mjera. Taj zadatak povjeren je Francuskoj akademiji znanosti koja je 1790. godine u tu svrhu imenovala specijalnu komisiju koju su činili tada najugledniji francuski znanstvenici. Početni su zahtjevi bili da osnovne mjerne jedinice budu osnovane na *prirodnim pramjerama*, da se iz njih na jednostavan način izvode druge jedinice, da za svaku fizikalnu veličinu postoji samo jedna mjerna jedinica, a da se od nje tvore veće i manje jedinice decimalnim putem.

Godine 1791. Francuska akademija znanosti predložila je Narodnoj skupštini da se za osnovnu jedinicu duljine prihvati 40-milijuntni dio zemaljskog meridijana i da se tako definirana jedinica duljine nazove *metar*, prema grčkoj riječi *metron* za mjeru.

Takav izbor mjerne jedinice za duljinu neposredno vezane uz prirodu objašnjavao se željom da se jedinica ustali za sva vremena, odnosno da se tijekom vremena ne mijenja i da se može reproducirati u bilo koje vrijeme.

Nakon prihvaćanja mjerne jedinice duljine metar izvršeno je mjerenje zemaljskog meridijana od Dunquerquea do Barcelone.* Na temelju toga izrađen je štap od platine, pravokutna presjeka, kojemu je duljina od jednog do drugog kraja bila definirana kao *jedan metar*. To je bio prvi prototip metra, realiziran kao mjera „s kraja na kraj“.

Istodobno s definiranjem jedinice metar predloženo je da se za mjernu jedinicu mase (tada se zvala težina) uzme masa kubnog decimetra destilirane vode pri temperaturi od 4°C, odnosno pri njenoj najvećoj gustoći. Tako definirana jedinica mase nazvana je *kilogram*.

Prema definiciji jedinice mase kilogram izrađen je valjak od platine kojemu su promjer i visina međusobno jednaki (39 mm), te je njime realiziran kilogram u smislu te definicije.[14] To je bio prvi tvorni etalon kilograma.

* Mjerenje su izvršili Jean-Baptiste Delambre i Pierre Méchain

Tako definirane i realizirane platinskim pramjerama, jedinice metar i kilogram, uvedene su u Francuskoj kao zakonske mjerne jedinice, koje se moraju upotrebljavati u prometu i znanosti, 10. prosinca 1799. godine. Obje tvarne pramjere od platine pohranjene su u Nacionalnom arhivu Republike Francuske, zbog čega su dobile naziv „arhivski metar“ i „arhivski kilogram“.

Međutim, provođenjem točnijeg mjerenja meridijana pokazalo se da je metar, prema definiciji, prekratak. Kao rješenje ovog problema postojale su dvije mogućnosti: da se ostane pri prvotnoj definiciji metra te da se izradi novi prototip prema poboljšanoj izmjeri Zemlje ili da se napusti prva definicija metra. Iz posve praktičnih razloga odlučeno je da se napusti definicija metra kao 40-milijuntnog dijela zemljinog meridijana, jer bi svaka nova i bolja izmjera meridijana zahtjevala novu korekciju mjere koja utjelovljuje jedinicu metar. Tom odlukom nova definicija metra je glasila: „Metar je duljina pravokutnog štapa od platine koji tu duljinu utjelovljuje.“[14]

3.2. Konvencija o metru

Uvođenje novoga mjernog sustava, metarskog sustava, teško se prihvaćalo u drugim zemljama, jer je bio oslonjen na francuske pramjere i francusko zakonodavstvo. No, s razvojem industrije, trgovine i znanosti rasla je potreba za međunarodnim priznavanjem metarskog sustava i za njegovim uvođenjem u svaku državu gdje je to bilo moguće. Mnoge su zemlje svijeta prepoznale njegove prednosti prema dotadašnjim raznovrsnim mjernim jedinicama kao što su lakat, stopa itd. To je potaknulo Francusku akademiju znanosti da francuskoj vladi predloži poduzimanje potrebnih koraka za izradu novih pramjera, kojima se vrijednosti određuju uspoređivanjem s arhivskim metrom i kilogramom.

U tu je svrhu 8. kolovoza 1870. godine sazvana prva Međunarodna konferencija na kojoj je osnovana *Međunarodna komisija za metar* (Commission Internationale du Mètre).

Na sljedećem zasjedanju Međunarodne komisije za metar, koje je održano 24. rujna 1872. godine, određen je način izrade novih metarskih pramjera i način određivanja njihove vrijednosti uspoređivanjem s arhivskim pramjerama. Također, na istom zasjedanju preporučeno je i osnivanje Međunarodnog ureda za utege i mjere.

Konačno, 20. svibnja 1875. godine, u prisutnosti ovlaštenih predstavnika 18 država, održana je Diplomatska konferencija o metru (Conférence diplomatique du Mètre), na kojoj

je potpisana *Konvencija o metru* (Convention du Mètre), kojom se zemlje potpisnice obvezuju da će u svojim zemljama (državama) zakonski uvesti metarski sustav mjera.[14] Taj datum, 20. svibnja, od 2000. godine obilježava se kao *Međunarodni dan mjeriteljstva*.

U doba potpisivanja *Konvencije o metru* Hrvatska je bila u sastavu Austro-Ugarske Monarhije, dakle u posebnu državnom odnosu s Ugarskom. Stoga je metarski sustav uveden zakonom zajedničkog hrvatsko-ugarskoga sabora od 17. travnja 1874., a stupio je na snagu 1. siječnja 1876. godine. Osamostaljenjem Republika Hrvatska pristupila je *Konvenciji o metru* kao punopravna ugovornica 2008. godine.[15]

Na toj Diplomatskoj konferenciji o metru, održanoj 1875. godine, donešene su sljedeće odluke:

1. Definirane su jedinica duljine metar i jedinica mase kilogram u obliku tvornih pramjera.
2. Osnovan je *Međunarodni ured za utege i mjere* (Bureau International des Poids et Mesures, *BIPM*) sa sjedištem u Sèvresu kraj Pariza, kao stalni znanstveni zavod *Konvencije o metru*, radi osiguravanja međunarodnog jedinstva mjera i usavršavanja metarskog sustava.
3. Osnovan je *Međunarodni komitet za utege i mjere* (Comité International des Poids et Mesures, *CIPM*), koji su sačinjavali znanstvenici iz raznih zemalja svijeta, sa zadatkom da rukovodi radom *Međunarodnog ureda za utege i mjere* (*BIPM*) u duhu *Konvencije o metru*.
4. Radi usavršavanja metarskog sustava i njegovog širenja i uvođenja u državama koje još nisu potpisale *Konvenciju o metru* odlučeno je da se bar jednom svakih 6 godina u Parizu sazove *Generalna konferencija za utege i mjere* (Conférence Générale des Poids et Mesures, *CGPM*).[14]

Metar je u doba potpisivanja *Konvencije o metru* bio definiran francuskom pramjerom, no uskoro se pristupilo izradi *međunarodnog prametra*. U tu svrhu je naručena od tvrtke „Johnson and Matthey“ u Londonu izrada 30 jednakih štapova (prototipova) od slitine sa 90% platine i 10% iridija, presjeka u obliku slova X da se smanje izobličenja pri postavljanju na dvama osloncima. Svaki štap na sebi mora imati ugravirane 3 paralelne crtice na svakom kraju, takve da su crtice okomite na duljinu štapova i da je razmak između srednje crtice na jednom kraju i srednje crtice na drugom kraju jednak duljini arhivskog metra od platine.

Dakle, te su mjere realizirane kao mjera s crticama, za razliku od arhivskog metra, koji se zove mjera s kraja na kraj.

Na prvoj Generalnoj konferenciji za utege i mjere (CGPM), održanoj 26. rujna 1889. godine, izabran je jedan od 30 izrađenih štapova i proglašen za „Međunarodni etalon“. Priznata je jednakost duljine međunarodnog i arhivskog prototipa metra, te je zatim međunarodni prototip predan Međunarodnom uredu za utege i mjere.



Slika 10: Prametar koji se koristio od 1889. do 1960. godine [17]

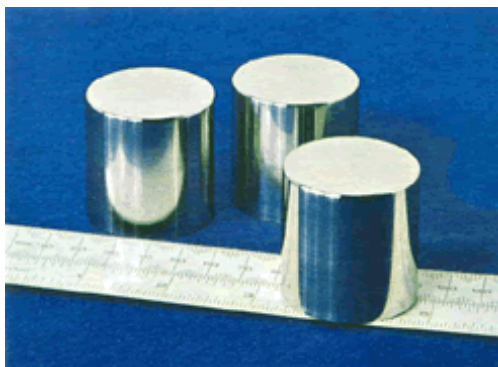
Za ostalih 29 metarskih mjera utvrđena je razlika u duljini u odnosu na međunarodni prototip, te su djelomično podijeljene među državama potpisnicama Konvencije o metru da bi služile kao „nacionalni etaloni“, a ostatak je predan Međunarodnom uredu za utege i mjere da se njima služe u mjerne svrhe, kao što su baždarenje i kontrola nacionalnih etalona itd.

Razvoj događaja oko utvrđivanja mjerne jedinice mase, kako smo vidjeli u poglavlju 2.2.1., odvijao se u isto vrijeme i na vrlo sličan način kao i utvrđivanje mjerne jedinice duljine. Kako je navedeno u prošlom poglavlju, mjerna jedinica mase kilogram definirana je u obliku tvarne pramjere što je odlučeno na diplomatskoj konferenciji o metru, održanoj 1875. godine, na kojoj je potpisana *Konvencija o metru*.

Paralelno s izradom prototipova metra izrađeno je i četrdesetak valjaka, kružne osnovice i kvadratičnog vertikalnog presjeka, od slitine sa 90% slitine i 10% iridija tako da je svakome od tih valjaka masa jednaka masi prototipa kilograma što je izrađen od platine i pohranjen u BIPM.

Prva generalna konferencija za mjere i utege (CGPM) održana 1889. godine, potvrdila je jednakost masa tih prototipova kilograma i utvrdila da njihova mjerenja zadovoljavaju u

granicama točnosti, mogućima u tadašnjim prilikama i prema tadašnjem stupnju razvoja znanosti.[14]



Slika 11: Mjerenje prototipova kilograma [18]

Jedan od valjaka, izrađen od slitine platine i iridija, jednoglasno je izabran, prihvaćen i proglašen za „Međunarodni prototip kilograma“ (Prototype international du kilogramme, odnosno Etalon international du kilogramme[15]). Zatim je predan Međunarodnom uredu za utege i mjere, sa sjedištem u Sèvresu kraj Pariza, na korištenje i čuvanje u posebno propisanim uvjetima.

Ostali valjci djelomično su podjeljeni (kao i kod metra) među državama potpisnicama Konvencije o metru kako bi služili kao nacionalni etaloni, a ostatak je predan Međunarodnom uredu za utege i mjere na korištenje i čuvanje.

Osnovna mjerna jedinica mase kilogram je posebna po još nečemu: to je jedina osnovna mjerna jedinica SI sustava sastavljena imena, odnosno ona je sastavljena od osnovice „gram“ i predmetka „kilo“ (kilo – gram = kilogram = kg = 10^3 g = 1000 g).

U vezi s kilogramom vrijedno je spomenuti i mjernu jedinicu obujma – *litru*. 1901. godine Generalna konferencija za utege i mjere na svom trećem zasjedanju prihvatila je sljedeću definiciju za litru: „Mjerna jedinica obujma litra jest obujam što ga zauzima masa od jednog kilograma destilirane vode pri svojoj najvećoj gustoći (4°C) i normalnom tlaku.“[14] Međutim, kasnije je utvrđeno da kubni decimetar i litra nisu jednaki, to jest:

$$\text{Litra (l)} = 1,000028 \text{ dm}^3$$

te je pri točnijim mjerenjima ta razlika između litre i kubnog decimetra stvarala zabunu. Stoga je CGPM, na preporuku Međunarodnog komiteta za utege i mjere (CIPM), 1964. godine ukinula mjernu jedinicu litru kako je bila prihvaćena 1901. godine, te je utvrdila i prihvatila novu definiciju *litre* koja glasi: „Mjerna jedinica obujma litra jednaka je kubnom decimetru (točno)“. Prema tome je riječ litra poseban naziv za kubni decimetar, odnosno:

$$\text{litra (l)} = \text{kubni decimetar} = \text{dm}^3 \text{ (točno).[14]}$$

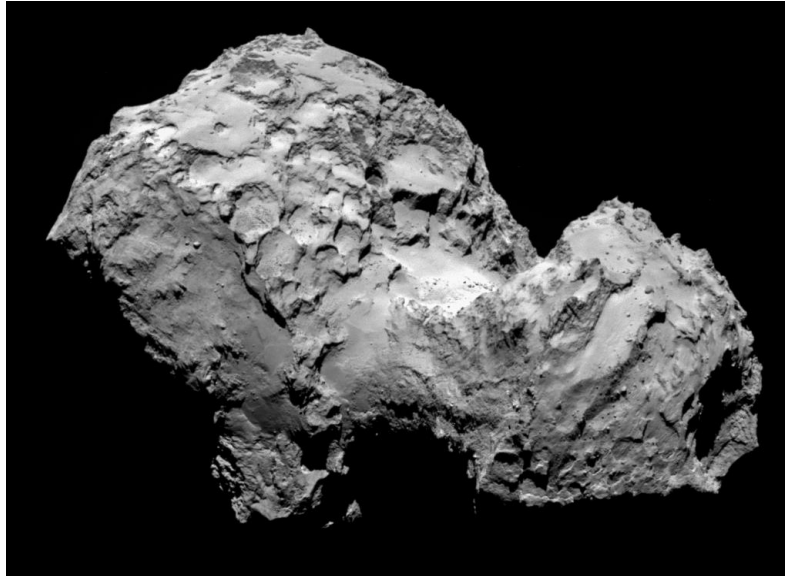
4. Metrologija

4.1. Nezaobilazni dio svakodnevnog života

Metrologija je, dakle, znanstvena disciplina koja se bavi mjerenjem u svim njegovim teorijskim i praktičnim oblicima. Ona je postala toliko prirodan i vitalan dio našeg svakodnevnog života da je praktički nemoguće išta opisati bez pozivanja na utege ili mjere. Mjerimo potrošnju vode, električne i toplinske energije i iznos računa, a time i stanje našeg novčanika, ovisi o iznosu potrošenoga. Voće, povrće i meso se kupuju po težini; drvo i keramičke pločice se kupuju po veličini i to sve utječe na našu osobnu ekonomiju. Broj promila alkohola u krvi, prilikom provedbe alkotesta uz prisustvo službene osobe, neće utjecati samo na naše financijsko stanje, nego i na naše emocionalno stanje. Potrebno je znati odrediti količinu aktivne tvari kod lijekova, analizirati ljudsku krv, usavršavati medicinske aparate ako ne želimo da se ljudsko zdravlje dovede u opasnost. Ako ne želimo ostaviti loš dojam na prvom spoju pažljivo ćemo voditi računa o tome koje vrijeme pokazuju kazaljke na našem ručnom satu kako ne bismo zakasnili na dogovor. Kako se ljeto bliži počinjemo paziti na broj kalorija koji unosimo u tijelo i na broj kalorija koje potrošimo tijekom dana.

Zatim imamo trgovinu i propise koji su jednako ovisni o utezima i mjerama. Tvrtke kupuju sirovine pomoću utega i mjera i uporabom istih jedinica određuju svoje proizvode, inspekcije putem mjerenja vode računa o sadržaju bakterija kod prehrambenih proizvoda, pilot stalno mora voditi računa o visini, kursu i potrošnji goriva prilikom leta. Sustavno mjerenje s poznatim stupnjevima nesigurnosti jedan je od temelja industrijskog upravljanja kakvoćom i u većini suvremenih industrija troškovi mjerenja iznose 10% – 15% od ukupnog troška proizvodnje.[19]

Konačno, znanost u potpunosti ovisi o mjerenju. Znanstvenici koji su sudjelovali na lansiranju svemirske letjelice „Rosetta“ 2004. godine s ciljem istraživanja kometa 67P/Čurnjumov – Gerasimenko skakali su od veselja i uzbuđenja kada se njihov izračun 10 godina dugog putovanja letjelice pokazao savršeno točnim u trenutku kada su napravljeni posljednji manevri kočenja i letjelica se našla paralelno sa kometom putujući jednakom brzinom. Meteorolozi neprekidno mjere klimatske aktivnosti i pravovremeno nas obavještavaju i pripremaju na vremenske prilike i neprilike.



Slika 12: Komet 67P/Čurnjumov – Gerasimenko [20]

Sve grane znanstvenog istraživanja su u čvrstoj vezi sa metrologijom te se može reći da, doslovno, jedno bez druge ne mogu postojati. Metrologija je od ključne važnosti za sva znanstvena istraživanja, a znanstvena istraživanja potiču razvoj metrologije. Znanost svakim danom pomiče granice nemogućega i to vrlo primjetno utječe na našu kvalitetu života. Postoji samo pitanje koliko daleko je čovječanstvo u stanju pomaknuti granicu, ako ta granica uopće postoji.

4.2. Zadaci i podjela metrologije

Metrologija kao znanstvena disciplina uključuje sve teorijske i praktične aspekte mjerenja, odnosno možemo reći da metrologija ima 3 glavna zadatka:

1. *definiranje* međunarodno priznatih mjernih jedinica (npr. metar)
2. *ostvarenje* mjernih jedinica znanstvenim metodama (npr. ostvarenje metra uporabom lasera)
3. utvrđivanje lanca *sljedivosti* pri određivanju i dokumentiranju vrijednosti i točnosti mjerenja i prenošenju tog znanja.

Dakle, znanstvenici specijalizirani za mjerenje, *metrolozi*, bave se raznim metodama mjerenja fizikalnih veličina i usavršavanjem istih, ostvarivanjem i održavanjem etalona

(pramjera) fizikalnih veličina, tehnološkim razvojem mjernih uređaja i instrumenata, prikupljanjem i analizom mjerenih podataka. Oni nam pomažu da razumijemo mjerne jedinice koje su važne u ljudskoj djelatnosti. Bilo da se radi o medicinskoj dijagnozi ili o razmjeni dobara, zadovoljstvo potrošača ovisi o povjerenju koje dajemo mjerenju koje se obavlja prilikom tih procesa.

Metrologiju dijelimo na 3 kategorije:

1. Znanstvena (temeljna) metrologija
2. Industrijska (primjenjena) metrologija
3. Zakonska metrologija

Znanstvena (temeljna) metrologija

Iako ne postoji međunarodno priznata definicija *temeljne* metrologije, ona se smatra najvišom razinom metrologije jer zahtjeva najveću točnost mjerenja u danome području. Ona je zaslužna za organizaciju i razvoj novih metoda mjerenja, realizaciju etalona i njihovim održavanjem te utvrđivanjem lanca *sljeditivosti* pri određivanju i dokumentiranju vrijednosti i prijenosu toga znanja.

Znanstvena se metrologija prema Međunarodnom uredu za utege i mjere (Bureau International des Poids et Mesures – *BIPM*) dijeli na 9 tehnoloških područja: masa, elektricitet, duljina, vrijeme i frekvencija, količina tvari, ionizacijsko i radioaktivno zračenje, fotometrija i radiometrija, protok i akustika. Svako od tih područja ima i svoja potpodručja kojima pripadaju određeni mjerni etaloni. U tablici [1] nalaze se potpodručja i njihovi etaloni koji se koriste u EUROMET-u.*

* EUROMET – Europska udruga nacionalnih metroloških instituta (The European Association of National Metrology Institutes) – [<https://www.euramet.org/>]

<i>Područje</i>	<i>Potpodručje</i>	<i>Važni mjerni etaloni</i>
Masa i srodne veličine	Mjerenje mase	Etaloni mase, etalonske vage, maseni komparatori
	Sila i tlak	Osjetila tereta, tlačne vage, pretvornici sile, momenta i zakretnog momenta, tlačne vage s uljem/plinom podmazivanim valjkastim stapnim sklopom, strojevi za mjerenje sile
	Obujam i gustoća Viskoznost	Stakleni areometri, laboratorijsko posuđe, vibracijska mjerila gustoće, mjerila viskoznosti sa staklenom kapilarom, rotacijska mjerila viskoznosti, ljestvice viskoznosti
Elektricitet i magnetizam	Istosmjerne električne veličine	Kriogenički strujni komparatori, Josephsonov i Klitzingov kvantni Hallov pojav, Zenerovi referentni etaloni, potencimetrijske metode, mostovni komparatori
	Izmjenične električne veličine	Pretvornici izmjeničnih veličina u istosmjerne veličine, etalonski kondenzatori, zračni kondenzatori, etaloni induktivnosti, kompenzatori
	Visokofrekvencijske električne veličine	Toplinski pretvornici, kalorimetri, bolometri
	Velike struje i visoki napon	Strujni i naponski mjerni transformatori, referentni izvori visokog napona
Duljina	Valne duljine Interferometrija	Stabilizirani laseri, interferometri, laserski interferometrijski mjerni sustav, interferometrijski komparatori
	Dimenzijska metrologija	Mjerni blokovi, ravnala, koračajna mjerila, prstenovi, klinovi, mjerila visoke točnosti za provjeru drugih mjerila, mjerila s brojčanikom, mjerni mikroskopi, optički etaloni ravnine, koordinatni mjerni strojevi, mikrometri s laserskim skenerom, mikrometri dubine
	Mjerenje kuta	Autokolimatori, rotacijske ploče, mjerila kuta, poligoni, razulje
	Oblici	Etaloni pravocrtnosti, ravnine, usporednosti, kvadratičnosti, kružnosti, valjkasti etaloni
	Kakvoća površine	Etaloni visine koraka i izbrazdanosti, etaloni hrapavosti, oprema za mjerenje hrapavosti

<i>Područje</i>	<i>Potpodručje</i>	<i>Važni mjerni etaloni</i>
Vrijeme i frekvencija	Mjerenje vremena	Cezijev atomski sat, oprema za mjerenje vremenskog odsječka
	Frekvencija	Atomski sat, kvarcni oscilator, laseri, elektronička brojila i sintetizatori
Termometrija	Dodirna temperaturna mjerenja	Plinski toplomjeri, čvrste točke ljestvice ITS 90, otporski toplomjeri, termoparovi
	Temperaturna mjerenja bez dodira	Crna tijela za mjerenje visoke temperature, kriogenički radiometri, pirometri, Si-fotodiode
	Vlažnost	Mjerila rosišta sa zrcalom ili elektronički vlagomjeri, dvostruki generatori vlažnosti tlak/temperatura
Ionizantna zračenja i radioaktivnost	Apsorbirana doza – Industrijski proizvodi visoke razine	Kalorimetri, umjerene visokodozne šupljine, dikromatski dozimetri
	Apsorbirana doza – Medicinski proizvodi	Kalorimetri, ionizacijske komore
	Zaštita od zračenja	Ionizacijske komore, referentno zračenje snopova/polja, razmjerna i druga brojila, TEPC, Bonnerovi neutronske spektrometri
	Radioaktivnost	Ionizacijske komore, potvrđeni radioaktivni izvori, gama-spektroskopija i alfa-spektroskopija, 4gama otkrivala
Fotometrija i radiometrija	Optička radiometrija	Kriogenički radiometri, otkrivala, stabilizirani laserski referentni izvori, referente tvari – Au-vlakna
	Fotometrija	Otkrivala u vidljivome području, Si fotodiode, kvantna otkrivala djelotvornosti
	Kolorimetrija	Spektrofotometri
	Optička vlakna	Referentne tvari – Au-vlakna
Protok	Protok plina (obujamski)	Ispitni uređaji sa zvonom, rotacijski plinomjeri, turbinski plinomjeri, prijenosni plinomjeri sa sapnicom u kritičnome području
	Protok vode (obujamski, maseni i energetski)	Obujamski etaloni, Coriolisovi maseni etaloni, mjerila razine, indukcijska mjerila protoka, ultrazvučna mjerila protoka
	Protok kapljevina različitih od vode	
	Anemometrija	Anemometri

<i>Područje</i>	<i>Potpodručje</i>	<i>Važni mjerni etaloni</i>
Akustika, ultrazvuk i vibracije	Akustička mjerenja u plinovima	Etalonski mikrofoni, stepni mikrofoni, kapacitetski mikrofoni, zvučni kalibratori
	Mjerenje ubrzanja	Mjerala ubrzanja, pretvornici sile, vibratori, laserski interferometri
	Akustička mjerenja u kapljevinama	Hidrofoni
	Ultrazvuk	Ultrazvučna mjerala snage, radijacijske vage
Količina tvari	Kemija okoliša	Potvrđene referentne tvari, maseni spektrometri, kromatografi
	Klinička kemija	
	Kemija gradiva	Čiste tvari, potvrđene referentne tvari
	Kemija prehrane	Potvrđene referentne tvari
	Biokemija	
	Mikrobiologija	
	Mjerenje pH-vrijednosti	

Tablica 1: Područja potpodručja i važni mjerni etaloni koji se koriste u EUROMET-u [19]

Industrijska (primjenjena) metrologija

Zadatak *primjenjene* metrologije je primjena mjerala koja se upotrebljavaju u industriji i procesima proizvodnje i ispitivanja. Ona osigurava prikladnost mjernih uređaja koji se koriste, njihovo baždarenje i kontrolu kvalitete. Također, važan zadatak kojim se bavi je i utvrđivanje sljedivosti baždarenja mjernih uređaja kako bi se osigurala sigurnost u mjerenju.

Razvoj industrijske metrologije je vrlo bitan i važno je da prati razvoj znanosti kako bi se država mogla ekonomski i industrijski razvijati te tako uspješno zadovoljiti sve potrebe društva.

Zakonska metrologija

Zakonska metrologija bavi se aspektima mjerenja koja utječu na razvidnost gospodarskih transakcija, zdravlje i sigurnost. Ona je nastala iz potrebe da se osigura poštena trgovina, posebno u području utega i mjera.[19] Dakle, možemo slobodno reći da je poštenost prema građanima glavni prioritet zakonske metrologije.

OIML* je Međunarodna organizacija za zakonsku metrologiju čiji je zadatak promicanje svjetskog usklađivanja postupaka u zakonskoj metrologiji kako ne bi došlo do prepreka u trgovini.

4.3. Mjerenje fizikalne veličine, mjerne jedinice, pramjere ili etaloni

4.3.1. Fizikalne veličine i mjerenje fizikalnih veličina

Fizikalnim veličinama nazivaju se mjerljiva svojstva prirodnih pojava, procesa, stanja, odnosno mjerljiva svojstva objekata (tvari) kao njihovih nosilaca.[14] Drugim riječima, fizikalne veličine su objektivna svojstva materijalnog svijeta koje se mogu kvalitativno razlikovati i kvantitativno mjeriti. Fizikalne veličine su, na primjer: *duljina* drvenog štapa, *obujam* boce, *frekvencija* titraja, *masa* utega u teretani itd. Dakle štap, boca, uteg i titraj nisu fizikalne veličine, nego oni predstavljaju objekte nosioce fizikalnih veličina duljine, obujma, mase i frekvencije. Osim naziva *fizikalna veličina* možemo koristiti i kraći naziv – *veličina*.

Svaka fizikalna veličina se može iskazati na dva načina: *kvalitativno* i *kvantitativno*. Ako želimo opisati bit postojanja, kvalitetu ili kakvoću veličine onda koristimo *kvalitativni* iskaz, a ako želimo opisati kvantitativnu vrijednost ili količinu neke fizikalne veličine onda koristimo *kvantitativni* iskaz. Na primjer, ako želimo opisati glatkoću ili hrapavoću dodirnih površina dvaju tijela koristiti ćemo kvalitativni opis površina tijela, a ako želimo znati koliki krevet nam stane u spavaću sobu zanimati će nas koliko metara je soba duga i široka, odnosno sobu ćemo opisati kvantitativno u metrima.

Međutim, prirodni objekti, odnosno fizička tijela, posjeduju i svojstva koja se *ne mogu* kvantitativno iskazati, tj. koja se ne mogu mjeriti, kao što su boja, miris, ljepota itd. To jesu veličine koje su dio ljudske kulture i svakodnevnog života i mi osobno možemo odrediti da li nešto ima ugodan ili neugodan miris, da li je nešto lijepo ili ružno, no to nisu *fizikalne veličine*. Ali, ako se, na primjer, boji izvora neke svjetlosti pridruži energija po valnoj duljini kao funkcija valne duljine za promatrani izvor svjetlosti, tada se boja izvora svjetlosti može i kvantitativno iskazati.

Istorodne veličine ili veličine istog roda su one veličine koje se mogu fizikalno (prirodno) međusobno izjednačavati, zbrajati i odbijati.[14] Udaljenost između Zagreba i Splita, valna

* Franc. Organisation Internationale de Metrologie Legale

duljuna zračenja, promjer kružnice, raspon ruku itd. – sve navedene veličine su „duljine“ i pripadaju istom rodu veličina – duljini.

Ako su dvije fizikalne veličine istorodne možemo uspoređivati njihove vrijednosti, a postupak njihovog uspoređivanja naziva se *mjerenjem*. Drugim riječima, *mjerenje* je proces uspoređivanja vrijednosti neke fizikalne veličine s dogovorno odabranom istorodnom veličinom određene vrijednosti.[14] Ta dogovorno odabrana vrijednost s kojom se uspoređuju sve istorodne veličine naziva se *mjerna jedinica* ili kraće *jedinica*.

Mjerenje izvodimo pomoću mjernih instrumenata, a mjeriti možemo na dva načina: izravno (neposredno) i posredno. Kod izravnog mjerenja, kako i sam naziv kaže, rezultat mjerenja očitavamo izravno s mjernog instrumenta. Na primjer, ako želimo izmjeriti jesmo li se udebljali preko zimskih blagdana ili je li nam tjelesna temperatura povišena jer se ne osjećamo dobro, stati ćemo na vagu u kupaonici ili staviti termometar ispod jezika i izravno sa vage ili termometra očitati rezultat mjerenja. Ima, međutim, veličina koje se ne mogu mjeriti izravno pa se mjerenje takvih veličina obavlja posredno, odnosno mjerenjem onih veličina kojima je definirana fizikalna veličina koju ne možemo mjeriti izravno, te njihovim računanjem pomoću fizikalnih zakona koji ih povezuju. Na primjer, veličina akceleracija (ubrzanje) \vec{a} definirana je izrazom:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (4.1)$$

Ta definicija akceleracije izražava fizikalnu vezu između veličina akceleracije, brzine i vremena i ta veza nam omogućuje da se pronađe vrijednost akceleracije bez izravnog mjerenja. Poznato je da pomoću brzinomjera i sata možemo izravno mjeriti veličine brzinu i vrijeme, a nakon toga se uvrštavanjem njihovih vrijednosti u navedenu definiciju za akceleraciju može izračunati kvantitativna vrijednost akceleracije, bez njenog izravnog mjerenja. Ovo je bio samo jedan primjer posrednog mjerenja fizikalne veličine, međutim postoje razni uređaji za izravno mjerenje akceleracije.

Neka se veličina može kvantitativno iskazati, odnosno mjeriti, sa više istorodnih mjernih jedinica koje se razlikuju samo po brojčanim prefiksima (tablica 6). Izbor koju od ponuđenih istorodnih mjernih jedinica ćemo odabrati je potpuno proizvoljan i ovisi o tome kolika nam je preciznost mjerenja potrebna za danu situaciju. Masu možemo izraziti u kilogramima (kg), gramima (g), tonama (t) itd. Duljinu, osim u metrima (m), možemo izraziti u milimetrima (mm), decimetrima (dm), kilometrima (km), megametrima (Mm) itd. Ako mjerimo

udaljenost između dva grada, neće baš biti prikladno dobivenu vrijednost izraziti u milimetrima, isto kao što bi bilo nezgodno izmjeriti vlastitu visinu u kilometrima.

Vrijeme je jedna veličina koje smo svi svjesni i koju smo svi zasigurno mjerili. U šali čak možemo reći da je u svakog živućeg čovjeka ugrađena ura koja je posebno namještena prema svakom pojedincu zasebno – tzv. „biološki sat“. Sekunda je mjerna jedinica za mjerenje vremena. Sat je mjerni instrument kojim brojimo sekunde, odnosno kojim mjerimo vrijeme. Vrijeme je ponekad praktičnije mjeriti jedinicama sat, dan, godina itd., ako su vremenski intervali koji mjerimo predugi da bi bilo praktično mjeriti ih tako da brojimo sekundu po sekundu. Za mjerenje pojava koje traju kraće od sekunde, npr. u atomskoj fizici, vrijeme ćemo mjeriti tako brojimo decimale sekunde, odnosno desetinke, stotinke, tisućinke itd.

Vrijednost fizikalne veličine ne ovisi o izboru mjerne jedinice. Odabir odgovarajućeg decimalnog višekratnika ili nižekratnika mjerne jedinice je proizvoljan i najčešće ovisi o pojavi koju promatramo i mjerimo. Rezultat mjerenja zovemo *vrijednost* fizikalne veličine, a rezultat zapisujemo pomoću produkta brojčanog iznosa i mjerne jedinice u obliku:

$$\text{vrijednost veličine} = \text{brojčani iznos} * \text{mjerna jedinica} \quad (\text{npr. } v = 35 \text{ km/h})$$

Brojčani iznos nam govori koliko puta je veličina koja se mjeri veća od mjerne jedinice kojom se mjeri, odnosno govori nam koliko mjernih jedinica sadrži veličina koju mjerimo. Dakle, ako je štap koji mjerimo dug 5 metara, znači da je on 5 puta veći od mjerne jedinice metar, odnosno on u sebi sadrži 5 mjernih jedinica metar.

Pokusima i promatranjima, koje su temelj fizike, pronalazimo veze između fizikalnih veličina. Ako te veze matematički oblikujemo, dobivamo fizikalne zakone.

4.3.2. Nepouzdanost ili pogreška u mjerenju

Postoji nešto čega moramo biti apsolutno svjesni kada mjerimo neku fizikalnu veličinu, a to je da će se zasigurno javiti *pogreška u mjerenju*. Zadatak nekog fizičkog mjerenja jest utvrditi brojčanu vrijednost neke fizičke veličine, no zbog nesavršenosti mjernih instrumenata i naših (ljudskih) osjetila naše mjerenje nikada neće biti apsolutno točno. Budući da je oština ljudskog razlučivanja i razlučivost mjernih instrumenata ograničena, te da je svako mjerenje podložno raznim i mnogobrojnim vanjskim utjecajima, pojedinačni rezultati mjerenja se neće u potpunosti podudarati. Stoga svakoj izmjerenoj veličini pridajemo *pogrešku*. Iz tog razloga se ne možemo zadovoljiti sa samo jednim mjerenjem i

jednim rezultatom mjerenja, nego se rade uzastopna mjerenja. Rezultat se dobiva određivanjem srednje vrijednosti veličine pomoću formule (4.2), a rezultat se interpretira kao najbolja procjena mjerene veličine. Jednostavan pokus kojim možemo to potvrditi jest da izaberemo nekoliko prijatelja i damo im zadatak da pomoću metra ili školskog ravnala izmjere dužinu stola u susjednoj prostoriji od one u kojoj se nalazimo. Rezultate mjerenja neka zapišu na komadić papira i neka tu informaciju čuvaju za sebe sve dok zadnji mjerač ne zapiše svoj rezultat. Zatim se uspoređuju pojedinačni rezultati mjerenja koji će se sasvim sigurno razlikovati (neće se nužno svi rezultati razlikovati, ali vrlo je mala vjerojatnost da će svi rezultati biti istog iznosa).

Pretpostavimo da postoji prava vrijednost X neke određene fizikalne veličine i srednja vrijednost \bar{X} . Tada pojedina mjerenja x odstupaju od prave vrijednosti X , a odstupanje računamo jednostavnim oduzimanjem prave vrijednosti od vrijednosti pojedinačnog mjerenja: $\Delta X = x - X$. Takvo odstupanje naziva se *pravom* pogreškom tog mjerenja. Na isti način računa se odstupanje pojedinih mjerenja x od srednje vrijednosti \bar{X} ($\Delta \bar{X} = x - \bar{X}$), a apsolutna vrijednost najvećeg odstupanja naziva se *maksimalnom apsolutnom* pogreškom mjerenja. Cilj uzastopnih mjerenja i računa je što *pouzdanije* i *preciznije* odrediti pravu vrijednost fizikalne veličine, tj. odrediti granice pogreške unutar kojih se najvjerojatnije nalazi prava vrijednost fizikalne veličine. Srednja vrijednost veličine i njezina pripadajuća pogreška govore nam podatak o intervalu brojeva unutar kojih se najvjerojatnije nalazi prava vrijednost, stoga kažemo da je srednja vrijednost predstavnik tog intervala, odnosno da ona predstavlja najbolju procjenu prave vrijednosti veličine. Za potrebe svakodnevnog života nije potrebno računati odstupanje, nego je dovoljno biti svjestan mogućnosti pogreške. Međutim, kod bilo kakvog mjerenja za potrebe znanosti, industrije i sl., svako iskazivanje rezultata mjerenja koje uz rezultat ne daje nikakav podatak o njegovoj pouzdanosti (pogrešci), ne smatra se vrijednim podatkom.

Dakle, gotovo je sigurno da će se u mjerenju javiti pogreška, odnosno vjerojatnost da mjerenje bude 100% precizno je gotovo nemoguća. Pogreške koje se javljaju prilikom mjerenja možemo rasporediti u 3 kategorije:

- 1) *Sistematske ili sustavne pogreške* – nastaju zbog neispravnosti mjernih instrumenata, izbora pogrešne metode mjerenja ili krivog postupka pri mjerenju. One su podložne ponavljanju i prilikom ponavljanja mjerenja javljaju se u istom smjeru i istog su iznosa.

- 2) *Grube pogreške* – nastaju ljudskim propustima prilikom mjerenja, naglim poremećajem u okolini ili u mjernom instrumentu. Može se dogoditi da opažać pogrešno očita vrijednost na skali, da zabilježi krivu vrijednost, da decimalnu točku zapiše na krivo mjesto, da trenutak prije početka mjerenja rukom slučajno pomakne mjerni uređaj i sl. Ako je učinjeno više mjerenja, rezultat ovakvog mjerenja bi definitivno trebao odskakati od ostalih rezultata. U pravilu se takvi rezultati ne koriste u analizi podataka.
- 3) *Slučajne pogreške* – nastaju kao posljedica nesavršenosti opažaća i mjernih instrumenata. Usavršavanjem mjernih instrumenata one se daju minimalizirati, ali nemoguće ih je u potpunosti ukloniti. Slučajne pogreške imaju jedno važno svojstvo – proizvoljno su distribuirane oko prave vrijednosti fizikalne veličine.[21]

4.3.3. Analiza rezultata mjerenja

Nakon mjerenja slijedi obrađivanje ili analiza dobivenih rezultata mjerenja fizikalnih veličina. Analiza rezultata odnosi se na analizu slučajnih pogrešaka prilikom mjerenja dok se smatra da su sustavne i grube pogreške otklonjene prije početka mjerenja. Ukoliko postoji neka sustavna pogreška koja se javlja prilikom mjerenja, njen utjecaj na rezultat mjerenja objašnjava se u raspravi rezultata mjerenja, na kraju izvješća.

Zbog potrebe dobivanja što pouzdanijeg rezultata, analiza slučajnih pogrešaka i njihov proračun radi se prema zakonima vjerojatnosti i statistike. Takva analiza podataka dobiva značenje tek kod velikog broja mjerenja, ali zbog ograničenosti vremena u većini slučajeva dovoljno je 5 do 10 puta ponoviti mjerenje.

Prilikom izvođenja niza istovrsnih mjerenja neke fizikalne veličine, zbog neizbježnosti slučajnih pogrešaka dobiva se niz različitih vrijednosti x_1, x_2, \dots , za tu fizikalnu veličinu. Tada najvjerojatniju vrijednost fizikalne veličine predstavlja *srednja vrijednost* ili *aritmetička sredina fizikalne veličine* (\bar{x} ili $\langle x \rangle$). Ona se, za n mjerenja, računa kao kvocijent zbroja svih dobivenih vrijednosti ($\sum_{i=1}^n x_i$) i ukupnog broja mjerenja (n).

$$\bar{x} = \langle x \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4.2)$$

Standardna devijacija (pogreška) aritmetičke sredine (M_n) je mjera nepouzdanosti rezultata mjerenja. Nepouzdanost ovisi o broju mjerenja pa indeks n označava broj izvedenih

mjerenja na kojima se temelji izračun standardne devijacije. Značajno manja standardna pogreška može se dobiti izvođenjem većeg broja mjerenja. Standardnu devijaciju n mjerenja računamo pomoću relacije:

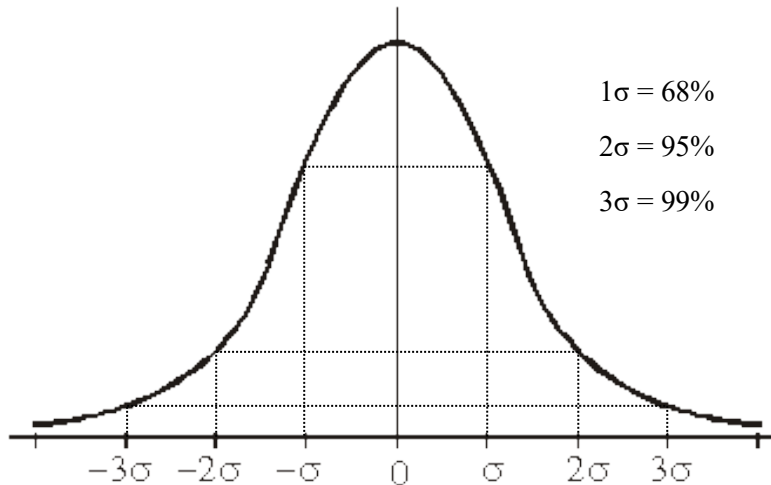
$$M_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n * (n - 1)}} \quad (4,3)$$

Prilikom izražavanja rezultata vrijednosti mjerene fizikalne veličine, potrebno je pisati i dobivenu srednju vrijednost mjerenja i vrijednost standardne pogreške. Rezultat je tada oblika:

*vrijednost veličine = (srednja brojčana vrijednost ± standardna pogreška) * mjerna jedinica*

(npr. $m = (45,5 \pm 0,5) \text{ kg}$)

Rezultate mjerenja možemo prikazati Gaussovom ili normalnom raspodjelom slučajnih pogrešaka pri mjerenju, koja nam govori kolika je vjerojatnost da se *prava* vrijednost mjerene veličine nalazi u određenom intervalu vrijednosti (slika 13).



Slika 13: Normalna ili Gaussova raspodjela slučajnih pogrešaka pri mjerenju [33]

4.3.4. Mjerna jedinica i mjera

Izraz „mjerna jedinica“ ili kraće „jedinica“ i izraz „mjera“ se često pogrešno poistovjećuju iako nemaju isto značenje.[14] *Mjernu jedinicu* smo definirali kao dogovorno izabranu vrijednost određene fizikalne veličine s kojom se pri mjerenju uspoređuju sve druge istorodne veličine. Kada mjerimo neku fizikalnu veličinu, onda tu fizikalnu veličinu ne uspoređujemo sa mjernom jedinicom, već sa materijalnom reprodukcijom te mjerne jedinice, npr. štap duljine jednog metra. Materijalna reprodukcija s kojom uspoređujemo fizikalnu veličinu zovemo *mjera*. Dakle, *mjera* je tijelo, uređaj ili tvar koja utjelovljuje mjernu jedinicu. Na primjer, štap dug jedan metar jest mjera koja utjelovljuje jedinicu „metar“, uteg mase jedan kilogram utjelovljuje jedinicu „kilogram“, boca obujma jedne litre utjelovljuje jedinicu obujma „litra“ itd. Znači, metar (m), kilogram (kg) i litra (l) su mjerne jedinice duljine, mase i obujma, a tijela ili predmeti, u ovom slučaju štap, uteg i boca, njihove su pripadne mjere.

Razlikujemo dvije različite vrste mjernih jedinica, *osnovne* i *izvedene*. Sve osnovne jedinice, osim mjerne jedinice za masu koja se temelji na tvarnoj pramjeri kilograma, ostvaruju se realizacijom njihovih definicija u metrološkim laboratorijima diljem svijeta, dok su izvedene jedinice ostvarene korištenjem osnovnih jedinica, odakle i dolazi naziv „izvedene jedinice“.

Koliko istorodnih mjernih jedinica je potrebno za mjerenje nekog skupa istorodnih fizikalnih veličina? Odgovor je – samo jedna. A koliko ima mjernih jedinica? Velika raznolikost fizikalnih veličina zahtjeva i odgovarajući broj različitih mjernih jedinica. Pošto je mjerenje moguće samo istorodnim jedinicama, zaključujemo da mora biti barem toliko mjernih jedinica koliko ima različitih rodova fizikalnih veličina. Vrijednosti, znakovi, nazivi i uporaba mjernih jedinica određeni su međunarodnim dogovorima. „Zakonite mjerne jedinice“ naziv je za mjerne jedinice koje su zakonom propisane kao legalne za korištenje. Zbog osobite važnosti mjerenja u organiziranome ljudskom društvu, već su prve države propisivale zakonite mjerne jedinice. Danas je u većini zemalja svijeta, na temelju međunarodnih dogovora i normi, zakonito korištenje jedinica Međunarodnog sustava jedinica (SI sustav o kojem ćemo više reći u kasnijim poglavljima) te njihovih decimalnih višekratnika i nižekratnika. Također, iznimno je dopušteno korištenje nekih jedinica koje ne pripadaju jedinicama SI sustava uključujući njihove decimalne višekratnike i nižekratnike, te složenih jedinica koje dobivamo kombinacijom svih navedenih jedinica. U zemljama engleskog govornog područja još su u upotrebi tradicionalne angloameričke mjerne jedinice.

Danas mjerenje čini sliku materijalnog svijeta u kojem živimo i ima mnogo šire značenje i veću primjenu od onoga izravnog mjerenja, odnosno uspoređivanja fizikalnih veličina i istorodnih jedinica. U tom smislu glasi definicija: *mjerenje je skup pokusnih radnji (uključujući i računске) kojima se iskazuje kvantitativna vrijednost fizikalnih veličina, a mjerna jedinica polazna je ili referentna fizikalna veličina.*[14]

4.3.5. Etaloni ili pramjere

Ponekad je važno moći u potpunosti vjerovati točnosti mjernih uređaja koji se koriste. Zamislite da se nalazite u koži, po mnogim stručnjacima najboljeg atletičara u povijesti, Usaina Bolta. Godine ste utrošili na prireme i mislite da ste u najboljoj formi života. Dolazite na natjecanje sa jednim ciljem, oboriti svjetski rekord u utrci na 100 metara. Apsolutno ste pouzdani da ste se pripremili najbolje što ste mogli, ali ima još jedan faktor na koji vi nikako ne možete utjecati, na mjerenje vremena. Vama, a i cijelom Olimpijskom odboru i organizaciji, je važno da možete vjerovati da je uređaj kojim se mjerilo vrijeme pouzdan i da je rezultat mjerenja dovoljno precizan za potrebe mjerenja. Zamislite kakav bi skandal bio kada bi se nakon osvojenih 9 zlatnih olimpijskih medalja i postavljanja višestrukih svjetskih rekorda pojavila informacija da je netko „prčkao“ po štoperici i da se zbog toga istrčana vremena ne mogu priznati.

Prvo što nam padne na pamet kada pomislimo „kako bi mogli provjeriti ispravnost mjernog instrumenta?“ je da ga usporedimo sa nečim za što smo sto posto sigurni, bez imalo sumnje, da iznosi točno jedan metar, točno jednu sekundu, točno jedan kilogram itd. Kada kažemo „bez imalo sumnje“ mislimo na to da naš referentni objekt ne ovisi o tome da li je dan ili noć, da li je vrijeme sunčano ili pada kiša, da li uspoređujemo u Hrvatskoj ili u Japanu. Ti objekti ne smiju biti podložni promjenama tokom prolaska vremena ili smiju biti minimalno podložni promjenama. Na neki način možemo reći da postoje takve referentne „tvari“ koje se zovu *etaloni* ili *pramjere*, iako ćemo vidjeti zapravo da je prije riječ o definicijama nego o stvarnim objektima.

Pramjerom ili etalom naziva se tvarna mjera, mjerilo, referentna tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice ili jedne ili više vrijednosti kakve veličine kako bi mogli poslužiti kao referencija.[19]

U prošlosti je za određivanje tadašnjih standardnih mjernih jedinica uglavnom bila zadužena osoba na čelu vlasti, npr. kralj ili kraljica. Zbog toga nije čudno što su u različitim zemljama postojale različite standardne jedinice za iste fizikalne veličine, kao što je npr. duljina. To je predstavljalo problem kada su države htjele međusobno poslovati jer je trebalo osmisliti način na koji će se mjerne jedinice pretvarati kako bi se moglo kontrolirati da jedna od strana ne bude oštećena. Danas ipak, pošto države imaju potrebu pričati isti „jezik“ kada su u pitanju mjerenja, pramjera se utvrđuje i realizira prema preporukama međunarodnih konvencija. Pramjere koje se izrađuju prema međunarodnim preporukama nazivaju se *međunarodne* ili *svjetske pramjere (etaloni)*. U Sèvresu kraj Pariza, u Međunarodnom uredu za utege i mjere (Bureau international des Poids et Mesures, BIPM) pohranjene su tvarne međunarodne pramjere duljine 1 metar i mase 1 kilogram.

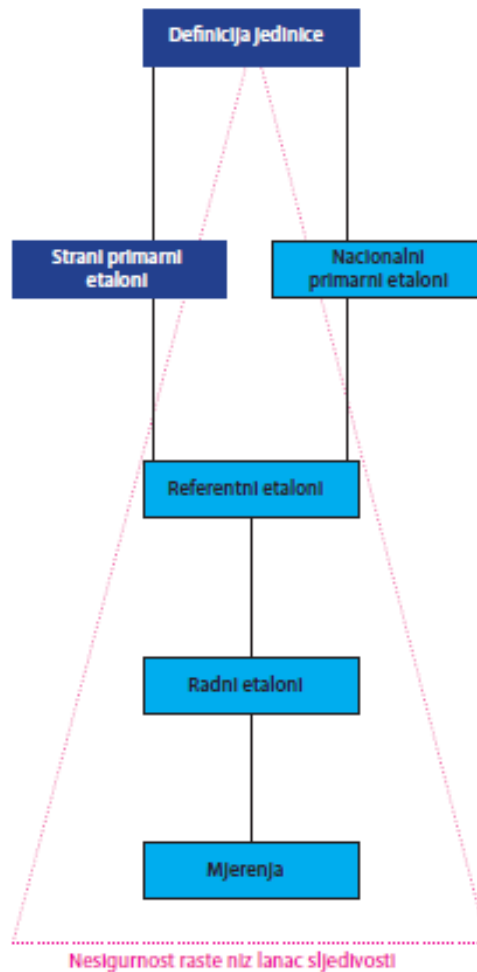
Danas je *kilogram* jedina preostala *tvarna* pramjera, sve ostale pramjere se realiziraju u laboratorijima diljem svijeta. Međunarodna pramjera metra, *prametar*, izrađen od slitine iridija i platine, čuva se i dalje u Međunarodnom uredu za utege i mjere, iako je njegova upotreba prekinuta 1960. godine kada je odlučeno da će metar biti definiran kao valna duljina određenoga elektromagnetskog zračenja, a onda je od 1983. godine metar određen brzinom svjetlosti, odnosno duljinom koju svjetlost prijeđe u određenom vremenu.



Slika 14: Etalon kilograma kakav je pohranjen u Međunarodnom uredu za utege i mjere [22]

Osim naziva *pramjera* i *etalon*, ponekad se još koristi i naziv *prototip*. Tako u raznim literaturama možemo naići na pojmove kao što su nacionalni prototip ili međunarodni prototip.

Prema uzoru na međunarodne pramjere napravljene su i *nacionalne pramjere*. To su „kopije“ međunarodnih pramjera izrađeni na isti način i od istih kovina, te se čuvaju u istim uvjetima kao i njihovi originali.



Slika 15: Lanac sljedivosti [19]

Pramjere u pravilu ne koristimo za izravno mjerenje fizikalnih veličina, nego one služe za kontrolu tzv. *radnih pramjera*. Radni primjeri se onda koriste za kalibraciju mjernih instrumenata i kontrolu mjera u praktičnom mjerenju. Lanac sljedivosti (slika 15) neprekidan je lanac usporedaba, od kojih svaka ima utvrđenu mjernu nesigurnost. Time se osigurava da

mjerni rezultat ili vrijednost etalona bude povezana s referentnim etalonima na višoj razini, koji u konačnici završavaju s primarnim etalom.[19]

Važnost međunarodne pramjere je ogromna zbog toga što je jedinstvena – to je jedina stvar u svemiru za koju smo, po definiciji, sto posto sigurni da ima masu 1 kilogram (npr. ako gledamo pramjeru mase). Zbog toga što je taj objekt definiran kao objekt čija je masa *točno 1 kilogram*, čak i da mu se masa s vremenom promijeni (recimo da nam prilikom korištenja ispadne iz ruku i prilikom pada mu se okrhne komadić) on će svejedno, po definiciji, imati masu 1 kilogram, iako će sada zasigurno biti malo manje mase. Dakle, njegova vrijednost se neće promijeniti, ali problemi se javljaju u tome što će sada svi ostali svjetski „kilogrami“ imati veću masu od međunarodnog etalona.

No, nažalost, postojanost tvari samo je želja koja se ne može ostvariti. Iako se nikome dosad nije dogodilo da mu je ispao etalon kilograma, i unatoč tome što je on čuvan u vrlo strogim uvjetima, u vakuumu i na određenoj temperaturi, podložan je promjenama kako vrijeme prolazi. Svakim vađenjem se neki atomi prljavštine zalijepe za njega. Njegova masa, odnosno vrijednost fizikalne veličine koju pramjera utjelovljuje, mijenja se s vremenom (par desetaka mikrograma po stoljeću), što možda i nije puno, ali jasno nam govori da tvarnu pramjeru kilograma nećemo moći koristiti zauvijek.

Iz tog razloga se nastoji u potpunosti napustiti pohranjivanje mjernih jedinica u obliku tvarne pramjere i za reprodukciju mjernih jedinica koristiti *prirodne pojave* kao što su periodične pojave u svemiru i atomima, za koje znamo da se pod istim okolnostima ponavljaju na potpuno jednak način.[14] Teško je i zamisliti kako bi tvarne pramjere za neke mjerne jedinice uopće izgledale – kao što je kelvin, na primjer.

Međutim, za proizvodnju mjerne jedinice na temelju prirodne pojave nije dovoljna samo prirodna pojava, nego je potreban i uređaj koji će koristeći se prirodnom pojavom reproducirati mjernu jedinicu. To znači da su tako realizirane mjerne jedinice zaista *međunarodne* – svaka zemlja koja ima i želi uložiti dovoljno novca u znanstvenike i tehnologiju može realizirati određene mjerne jedinice.

5. CGS, MKSA i SI sustav jedinica

5.1. CGS – sustav jedinica

Carl Friedrich Gauss, poznati njemački matematičar, tvorac je prvog sustava mjernih jedinica. On je bio veliki zagovornik metarskog sustava, te je 1832. godine prvi pokazao kako se odabirom nekoliko međusobno nezavisnih (osnovnih) mjernih jedinica mogu odrediti sve ostale (izvedene) jedinice nekog određenog područja fizike. Gauss je prvi znanstvenik koji je napravio *apsolutno* mjerenje Zemljinog magnetskog polja, a kao osnovne mjerne jedinice odabrao je: duljinu milimetar (mm), masu miligram (mg) i vrijeme sekundu (s). Na osnovu tih izabranih mjernih jedinica izgradio je sustav mjernih jedinica magnetskih veličina, nazvavši ga „apsolutnim sustavom mjernih jedinica“. S vremenom je, uz pomoć Wilhelma Webera, taj sustav proširen kako bi uključio i mjerenje električnih veličina.

Kako su u vrijeme uvođenja CGS – sustava mjernih jedinica elektricitet i magnetizam bile odvojene znanosti, u vezi s time nastali su i odvojeni CGS – sustavi; za elektricitet elektrostatski CGSE – sustav, a za magnetizam magnetostatski CGSM – sustav.[14]

1860. – ih godina Maxwell i Thompson, putem Britanskog udruženja za unaprijeđenje znanosti (The British Association for the Advancement of Science, BAAS), rade na dopuni i unaprijeđivanju primjene tog sustava na području elektromagnetizma. Kao rezultat svestranog proučavanja BAAS 1874. godine prihvaća i uvodi trodimenzionalni koherentni sustav mjernih jedinica s osnovnim jedinicama: centimetar za duljinu (cm), gram za masu (g) i sekundu za vrijeme (s), odakle dolazi naziv *CGS – sustav mjernih jedinica*. Razvoj fizike kao eksperimentalne znanosti bazirao se na tom sustavu jedinica.

1881. godine održan je Međunarodni elektrotehnički kongres u Parizu te je, uz prijedlog BAAS-a, kongres prihvatio i sustav od 5 „praktičnih“ mjernih jedinica, među kojima su *ohm* za jedinicu otpora, *volt* za jedinicu napona i *amper* za jedinicu struje.

CGS – sustav jedinica nikad nije doživio širu upotrebu osim one u znanstvene svrhe zbog toga što su svakodnevni objekti mnogo veći od samih mjernih jedinica, te je zbog toga neprikladan za korištenje (npr. udaljenost između gradova iznosi stotine tisuća centimetara). S vremenom je CGS – sustav zamijenjen MKS – sustavom (metar – kilogram – sekunda), koji se razvio u današnji SI sustav jedinica.

Međutim, jedinice CGS – sustava koriste se i danas, uglavnom u američkoj tehničkoj literaturi, u područjima elektrodinamike i astrofizike. Mnogi astronomi još uvijek tvrde da je CGS – sustav jednostavniji za uporabu.[23]

5.2. Giorgi ili MKSA – sustav mjernih jedinica

U tekstu knjige [14] postoji sjajan odlomak o MKSA sustavu jedinica, te ću ga ovdje citirati.

„Godine 1901. poznati talijanski fizičar Giovanni Giorgi predložio je nov i jedinstven „apsolutni“ sustav mjernih jedinica za područje elektromagnetizma. Naime, Giorgi je pokazao da se na osnovi jedinica MKS – sustava može graditi koherentan sustav mehaničkih i elektromagnetskih jedinica ako se trima osnovnim jedinicama MKS – sustava (metru, kilogramu i sekundi) doda i jedna elektromagnetska mjerna jedinica. Nakon svestranih diskusija i određenih spoznaja, za četvrtu osnovnu mjernu jedinicu izabrana je jedinica jakosti struje amper (znak A). Tako je nastao jedinstveni sustav koherentnih elektromagnetskih mjernih jedinica koji se zasniva na četiri osnovne mjerne jedinice: metar (m), kilogram (kg), sekunda (s) i amper (A).

Prema početnim slovima osnovnih mjernih jedinica na kojima se temelji taj sustav, on se naziva i MKSA – sustav mjernih jedinica.

Pokazalo se da se na osnovi jedinica MKS – sustava dodavanjem jedne mjerne jedinice mogu graditi koherentni sustavi i za druga područja fizike. Tako, na primjer, ako se osnovnim jedinicama MKS – sustava metru, kilogramu i sekundi doda jedinica termodinamičke temperature kelvin (znak K), dobiva se sustav termodinamičkih jedinica MKSK – sustav jedinica, koji se zasniva na četiri osnovne mjerne jedinice, a to su: metar (m), kilogram (kg), sekunda (s) i kelvin (K).

Međutim, MKSA – sustav mjernih jedinica imao je veliku prednost u to vrijeme prema ostalim sustavima, jer se on bez posebnih poteškoća mogao povezati s praktičnim elektrotehničkim jedinicama. Postigao je široku primjenu u elektrotehnici. Stoga je definitivno i međunarodno prihvaćen na 9. zasjedanju Generalne konferencije za mjere i utege 1948. godine pod nazivom Giorgijev sustav ili MKSA – sustav, kao opće prikladan sustav jedinica.

Valja napomenuti da su Giorgijeve ideje bile vrlo značajne za metrologiju uopće, a posebno za elektromagnetizam, jer je njegov MKSA – sustav preteča današnjega Međunarodnog sustava jedinica.“

5.3. Međunarodni (SI) sustav jedinica

Nakon završetka 2. Svjetskog rata, u svijetu se koristila nekolicina različitih sustava mjernih jedinica, od kojih su neki bili varijacije metarskog sustava. Raznolikost sustava mjernih jedinica uzrokovala je poteškoće u povezivanju znanosti i ekonomije. Stoga se 9. Generalna konferencija za utege i mjere (CGPM), na prijedlog Međunarodne unije za čistu i primjenjenu fiziku (International Union of Pure and Applied Physics, IUPAP), 1948. godine obratila Međunarodnom komitetu za utege i mjere (CIPM) sa zahtjevom da se definira i izradi jedinstveni sustav mjernih jedinica koji bi svim članicama Konvencije o metru bio prikladan za usvajanje.

Na temelju provedenog istraživanja, 10. Generalna konferencija za utege i mjere 1954. godine prihvatila je „Praktični sustav jedinica“ (Système Pratique d'Unités)[14] za međunarodnu upotrebu koji se zasnivao na šest osnovnih jedinica, a to su: metar, kilogram, sekunda, te amper za jakost električne struje, kelvin za termodinamičku temperaturu i kandela za svjetlosnu jakost.

1960. godine 11. Generalna konferencija za utege i mjere odlučila je da će se tom „praktičnom sustavu jedinica“ dodijeliti naziv *međunarodni sustav jedinica*, te da će međunarodni simbol (znak) toga sustava biti „SI“, što potječe od njegova izvornog naziva na francuskom jeziku – Système Internationak d'Unités. Na istoj konferenciji utvrđena su pravila oko pisanja predmetaka osnovnim jedinicama i o izvedenim jedinicama.[24]

Međunarodni komitet za utege i mjere (CIPM) prihvatio je 1969. godine rezoluciju kojom se predlaže da se za množinu (količinu) tvari uvede mjerna jedinica *mol*. 1971. godine 14. Generalna konferencija za utege i mjere prihvatila je mjernu jedinicu mol kao sedmu osnovnu jedinicu Međunarodnog sustava jedinica.

Tako od 1971. godine Međunarodni sustav jedinica (SI) ima sedam osnovnih mjernih jedinica, koje su prikazane u tablici [2], od kojih se mogu tvoriti mjerne jedinice za sva područja fizike i znanosti općenito.[14]

6. Mjerne jedinice SI sustava

6.1. Osnovne jedinice

Mjerne jedinice SI sustava dijelimo na 2 kategorije: *osnovne i izvedene jedinice*.

Odlukom Generalne konferencije, koja je razmatrala prednosti jedinstvenog sustava jedinica imajući na umu međunarodne odnose, školstvo i znanost, odlučeno je temeljiti SI sustav na 7 osnovnih fizikalnih veličina: duljinu, masu, vrijeme, električnu struju, termodinamičku temperaturu, svjetlosnu jakost i množinu tvari. Njihove pripadajuće mjerne jedinice su: *metar, kilogram, sekunda, amper, kelvin, kandela i mol*. Ovih 7 dobro definiranih jedinica zovemo *osnovne jedinice* i one su međusobno nezavisne.

Fizikalna veličina	Osnovne SI jedinice	
	Ime	Znak
duljina	metar	l (L)
masa	kilogram	kg
vrijeme	sekunda	s
električna struja	amper	A
termodinamička temperatura	kelvin	K
svjetlosna jakost	kandela	cd
množina tvari	mol	mol

Tablica 2: Osnovne jedinice Međunarodnog (SI) sustava jedinica

Definicije osnovnih SI jedinica:

Metar je duljina puta koji u vakuumu prijeđe svjetlost u vremenskome odsječku od $1/299792458$ sekunde.

Kilogram je jedinica mase: ona je jednaka masi međunarodne pramjere kilograma.

Sekunda je trajanje $9.192.631.770$ perioda zračenja koje odgovara prijelazu između dviju hiperfinskih razina osnovnog stanja cezijeva atoma 133.

Amper je ona stalna struja koja bi, kad bi se održavala u dva ravna usporedna vodiča neizmjerne duljine i zanemariva kružnog presjeka postavljena u vakuumu na međusobnoj udaljenosti od 1 metar, proizvodila između tih vodiča silu jednaku $2 * 10^{-7}$ njutna po metru duljine.

Kelvin je jedinica termodinamičke temperature koja je jednaka $1/273,16$ termodinamičke temperature trojne točke vode.

Mol je množina tvari u sustavu koji sadrži onoliko elementarnih jedinki koliko ima atoma u 0,012 kilograma ugljika 12. Elementarne jedinice mogu biti atomi, molekule, ioni, elektroni ili pojedinačno navedene skupine takvih čestica.

Kandela je svjetlosna jakost izvora koji u danome smjeru zrači jednobojno zračenje frekvencije $540 * 10^{12}$ herca i koji ima jakost zračenja u tome smjeru od $1/683$ vata po steradianu.[19]

6.2. Izvedene jedinice

U drugu kategoriju SI jedinica spadaju *izvedene jedinice*. Izvedene jedinice izražavaju se pomoću osnovnih jedinica uporabom matematičkih znakova množenja i dijeljenja, odnosno izvode se iz osnovnih SI jedinica u skladu s fizikalnim vezama među veličinama.

Na primjer, iz fizikalne veze između veličine *duljina* koja se mjeri jedinicom metar (m) i veličine *vrijeme* koja se mjeri jedinicom sekunda (s) može se izvesti veličina *brzina* koja se mjeri jedinicom m/s.[19]

Nekim izvedenim jedinicama dajemo posebne nazive i znakove te njih također možemo koristiti na isti način kao osnovne jedinice kako bi došli do novih izvedenih jedinica.

Broj izvedenih jedinica koje su od značaja za znanost i tehnologiju je praktički beskonačan. Razvojem novih područja znanosti znanstvenici smišljaju nove fizikalne veličine i jedinice koje se izvode iz postojećih u svrhu što boljeg prikaza rezultata za dano područje znanosti.

Tablica 3 prikazuje neke izvedene SI jedinice koje nemaju posebne simbole i znakove, a tablica 4 prikazuje nekoliko izvedenih SI jedinica sa posebnim nazivima i znakovima.

Izvedena veličina	Izvedena jedinica	Znak
ploština	četvorni metar	m^2
obujam	kubični metar	m^3
brzina	metar u sekundi	$m * s^{-1}$
ubrzanje	metar u sekundi na kvadrat	$m * s^{-2}$
gustoća	kilogram po kubičnome metru	$kg * m^{-3}$
kutna brzina	radijan u sekundi	$rad * s^{-1}$
kutno ubrzanje	radijan u sekundi na kvadrat	$rad * s^{-2}$
jakost električnog polja	volt po metru	$V * m^{-1}$
specifični toplinski kapacitet	mol po kubičnome metru	$mol * m^{-3}$

Tablica 3: Primjeri izvedenih SI jedinica izraženih s pomoću osnovnih SI jedinica [19]

Izvedena veličina	Izvedena SI jedinica	Znak	Izražena s pomoću SI jedinica	Izražena s pomoću osnovnih SI jedinica
frekvencija	herc	Hz		s^{-1}
sila	njutn	N		$m * kg * s^{-2}$
energija, rad, količina topline	džul	J	$N * m$	$m^2 * kg * s^{-2}$
kapacitet	farad	F	C/V	$m^{-2} * kg^{-1} * s^4 * A^2$
električni otpor	om	Ω	V/A	$m^{-2} * kg * s^{-3} * A^{-2}$
magnetski tok	veber	Wb	$V * S$	$m^2 * kg * s^{-2} * A^{-1}$
gustoća magnetskog toka	tesla	T	Wb/m^2	$kg * s^{-2} * A^{-1}$
indukcija	henri	H	Wb/A	$m^2 * kg * s^{-2} * A^{-2}$
osvjetljenje	luks	lx	lm/m^2	$m^2 * m^{-4} * cd = m^{-2} * cd$
aktivnost (radionuklida)	bekerel	Bq		s^{-1}
ravninski kut	radijan	rad		$m * m^{-1} = 1$
prostorni kut	steradian	sr		$m^2 * m^{-2} = 1$
katalitička aktivnost	katal	kat		$s^{-1} * mol$

Tablica 4: Primjeri izvedenih SI jedinica sa posebnim nazivima i znakovima [19]

Do 1995. godine postojala je i treća kategorija SI jedinica, tzv. *dopunske jedinice* u koju su spadali radijan i steradian, kada je ukinuta čime su te jedinice postale izvedene jedinice SI sustava s posebnim nazivima i znakovima.[25]

6.3. Jedinice izvan SI sustava

U tablici 5 prikazani su primjeri jedinica izvan SI sustava koje su prihvaćene za uporabu s jedinicama SI sustava zbog njihove široke uporabe ili zbog toga što se upotrebljavaju u posebnim područjima fizike.

Veličina	Jedinica	Znak	Vrijednost u SI jedinicama
vrijeme	minuta	min	$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$
	sat	h	$1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$
	dan	d	$1 \text{ d} = 24 \text{ h}$
ravninski kut	stupanj	°	$1^\circ = (\pi/180) \text{ rad}$
	minuta	'	$1' = (1/60)' = (\pi/10800) \text{ rad}$
	sekunda	"	$1'' = (1/60)'' = (1/648000) \text{ rad}$
obujam	litra	l, L	$1 \text{ l} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$
masa	metrička tona	t	$1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$
	karat		$1 \text{ karat} = 2 * 10^{-4} \text{ kg} = 200 \text{ mg}$
	atomska jedinica mase	u	$1 \text{ u} = 1,6605402 (10) * 10^{-27} \text{ kg}$
tlak zraka i fluida	bar	bar	$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
duljina	morska milja		$1 \text{ morska milja} = 1852 \text{ m}$
	angstrom	Å	$1 \text{ Å} = 0,1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$
brzina	čvor		$1 \text{ morska milja u satu} = (1852/3600) \text{ m/s}$
ploština	ar	a	$1 \text{ a} = 100 \text{ m}^2$
	hektar	ha	$1 \text{ ha} = 10^4 \text{ m}^2$

Tablica 5: Primjeri jedinica izvan SI sustava koje su prihvaćene za uporabu u posebnim područjima[19]

6.4. Predmeci SI jedinica

CGPM je, osim osnovnih i izvedenih jedinica, prihvatio i preporučio niz predmetaka i njihovih znakova koji se koriste u formiranju decimalnih višekratnika i nižekratnika SI jedinica. Njih koristimo pri jednostavnijem izražavanju vrijednosti veličina kada su one puno veće ili manje od njihovih pripadnih SI jedinica.

Predmeci SI jedinica					
Faktor	Naziv	Znak	Faktor	Naziv	Znak
10^1	deka	da	10^{-1}	deci	d
10^2	hekto	h	10^{-2}	centi	c
10^3	kilo	k	10^{-3}	mili	m
10^6	mega	M	10^{-6}	mikro	μ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	tera	T	10^{-12}	piko	p
10^{15}	peta	P	10^{-15}	femto	f
10^{18}	eksa	E	10^{-18}	ato	a
10^{21}	zeta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	jota	Y	10^{-24}	jokto	y

Tablica 6: Predmeci SI jedinica[19]

6.5. Realizacija jedinica metar, kilogram i sekunda

Realizirati mjernu jedinicu znači pretvoriti njenu definiciju u stvarnost, što možemo postići na tri načina: realizacijom mjerne jedinice iz same definicije jedinice, reprodukcijom mjernog standarda ili prihvaćanjem nekog objekta kao standard. Kada je u pitanju SI sustav jedinica, Međunarodni ured za utege i mjere (BIPM) je tijelo odgovorno za realizaciju osnovnih jedinica.

U ovom poglavlju ćemo spomenuti načine na koje se realiziraju mjerne jedinice koje se pojavljuju i koriste od početka razvoja čovjekova metrološkog koncepta, odnosno od početka znanosti: metar, kilogram i sekunda.

6.5.1. Metar

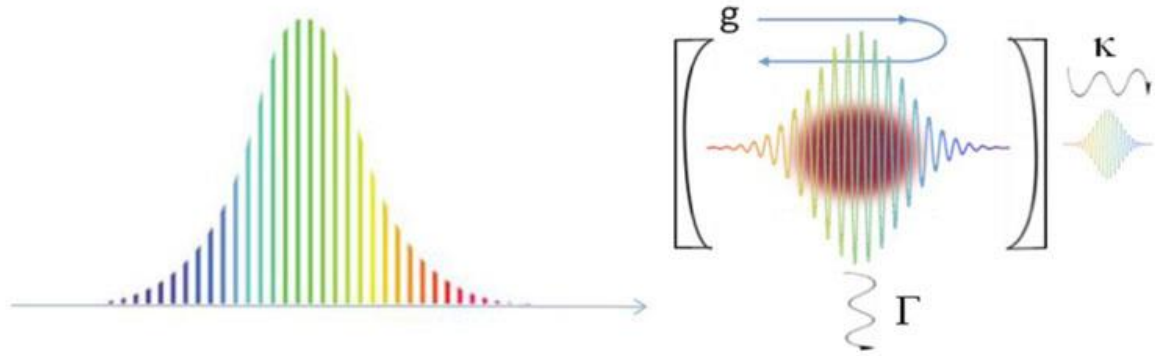
Definicija mjerne jedinice duljine i njena praktična realizacija temelje se na prihvaćenoj brojčanoj vrijednosti brzine svjetlosti koja iznosi 299 792 458 m/s, iz čega je odmah vidljivo

da je direktno vezana i za mjernu jedinicu vremena, sekundu. Ovakva definicija, koja povezuje metar sa duljinom koju svjetlost prevoli u određenom vremenu, prihvaćena je na 17. Generalnoj konferenciji za utege i mjere (CGPM) 1983. godine, te je u isto vrijeme CIPM donio prijedloge za postupke njegove realizacije. Metar možemo realizirati jednom od sljedećih metoda:[26]

- a) Pomoću duljine l puta kojeg ravni elektromagnetski val prijeđe u vakuumu za vrijeme t ; duljinu l dobijemo pomoću izmjerenog vremena t putem relacije $l = c_0 * t$, gdje brzina svjetlosti u vakuumu iznosi $c_0 = 299\,792\,458$ m/s.
- b) Pomoću valne duljine λ ravnog elektromagnetskog vala u vakuumu frekvencije f ; valnu duljinu λ dobijemo pomoću izmjerene frekvencije f putem relacije $\lambda = c_0/f$, gdje brzina svjetlosti u vakuumu iznosi $c_0 = 299\,792\,458$ m/s

Prva metoda prigodna je za mjerenje većih udaljenosti, dok je druga metoda bolja u laboratorijskim istraživanjima.[27] Kako bi se izbjegla konstantna potreba za mjerenjem frekvencije koristeći se drugom metodom, CIPM je predložio razne izvore zračenja kao standarde valne duljine. Jedno od najvažnijih i najčešće korištenih zračenja u svijetu metrologije je ono koje proizvodi He – Ne laser, čija je valna duljina 632,8 nm. Ovaj laser koristi se u mnogim laboratorijima diljem svijeta za praktičnu realizaciju SI metra, te također i za baždarenje frekvencija drugih lasera koji se koriste u području atomske fizike.

Područje ultrabrze optike i optičke frekventne metrologije temelji se na mogućnosti precizne kontrole optičkog zračenja femtosekundnih lasera. Izvanredan napredak u tom području donio je izum tzv. *tehnike frekventnog češlja*, za što je dodjeljena Nobelova nagrada za fiziku 2005. godine. Optički spektar tih lasera čini velik broj diskretnih, pravilno raspoređenih, oštih linija različite valne duljine (frekvencije) – otkuda i dolazi ime *frekventni češalj*. Frekventni češalj femtosekundnog lasera može se koristiti kao frekventno ravnalo za mjerenje optičkih frekvencija, na isti način na koji se ravnalo koristi za mjerenje duljine.[28]



Slika 16: Frekventni češalj [28]

6.5.2. Kilogram

Mjernu jedinicu mase kilogram predstavlja masa *međunarodnog etalona* utjelovljenog u obliku cilindra napravljenog od slitine platine i iridija koji se čuva u Međunarodnom uredu za utege i mjere. Za realizaciju jedinice kilogram potrebno je napraviti utege koji su jednake mase kao i međunarodni etalon, a usporedba se vrši u zraku pomoću vage sa nepouzdanošću reda veličine 10^9 .

Kako je međunarodni prototip podložan neizbježnom površinskom onečišćenju, koje rezultira povećanjem njegove mase za otprilike $1\mu g$ godišnje, CIPM je proglasio da se za referentnu masu, s kojom se uspoređuju svi utezi, uzima masa međunarodnog etalona odmah nakon njegovog čišćenja za koje postoji propisana posebna metoda.[29]

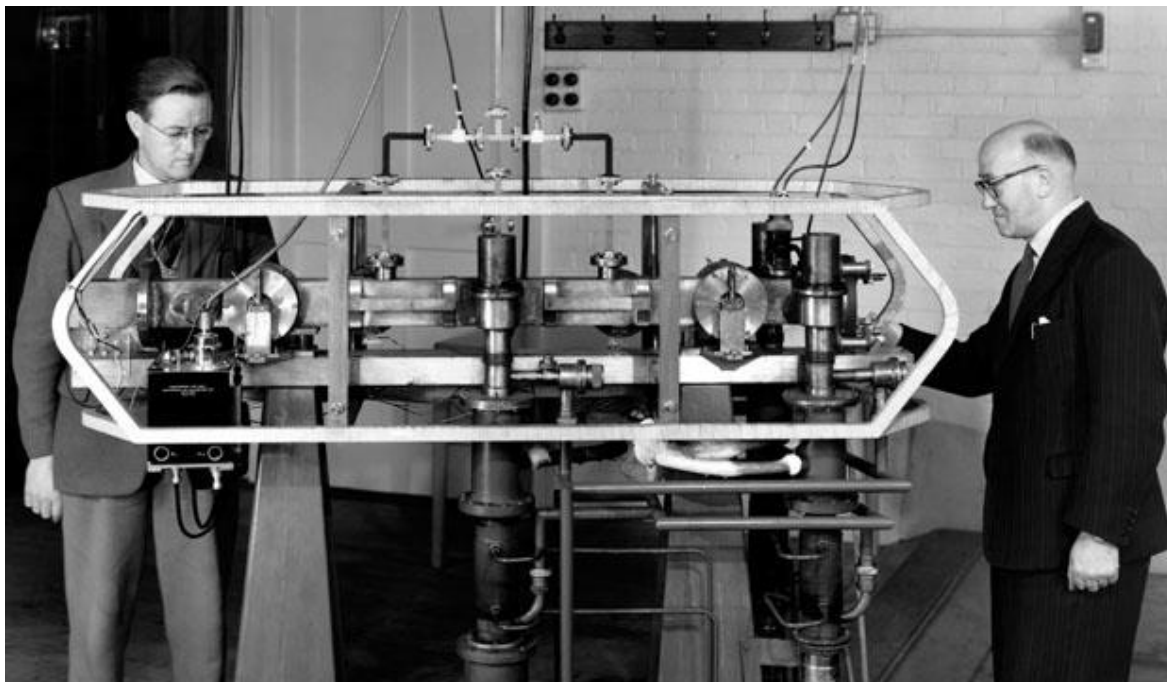
Proizvodnja masenih standarda koji predstavljaju višekratnike i nižekratnike jedinice kilogram, te njihovo baždarenje pomoću vage, odvija se na vrlo sličan način.

6.5.3. Sekunda

Jedna sekunda je nekada bila definirana kao $1/86400$ dio srednjeg solarnog dana. Današnja definicija, koja se oslanja na zračenje koje odgovara hiperfinom prijelazu atoma Cezija-133, prihvaćena je 1966. godine na 13. zasjedanju Generalne konferencije za utege i mjere.

Ne postoji mnogo metroloških laboratorija u svijetu koji mogu realizirati mjernu jedinicu vremena sa visokom točnošću. Najbolji metrološki nacionalni instituti su NIST (SAD), PTB (Njemačka), NPL (UK), METAS (Švicarska) i BIPM (Francuska). Sekundu realiziramo pomoću *atomske sata*, za kojeg se smatra da je najtočniji sat na svijetu. Prvi atomski sat

napravljen je 1955. godine u Velikoj Britaniji, te je od tada njegova izrada toliko napredovala da se smatra jednim od najpreciznijih uređaja koje je čovjek izumio u svojoj povijesti. Najnovija generacija atomskih satova ima najveću grešku od 1 sekunde u 30 milijuna godina.



Slika 17: Prvi atomski sat na bazi cezija-133 u društvu njegova izumitelja Louisa Essena (desno) i Jack Parrya (lijevo) [30]

Princip rada atomskog sata temelji se na atomskoj fizici: koristi mikrovalni signal koji elektroni u atomu emitiraju prilikom mijenjanja energetske razine. Atomski sat na bazi cezija je sat koji koristi elektromagnetsko zračenje koje nastaje kod prijelaza između dviju hiperfinskih razina osnovnog stanja atoma cezija-133 na temperaturi od 0 K.

Danas postoji više vrsta atomskih satova, npr. oni koji koriste vodik-1, cezij-133 ili rubidij-87, od kojih je onaj koji koristi cezij-133 najtočniji. Svi oni rade na sličan način, a najveća razlika među njima se odnosi na element koji koriste kao sredstvo otkrivanja promjene energetske razine. Tako cezijev atomski sat koristi snop cezijevih atoma, pri čemu sat uz pomoć magnetskog polja razdvaja cezijeve atome različitih energetske razine; vodikovi atomski satovi održavaju atome vodika na odgovarajućoj energetskoj razini u jednom spremniku sa zidovima od specijalnog materijala, tako da atomi ne gube prebrzo visoku energetsku razinu; rubidijevi atomski satovi, najjednostavniji i najkompaktniji,

koriste staklenu ćeliju sa plinom rubidijem, koja mijenja upijanje svjetlosti na optičkoj rubidijevoj frekvenciji kad je okolna mikrovalna frekvencija točna.

2008. godine fizičari iz NIST-a* predstavili su *kvantni sat* koji se zasniva na pojedinim ionima berilija i aluminija. To je bio najtočniji sat do tada sa maksimalnom greškom od 1 sekunde u milijardu godina. Ista grupa fizičara je 2010. godine prikazala novi, dvostruko točniji sat, koji se zasniva na pojedinim ionima magnezija i aluminija.

* Engl. National Institute of Standards and Technology

7. Budućnost SI sustava

Najbitnija značajka SI sustava je njegova dosljednost pri upotrebi u svim aspektima života; bilo da se radi o trgovini, industrijskoj proizvodnji, zdravlju, očuvanju okoliša itd. Od početka njegovog razvoja i upotrebe pa sve do danas on (SI sustav) se temeljio na sedam osnovnih jedinica (Tablica 2) iz kojih su se mogle dobiti sve ostale jedinice, tzv. izvedene jedinice.

U prethodnom poglavlju smo spomenuli sve različite načine na koji su definirane osnovne jedinice: na primjer, jedine preostale tvarne pramjere koja utjelovljuje jedinicu kilogram, specifičnog fizikalnog stanja kao što je trojna točka vode za jedinicu kelvin ili prirodne konstante kao što je brzina svjetlosti za jedinicu metar.

Međutim, da bi mjerne jedinice bile od koristi nije ih dovoljno samo definirati, nego je potrebno moći ih i realizirati. Što se tiče tvarne pramjere (kilogram), njegova definicija i realizacija su jedna, te ista stvar. Iako to zvuči kao najjednostavnija opcija, tvarni objekti sa sobom nose rizik od oštećenja ili gubitka. Ostale mjerne jedinice definirane su apstraktno ili idealizirano te se njihova realizacija razlikuje konceptualno od samih definicija što omogućuje da se realiziraju neovisno jedna o drugoj, u bilo koje vrijeme na bilo kojem mjestu. Kao dodatak, kako se znanost i tehnologija razvijaju moguće je doći do superiornijeg načina realizacije neke mjerne jedinice, bez potrebe za mijenjanjem same definicije jedinice. To se najbolje vidi iz povijesnog razvoja mjerne jedinice metra, koji je u početku bio realiziran tvarnom pramjerom, a danas je vezan za brzinu svjetlosti.

CGPM je tijelo koje je zaslužno za odobravanje i donošenje promjena u SI sustavu koje su nužne zbog razvoja znanosti i tehnologije ili zbog potreba društva. Od službenog osnutka SI sustava 1960. godine bilo je nekoliko promjena, ali ona najveća mogla bi se dogoditi u studenom 2018. godine na 26. Generalnoj konferenciji za utege i mjere - naime, ako Generalna konferencija (CGPM) usvoji prijedlog Međunarodnog komiteta za utege i mjere (CIPM), SI sustav jedinica se više neće bazirati na sedam osnovnih jedinica, nego na *sedam temeljnih konstanti* čija je brojčana vrijednost točno određena, a ako se one izraze pomoću osnovnih jedinica SI sustava moguće je izvesti sve ostale jedinice. U temeljne konstante spadaju Boltzmanova konstanta (koja povezuje temperaturu s energijom), Planckova konstanta (koja može povezati masu sa elektromagnetskom energijom), naboj elektrona i Avogadrova konstanta (veličina koja definira jedan mol tvari).[31]

Zadatak CODATA TGFC* je ažurirati ove konstante svake 4 godine, posljednji puta je to bilo 2014. godine.⁵⁰ Kao što je već spomenuto u poglavlju 4, vrijednost neke fizikalne veličine izražena je kao produkt brojčanog iznosa i mjerne jedinice. Znači da vrijednost temeljne konstante izražavamo na isti način. Ono što obavezno moramo objaviti prilikom objave svakog rezultata jest nepouzdanost, odnosno pogrešku pri mjerenju koja je neizbježna zbog granica tehnologije.

Ako 26. Generalna konferencija prihvati prijedlog CIPM, brojčana vrijednost temeljnih konstanti biti će prihvaćena kao egzaktna, odnosno njena vrijednost se neće mijenjati i neće biti nepouzdanosti. Ako pritom vrijednost temeljne konstante izrazimo odgovarajućim SI jedinicama, fiksiranjem brojčane vrijednosti konstante automatski definiramo mjernu jedinicu pošto produkt brojčane vrijednosti i mjerne jedinice odgovara vrijednosti temeljne konstante, za koju je prihvaćeno da je invarijantna.

Ova promjena neće utjecati na naš svakodnevni život, ali imati će veliki utjecaj na svijet metrologije. Najveća promjena biti će napuštanje definicije i realizacije kilograma putem tvarne pramjere. Umjesto toga kilogram će se realizirati putem prirodne pojave temeljene na Planckovoj konstanti h . Jednom metodom određuje se broj atoma u dvije sfere napravljene od izotopa silicija Si-28 koje su obje jednake mase kao referentni kilogram. Ova metoda omogućuje znanstvenicima određivanje vrijednosti Avogadrove konstante, koju zatim pretvaraju u vrijednost Planckove konstante. Drugom metodom, engleskog naziva „Watt balance“, Planckova konstanta se određuje važući uteg, baždaren u odnosu na referentni kilogram, putem elektromagnetske sile.[32]

Sedam temeljnih konstanti izabrano je na način koji omogućava da se bilo koja jedinica SI sustava zapiše izravno definirajući konstantu ili produktom ili omjerom dvije ili više konstanti.

Tablica 7 prikazuje definirajuće temeljne konstante i odgovarajuće SI jedinice koje definiraju.

* Committee on Data for Science and Technology (CODATA) Task Group on Fundamental Constants (TGFC)

<i>Konstanta</i>	<i>Znak</i>	<i>Vrijednost</i>	<i>Mjerna jedinica</i>
Frekvencija hiperfine tranzicije cezija	$\Delta\nu_{Cs}$	9 192 631 770	Hz
Brzina svjetlosti u vakuumu	c	299 792 458	$m s^{-1}$
Planckova konstanta	h	$6,626\ 070\ 040 * 10^{-34}$	$J s$
Elementarni naboj	e	$1,602\ 176\ 620\ 8 * 10^{-19}$	C
Boltzmannova konstanta	k	$1.380\ 648\ 52 * 10^{-23}$	$J K^{-1}$
Avogadrova konstanta	N_A	$6.022\ 140\ 857 * 10^{23}$	mol^{-1}
Svjetlosna učinkovitost	K_{cd}	683	$lm W^{-1}$

Tablica 7: Temeljne konstante i njihove vrijednosti [31]

Kao što znamo, današnji SI sustav jedinica temelji se na sedam međusobno nezavisnih osnovnih jedinica iz kojih se mogu izvesti sve ostale izvedene jedinice. Ako CGPM prihvati prijedlog CIPM u 2018. godini, SI sustav će biti baziran na ovih sedam temeljnih konstanti (tablica 7) pomoću kojih će se, ako ih izrazimo SI jedinicama, moći dobiti sve jedinice SI sustava, osnovne i izvedene. Koristeći konstantu kako bi definirali jedinicu odvajamo definiranje jedinice od njene realizacije, odnosno otvaramo mogućnost da se tehnološkim razvojem zamijeni trenutna metoda realizacije jedinice sa novom, superiornijom metodom bez potrebe da mijenjamo definiciju same jedinice. Ovakav prerađeni SI sustav jedinica podcrtava znanost i trgovinu te osigurava uniformno precizna mjerenja u rasponu od infinitezimalnog do enormnog.

Definiranjem jedinice putem specifičnih uvjeta ili fizičkog stanja postavljamo „temeljnu“ granicu preciznosti realizacije koju ne možemo izbjeći. Međutim, ako omogućimo upotrebu bilo koje fizikalne jednadžbe koja povezuje definirajuću konstantu sa veličinom koju želimo mjeriti, u principu ne postoji granica preciznosti realizacije određene mjerne jedinice.

8. Metodički dio

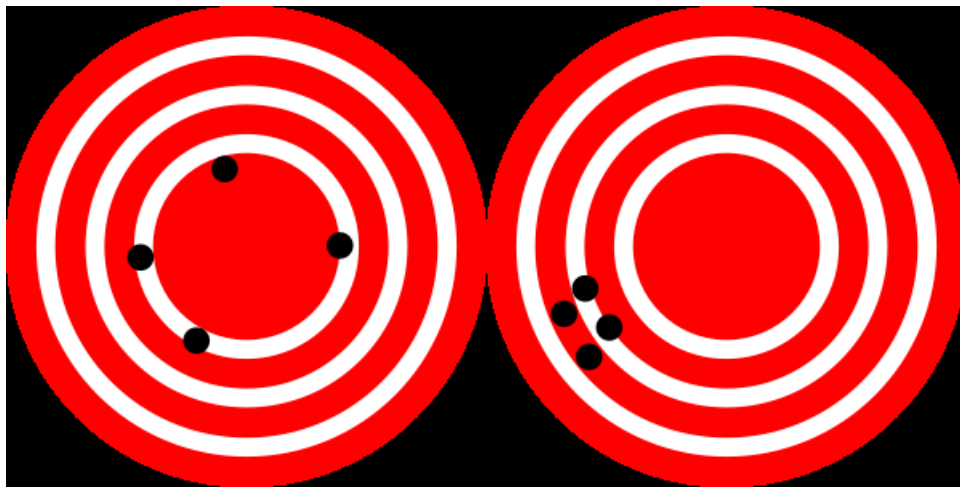
8.1. Problemi s interpretacijom mjerenja i pogreške mjerenja u srednjoškolskoj nastavi fizike

Pokus i mjerenje su temeljne karakteristike fizike kao znanosti. Premda nema dvojbe da bi nastava fizike bez pokusa bila površna i nepotpuna, pokus sam po sebi nije dovoljan da bi se poboljšalo učeničko razumijevanje fizike. Ukoliko učenici sudjeluju samo pasivno u pokusu on im neće biti ništa više od obične zabave, bez obzira koliko pokus bio atraktivan ili vješto izveden. Pokusi mogu služiti za upoznavanje pojave i otvaranje problema (na početku sata) ili za rješavanje problema (u kasnijim fazama sata), te da bi poslužili svrsi oni moraju biti suštinski dio nastave u koji su učenici aktivno uključeni. [34]

Mjerenje je baza znanstvenog istraživanja i to je jedna vrlo kompleksna vještina koja zahtjeva osmišljanje, planiranje i provedbu istraživačkog pokusa, prikupljanje podataka, konstrukciju modela i matematičkog opisa, analizu te interpretaciju rezultata. Pogreška mjerenja je pojam koji se uvodi u srednjoškolskoj nastavi fizike s kojom učenici često imaju problema u razumijevanju. Pogreška, odnosno neodređenost mjerenja je pojam prema kojem učenici često imaju otpor jer imaju poteškoća s prihvaćanjem ideje da je pogreška kod svakog mjerenja neizbježna. Neki učenici ne vide potrebu za ponavljanjem mjerenja jer smatraju da jednim mjerenjem mogu odrediti pravu vrijednost mjerene veličine. Mnogi učenici smatraju da je moguće izvesti „savršeno“ mjerenje i doći do prave vrijednosti veličine višestrukim ponavljanjem mjerenja, ali kada ih se traži da zapišu rezultate mjerenja veliki broj učenika kao rezultat zapisuje samo izračunatu srednju vrijednost u obliku broja sa pridruženom mjernom jedinicom (npr. $d = 10 \text{ cm}$), pritom izostavljajući pripadajuću pogrešku mjerenja. Čest je slučaj da učenici ne raspoznaju slučajnu od sustavne pogreške ili precizno mjerenje od točnoga. Ideja da svaki mjerni rezultat daje približnu vrijednost mjerene veličine, a ne pravu vrijednost, te da obavezno uključuje neku neodređenost učenicima predstavlja izazov na koji se nastavnici moraju fokusirati.

Da li se neodređenost može u potpunosti eliminirati i o čemu ovisi preciznost mjerenja učenicima se može pojednostavniti, na primjer, putem eksperimenta. Prije početka sata nastavnik iz učionice izvuče jedan stol te ga se ostavi pored vrata učionice. Zatim, kada sat počne, nastavnik podijeli učenike u grupe koje će mjeriti duljinu toga stola, poželjno svaki učenik ili nekoliko predstavnika grupe, pritom koristeći instrument koje im nastavnik uručuje. Mjerni instrumenti trebaju biti različiti (ravnalo, metar na razvlačenje, laser), svaki sa svojom mjernom skalom. Učenicima treba dati naputak da rezultat mjerenja napišu na

komad papira te da rezultat ne govore nikome dok ih nastavnik ne odluči sve napisati na ploču. Poželjno je ponoviti mjerenje, ali da pritom grupe zamijene instrumente i da se zamijene osobe koje mjere ako je to moguće. Ideja pokusa je približiti učenicima ideju neodređenosti u mjerenju varirajući niz faktora kao što su mjerni instrumenti, sam mjerач ili nedostatak informacija (npr. od kuda do kuda treba mjeriti duljinu stola). Cilj je postići bolje razumijevanje grubih, sustavnih i aproksimativnih pogrešaka, te određivanja gornje granice preciznosti mjernog uređaja. Također, postiže se bolje razumjevanje razlike između točnog i preciznog mjerenja.



Slika 18: Točno, ali neprecizno mjerenje (lijevo) i precizno, ali netočno mjerenje (desno) [34]

Za prikazivanje rezultata u srednjoškolskoj nastavi fizike dovoljno je napraviti više mjerenja, te odrediti srednju vrijednost i maksimalnu apsolutnu pogrešku mjerenja. [34,35] Rezultat je tada oblika (npr. rezultat mjerenja duljine stola):

l/cm	$\Delta l/cm$
125.45	0.02
125.40	0.03
125.50	0.07
125.42	0.01
125.38	0.05

Duljina stola:

$$l = (125.43 \pm 0.07) \text{ cm}$$

Ovakav zapis rezultata govori da rezultat mjerenja nije jedan broj, nego interval brojeva unutar kojih se nalazi prava vrijednost. U ovom je slučaju duljina mjerene veličine između 125.38 cm i 125.50 cm, a vrijednost 125.43 cm je najbolja procjena te duljine (srednja vrijednost - predstavnik intervala).

Sve je češća praksa kod nastavnika tražiti od učenika da grafički prikažu rezultate mjerenja, primjerice na brojevnom pravcu. Grafičko prikazivanje rezultata je praktična metoda za uspoređivanje dva ili više različitih setova mjerenja. Iako se može činiti da grafičkim prikazom rezultata možemo pomoći učenicima u stvaranju mentalne slike podataka, te im pomoći u boljem razumijevanju značenja rezultata, nije napravljeno puno istraživanja koja bi potvrdila tu pretpostavku. U ovom metodičkom dijelu napraviti će se osvrt na jedno takvo istraživanje provedeno na području Hrvatske, objavljenom u članku [36].

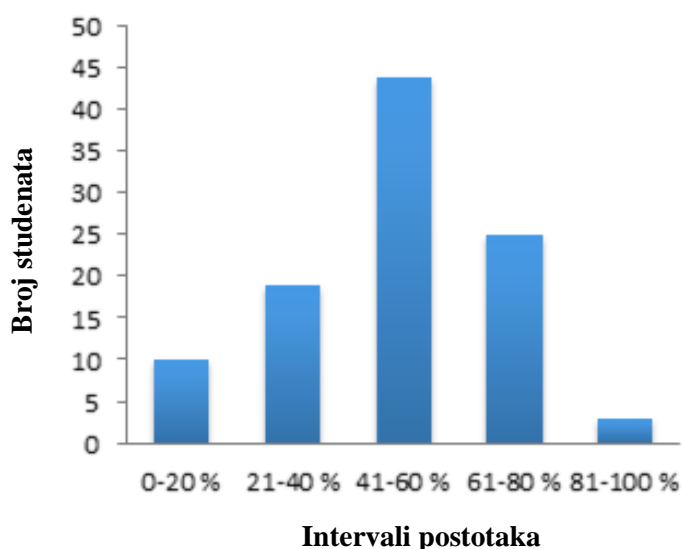
U istraživanju je sudjelovao 101 student fizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu. Otprilike polovica ispitanika (48) bili su studenti prve godine, te se još nisu imali prilike upoznati laboratorijskim kolegijima, a ostatak ispitanika (53) bili su studenti viših godina. Zbog toga što je otprilike polovica ispitanika tek došla iz škole na fakultet, rezultati istraživanja mogu se odnositi i na učenike u srednjim školama. Istraživanjem se htjelo provjeriti da li, i u kojim okolnostima, grafički prikaz rezultata pomaže studentima/učenicima u interpretaciji rezultata mjerenja. U tu svrhu osmišljen je kratak pismeni test kojim se provjeravaju osnovne vještine mjerenja kao što su zapisivanje rezultata, odnos prema grubim pogreškama, uspoređivanje podataka dvaju različitih mjerenja, te provjera razumijevanja razlike između točnog i preciznog mjerenja. Test se sastojao od 8 pitanja sa višestrukim izborom odgovora, a neka pitanja bila su podijeljena na dva dijela u kojima su ispitanici uz izabrani odgovor u prvom dijelu zadatka morali dati objašnjenje zašto su baš taj odgovor izabrali. Također, napravljene su dvije verzije testa: u jednoj verziji testa su uz numeričku vrijednost podataka priloženi i njihovi grafički prikazi

na brojevnom pravcu, dok je u drugoj verziji testa izostavljen grafički prikaz i dane su samo numeričke vrijednosti. Pitanja korištena u testu su ili malo izmijenjena pitanja koja su korištena u prijašnjim istraživanjima ili su novoosmišljena od strane autora istraživanja. Test se u cijelosti može vidjeti u dodatku A.

8.2. Rezultati i zaključak

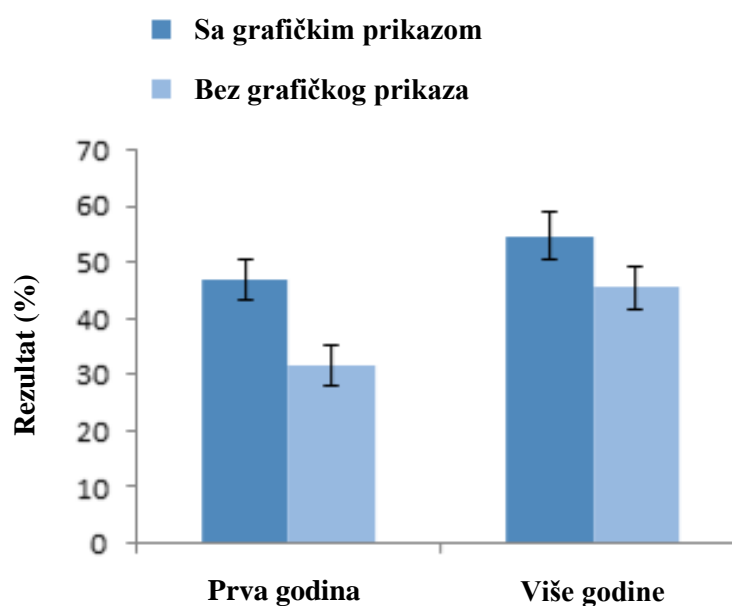
Pitanja su sastavljena na način da kod ispitanika provjeravaju razumijevanje srednje vrijednosti kao najboljeg predstavnika intervala, razlike između točnog i preciznog mjerenja, pravilnog zapisa rezultata mjerenja, te njihov odnos prema grubim pogreškama prilikom analize rezultata mjerenja. Jedno od pitanja (8. pitanje) identično je u oba testa i u tom pitanju nema grafičkog prikaza podataka, te ono služi kao neka vrsta kontrolnog pitanja za grupe koje se ispituje. Nije bilo vremenskog roka za rješavanje testa, ali većina ispitanika test je riješila za 15-20 minuta. Na testu je bilo moguće skupiti maksimalno 14 bodova, a testove su ispravljala dva autora, nezavisno jedan o drugome. Na temelju prikupljenih bodova rezultati su prikazani u postocima riješenosti testa.

Nakon provođenja i ocjenjivanja testova, srednja vrijednost postignutog rezultata testa, i njegova standardna devijacija, iznosila je $(49 \pm 20)\%$. Najveći broj studenata imao je prikupljeno između 40% i 60% bodova, samo troje studenata skupilo je više od 80% bodova, a njih 10 skupilo je manje od 20% bodova. Raspodjela rezultata svih ispitanika prikazana je na slici 19.



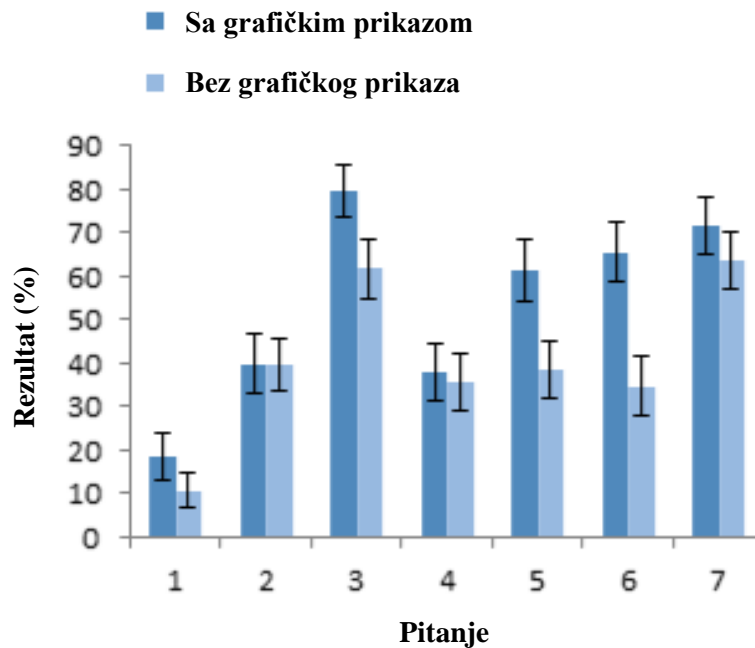
Slika 19: Raspodjela rezultata svih ispitanika [36]

Slika 20 prikazuje usporedbu postignutih rezultata između grupa koje su rješavale test sa priloženim grafičkim prikazom podataka i grupa koje su rješavale test bez grafičkog prikaza rezultata, te prikazuje usporedbu postignutih rezultata za studente prve godine u odnosu na studente viših godina. Iz slike možemo vidjeti da su u oba slučaja bolje rezultate postigli oni studenti koji su rješavali primjer testa sa grafičkim prikazom podataka, te da su bolje rezultate postigli studenti viših godina u odnosu na studente prve godine.



Slika 20: Rezultati studenata prve godine i viših godina (sa i bez grafičkog prikaza) [36]

I za kraj, informaciju o tome koliko je grafički prikaz podataka pridonio točnosti rješavanja svakog pitanja zasebno govori nam slika 21. Iz nje se može vidjeti da je studentima prvo pitanje bilo najteže te da je za njega najmanji postotak riješenosti, a da su najbolji rezultati ostvareni u trećem i sedmom pitanju.



Slika 21: Rezultati svakog pitanja zasebno (sa i bez grafičkog prikaza) [36]

Ispitanici su najviše poteškoća imali sa pitanjem 1, gdje se od njih očekivalo da uoče grubu pogrešku u mjerenju te da ju zanemare pri računanju srednje vrijednosti. Samo 18% studenata izabralo je točan odgovor „a) 22 mm“. Više studenata odabralo je točno objašnjenje, nego točan odgovor. Mogući uzrok tome je što se kod nekih studenata javila pogreška pri računanju srednje vrijednosti, dok je kod ostalih studenata gruba pogreška vjerojatno ostala neprimjećena sve dok nisu došli do drugog dijela zadatka gdje se ona pojavila među objašnjenjima rezultata, te su tada došli do zaključka da se to mjerenje treba zanemariti. Najveći broj studenata zaokružio je odgovor „c) 25 mm“, te kao objašnjenje naveo da se rezultat dobio zbrajanjem svih mjerenja, te dijeljenjem sa brojem 6.

Pitanje 2 odnosilo se na razumijevanje pripadajuće pogreške mjerenja. Otprilike polovica studenata (55%) zaokružila je točan odgovor „d) mjerena se veličina nalazi negdje između 18 i 26 mm“, dok je njih 39% dalo točno objašnjenje „d) nikad ne možemo znati točnu vrijednost mjerene veličine“. Najčešće zaokruživani netočan odgovor bio je odgovor „c) mjerena se veličina nalazi negdje između 18 mm i 23 mm“ (20%).

Pitanje 3 smatra se najlakšim pitanjem u testu koje se odnosilo na uspoređivanje dva seta mjerenja sa različitim rasponom, ali istom srednjom vrijednošću, te je ovaj problem točno riješilo u prosjeku 70% studenata. Točan odgovor „a) rezultati grupe A bolji su od rezultata

grupe B“ odabralo je 84% studenata, dok je točno objašnjenje „b) rezultati grupe A su između 20 i 30 mm, a rezultati grupe B između 11 i 41 mm“ odabralo 61% studenata.

Pitanje 4 tražilo je studente da ocijene slaganje dva seta mjerenja čiji se intervali znatno preklapaju, ali im se razlikuju srednje vrijednosti. Otprilike pola studenata (44%) zaokružilo je odgovor da se rezultati mjerenja slažu jedno s drugim, a 36% studenata zaokružilo je točno objašnjenje „a) intervali izmjerenih vrijednosti većim se dijelom preklapaju“. Otprilike isti broj studenata odgovorio je da se rezultati mjerenja ne slažu, te su kao objašnjenje u 27% slučajeva odabrali odgovor „c) srednje vrijednosti mjerenja obje grupa su različite“.

Pitanje 5 konceptualno je bilo slično pitanju 4, samo se u ovom slučaju intervali nisu nimalo preklapali. Većina studenata (91%) zaokružila je točan odgovor, da se rezultati mjerenja ne slažu. Najveći broj studenata (50%) kao objašnjenje je izabralo točan odgovor „a) intervali izmjerenih vrijednosti koje su dobile grupe A i B se ne preklapaju“, dok je drugo najpopularnije objašnjenje opet bio odgovor „b) srednje vrijednosti mjerenja obje grupa su različite“.

Pitanja 6 i 7 provjeravala su razumijevanje razlike između točnog i preciznog mjerenja. U pitanju 6, gdje je mjerenje bilo precizno, ali netočno, 49% studenata zaokružilo je točan odgovor, 29% studenata smatralo je da je mjerenje točno, ali neprecizno, dok je 14% studenata smatralo da mjerenje nije ni precizno ni točno. U pitanju 7, gdje je mjerenje bilo točno, ali neprecizno, 67% studenata zaokružilo je točan odgovor, dok je 26% studenata smatralo da je mjerenje i točno i precizno.

Pitanje 8 tražilo je od studenata da pravilno prikažu rezultat mjerenja, te se ovim pitanjem provjeravalo razumijevanje bitnih znamenaka prilikom zapisivanja rezultata. Točan odgovor zaokružilo je u prosjeku 70% studenata, čime je ovo postao drugi najbolje riješen zadatak u testu. Točan odgovor „d) $g = (9.80 \pm 0.02) \text{ m/s}^2$ “ odabralo je 76% studenata, dok je najčešće izabrano objašnjenje bilo točno objašnjenje „d) broj znamenaka u rezultatu određen je pogreškom, koja je bitan dio rezultata“ (78%). Najčešće odabrani krivi odgovor je „c) $g = (9.79945 \pm 0.02) \text{ m/s}^2$ (14%), a najčešće krivo objašnjenje „c) treba precizno zapisati srednju vrijednost (na više decimala) i navesti pripadnu pogrešku“ (16%).

Svrha ovog istraživanja bila je doći do zaključka da li grafički prikaz podataka pomaže studentima/učenicima u interpretaciji rezultata mjerenja i pripadajuće pogreške mjerenja, te na temelju prikupljenih podataka možemo zaključiti da grafički prikaz pomaže u toj namjeri jer je grupa koja je rješavala test sa grafičkim prikazom postigla bolje rezultate od grupe koja

je rješavala test bez grafičkog prikaza. Iako kod svakog pitanja zasebno nije velika razlika u rezultatu između testova s grafičkim prikazom i bez grafičkog prikaza, rastući trend je vidljiv kod svakog pitanja. Međutim, iako je vidljiv rastući trend, pomalo je razočaravajuće da je srednja vrijednost postignutog rezultata 49%, te da su samo 3 ispitanika postigla rezultat veći od 80%. Istraživanje je pokazalo da studenti u Hrvatskoj imaju slične poteškoće u razumijevanju rezultata mjerenja i pripadajuće pogreške mjerenja kao i studenti drugih zemalja čiji su rezultati objavljeni u nekim ranijim istraživanjima. Grafičko prikazivanje rezultata je praktična metoda za uspoređivanje dva ili više različitih setova mjerenja. Kvalitetno učenje postiže se samo onda kada se informacije učenicima prezentiraju na način koji ne preopterećuje njihov mentalni kapacitet. Grafičko prikazivanje rezultata, na primjer preklapanje dva brojeva pravca, pomaže u smanjenju kognitivnog opterećenja kod učenika za razliku od samo numeričkog prikaza rezultata.

Rezultat mjerenja nastavnik je uvijek dužan diskutirati sa učenicima kako bi dobio direktan uvid u njihovo razumijevanje rezultata i pripadne pogreške mjerenja, te koji su mogući razlozi zašto se ona pojavila. Grafičko prikazivanje rezultata je metoda koju je poželjno koristiti što je češće moguće jer pomaže učenicima u vizualiziranju podataka, te smanjuje kognitivno naprezanje kod učenika.

9. Zaključak

Zabave radi, zamislite da vam netko ponudi da će vam dati milijun eura, ako uspijete s njim/njom voditi razgovor jednu minutu bez da se ijednom pozovete na mjere i utege (razgovor se mora voditi, ne smije se samo šutiti i čekati da minuta prođe). Mislite li da bi uspjeli?

Metrolozi su pametnim odabirom osnovnih mjernih jedinica SI sustava ujedinili praktički cijeli svijet i unjeli „mir“ u svijet mjernih jedinica. Možemo reći da je do Francuske revolucije vladao kaos u svijetu mjernih jedinica, gdje je svaka zemlja imala svoj sustav mjernih jedinica kojih su se rijetko odricali. Tek uvođenjem metarskog sustava s vremenom dolazi do prihvaćanja zajedničkog jezika i uviđanja prednosti takvog praktičnog sustava. Danas velika većina ljudi ne zna uopće što predstavlja i kako je realizirana koja osnovna mjerna jedinica SI sustava, ali svejedno ih svaki dan sa sigurnošću upotrebljavaju i komuniciraju pomoću njih bez ikakvog nesporazuma. Znanost i tehnologija napreduju brže nego ikada, te mogućnost redefiniranja SI sustava pomoću temeljnih konstanti predstavlja veliki potencijal u svijetu međunarodnog metrološkog jedinstva. U slučaju odobravanja odluke o redefiniranju SI sustava, najveća posljedica biti će napuštanje definicije kilograma u obliku tvarne pramjere. Međutim, koristeći konstantu kako bi definirali jedinicu odvajamo definiranje jedinice od njene realizacije, odnosno otvaramo mogućnost da se tehnološkim razvojem zamijeni trenutna metoda realizacije jedinice sa novom, superiornijom metodom bez potrebe da mijenjamo definiciju same jedinice.

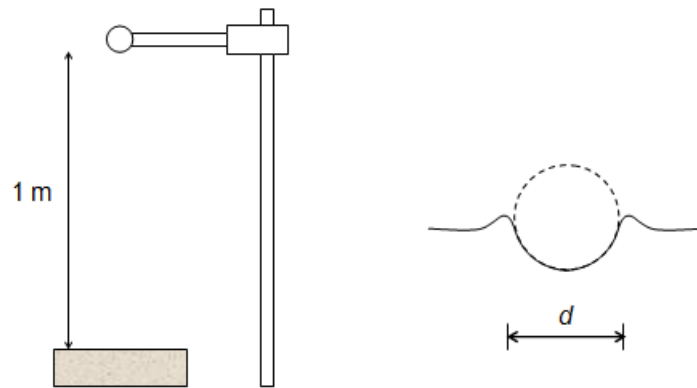
Dodaci

Dodatak A – Test sa grafičkim prikazom rezultata

Ime i prezime: _____ Smjer: _____

*Uputa: Molimo Vas da redom rješavate zadatke i da se ne vraćate na one koje ste već riješili. Kod nekih zadataka se traži obrazloženje nakon što odaberete jedan od ponuđenih odgovora. Molimo Vas da odaberete odgovor koji **najviše** odgovara razlogu zbog kojeg ste odabrali neki od odgovora. Ako među ponuđenim odgovorima ne možete pronaći onaj koji odgovara Vašem razmišljanju, molimo Vas napisite svojim riječima obrazloženje.*

Studenti pažljivo ispuštaju kuglicu bez početne brzine s visine 1 m i mjere promjer traga d koji kuglica ostavi u pijesku.



1a. Studenti su dobili sljedeće vrijednosti mjerenja:

d/mm 23 18 26 40 23 20

Koji broj najbolje predstavlja ovaj skup mjerenja?

- a) 22 mm
- b) 23 mm
- c) 25 mm
- d) 29 mm



1b. Obrazloženje:

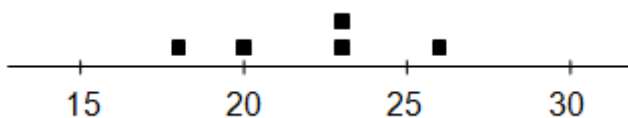
- a) Taj se broj dobije ako se zbroje sve vrijednosti mjerenja i taj zbroj podijeli sa 6.
- b) Taj se broj dobije ako se izbací mjerenje od 40 mm, zbroje preostale vrijednosti mjerenja i taj zbroj podijeli s 5.
- c) Taj se broj pojavio dva puta u mjerenjima, a ostali samo jedanput.
- d) Taj je broj na sredini izmjerenih vrijednosti.
- e) Drugo obrazloženje: _____

2a. Studenti su dobili sljedeće vrijednosti mjerenja promjera traga kuglice u pijesku d :

d/mm 23 18 26 23 20

Što mogu studenti zaključiti o vrijednosti mjerene veličine d ?

- a) Mjerena veličina iznosi 22 mm.
- b) Mjerena veličina iznosi 23 mm.
- c) Mjerena se veličina nalazi negdje između 18 i 23 mm.
- d) Mjerena se veličina nalazi negdje između 18 i 26 mm.



2b. Obrazloženje:

- a) Taj se broj dobije ako se zbroje sve vrijednosti mjerenja i taj zbroj podijeli s 5.
- b) Mjerenje od 26 mm odstupa od srednje vrijednosti, pa tu vrijednost treba odbaciti.
- c) Taj se broj pojavio dva puta u mjerenjima, a ostali samo jedanput.
- d) Nikad ne možemo znati točnu vrijednost mjerene veličine.
- e) Drugo obrazloženje: _____

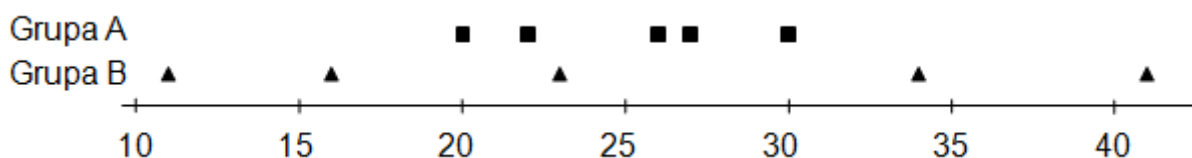
3a. Dvije su grupe studenata dobile sljedeće rezultate mjerenja promjera traga kuglice u pijesku d , izražene u mm:

Grupa A 26 30 22 27 20 srednja vrijednost = 25

Grupa B 23 11 41 16 34 srednja vrijednost = 25

Usporedite dobivene rezultate.

- a) Rezultati grupe A bolji su od rezultata grupe B.
- b) Rezultati grupe B bolji su od rezultata grupe A.
- c) Rezultati objiju grupa jednako su dobri.
- d) Ne može se procijeniti koji su rezultati bolji.



3b. Obrazloženje:

- a) Obje su grupe dobile iste srednje vrijednosti.
- b) Rezultati grupe A su između 20 mm i 30 mm, a rezultati grupe B između 11 mm i 41 mm.
- c) Rezultati grupa A i B se ne slažu – moguće je da su iste srednje vrijednosti dobivene slučajno.
- d) Grupe A i B su koristile različite metode, ali to nije važno ako je konačni rezultat jednak.
- e) Ako se radi više mjerenja, dobije se ista srednja vrijednost, bez obzira na greške u mjerenju.
- f) Drugo obrazloženje: _____

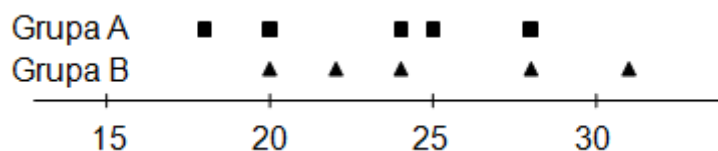
4a. Dvije su grupe studenata dobile sljedeće rezultate mjerenja promjera traga kuglice u pijesku d , izražene u mm:

Grupa A 18 25 20 28 24 srednja vrijednost = 23

Grupa B 20 28 22 24 31 srednja vrijednost = 25

Slažu li se rezultati mjerenja grupe A i grupe B?

- a) Da.
- b) Ne.
- c) Ne može se procijeniti.



4b. Obrazloženje:

- a) Intervali izmjerenih vrijednosti većim se dijelom preklapaju.
- b) Obje su grupe dobile vrijednosti 20, 24 i 28 mm.
- c) Srednje vrijednosti mjerenja objiju grupa su različite.
- d) Interval izmjerenih vrijednosti širok je 10 mm za grupu A, a 11 mm za grupu B.
- e) Razlika od 2 mm između dviju srednjih vrijednosti je velika u odnosu na mjerenu veličinu.
- f) Izmjerene vrijednosti su previše raspršene.
- g) Drugo obrazloženje: _____

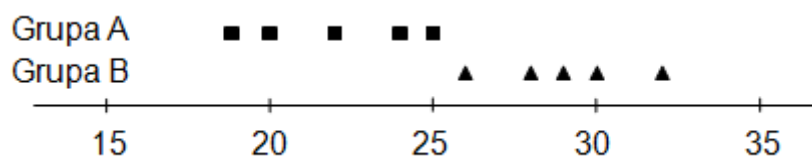
5a. Dvije su grupe studenata dobile sljedeće rezultate mjerenja promjera traga kuglice u pijesku d , izražene u mm:

Grupa A 19 22 20 25 24 srednja vrijednost = 22

Grupa B 29 32 28 26 30 srednja vrijednost = 29

Slažu li se rezultati mjerenja grupe A i grupe B?

- a) Da.
- b) Ne.
- c) Ne može se procijeniti.



5b. Obrazloženje:

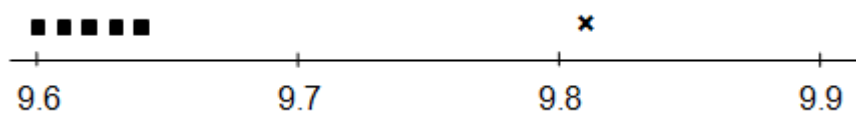
- a) Intervali izmjerenih vrijednosti koje su dobile grupe A i B se ne preklapaju.
 - b) Srednje vrijednosti mjerenja obju grupa su različite.
 - c) Interval izmjerenih vrijednosti širok je 6 mm za obje grupe.
 - d) Razlika od 7 mm između dviju srednjih vrijednosti je mala u odnosu na mjerenu veličinu.
 - e) Izmjerene vrijednosti su previše raspršene.
 - f) Drugo obrazloženje: _____
-

6. Studenti mjere akceleraciju slobodnog pada g (u Zagrebu iznosi 9.81 m/s^2). Dobili su sljedeće vrijednosti mjerenja g , izražene u m/s^2 :

9.63 9.64 9.62 9.60 9.61 srednja vrijednost = 9.62

Kakve su točnost i preciznost tog mjerenja?

- a) Mjerenje je i točno i precizno.
- b) Mjerenje je točno, ali nije precizno.
- c) Mjerenje je precizno, ali nije točno.
- d) Mjerenje nije ni točno ni precizno.

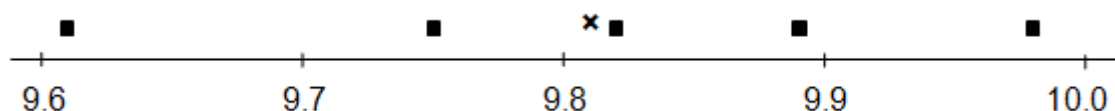


7. Studenti mjere akceleraciju slobodnog pada g (u Zagrebu iznosi 9.81 m/s^2). Dobili su sljedeće vrijednosti mjerenja g , izražene u m/s^2 :

9.61 9.98 9.82 9.75 9.89 srednja vrijednost = 9.81

Kakve su točnost i preciznost tog mjerenja?

- a) Mjerenje je i točno i precizno.
- b) Mjerenje je točno, ali nije precizno.
- c) Mjerenje je precizno, ali nije točno.
- d) Mjerenje nije ni točno ni precizno.



8a. Studenti mjere akceleraciju slobodnog pada g . Računajući srednju vrijednost mjerenja na kalkulatoru dobiju broj 9.79945. Pogreška njihovog mjerenja iznosi 0.02 m/s^2 . Koji je od sljedećih zapisa konačnog rezultata mjerenja najbolji?

- a) $g = 9.79945 \text{ m/s}^2$
- b) $g = 9.8 \text{ m/s}^2$
- c) $g = (9.79945 \pm 0.02) \text{ m/s}^2$
- d) $g = (9.80 \pm 0.02) \text{ m/s}^2$
- e) $g = (9.8 \pm 0.02) \text{ m/s}^2$

8b. Obrazloženje:

- a) Treba napisati što više znamenaka u rezultatu da bude precizniji. Pogreška ovisi o broju mjerenja, pa je nema smisla zapisivati.
 - b) Rezultat uvijek moramo zaokružiti na jednu decimalu. Pogreška ovisi o broju mjerenja, pa je nema smisla zapisivati.
 - c) Treba precizno zapisati srednju vrijednost (na više decimala) i navesti pripadnu pogrešku.
 - d) Broj znamenaka u rezultatu određen je pogreškom, koja je bitan dio rezultata.
 - e) Drugo obrazloženje: _____
-

Literatura

- [1] Vera, H. Weights and measures // A companion to the history of science, First edition
https://books.google.hr/books?hl=hr&lr=&id=Q918CwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA459&dq=Encyclopaedia+of+Historical+Metrology,+Weights,+and+Measures&ots=sgc0vXjjqr&sig=x4jUeIOywr3jD6h8bXbOU-Vzjro&redir_esc=y#v=onepage&q=Encyclopaedia%20of%20Historical%20Metrology%2C%20Weights%2C%20and%20Measures&f=false 01.10.2017.
- [2] My heart in ancient Egypt
<http://abemkemet.blogspot.hr/2012/06/ruler-for-ruler.html> 01.10.2017.
- [3] Wikipedia, Prapovijesna tehnologija
https://hr.wikipedia.org/wiki/Prapovijesna_tehnologija 01.10.2017.
- [4] Faktopedija – ilustrirana enciklopedija, 6. dopunjeno izdanje, Mozaik knjiga, Zagreb 2002., str.370-380
- [5] Kula, W. Measures and men, Princeton University Press 1986., United Kingdom
https://books.google.hr/books?hl=hr&lr=&id=Bur_AwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Encyclopaedia+of+Historical+Metrology,+Weights,+and+Measures&ots=L6mkSjmXrS&sig=pdjsBXjFvhAXqfun9XSI94vL16Y&redir_esc=y#v=onepage&q=Encyclopaedia%20of%20Historical%20Metrology%2C%20Weights%2C%20and%20Measures&f=true 01.10.2017.
- [6] Webb, D. Museum receives ancient spearthrowers
https://www.floridamuseum.ufl.edu/vertpaleo/auquilla9_1/spearthrowers.htm
01.10.2017
- [7] National geographic – Povijest svijeta, Naklada Uliks, Rijeka 2009., str. 17-27
- [8] Ancient Jericho – the first walled city in history
https://www.reddit.com/r/MapPorn/comments/5nxqya/ancient_jericho_the_first_walled_city_in_history/ 01.10.2017.
- [9] Wikipedia, Akan goldweights
https://en.wikipedia.org/wiki/Akan_goldweights 01.10.2017.
- [10] Wikipedia, Foot
<https://en.wikipedia.org/wiki/Foot> 01.10.2017
- [11] Jakobović, Z. Od karata do kilograma, Svijet po mjeri
<http://svijetpomjeri.hr/wp-content/uploads/2016/09/Od-karata-do-kilograma.pdf>
01.10.2017.

- [12] Jakobović, Z. Hrvatska i konvencija o metru, Hrvatska revija, 3. broj, 2013. godina
<http://www.matica.hr/media/uploads/hr/2013/hr-2013-3.pdf> 01.10.2017.
- [13] Weighed in the balances
<https://bleon1.wordpress.com/tag/scales/> 01.10.2017.
- [14] Ražnjević, K. Fizikalne veličine i mjerne jedinice, Znanje, Zagreb 1985., str. 1-100.
- [15] Jakobović, Z. Od lakta do metra, Svijet po mjeri
<http://svijetpomjeri.hr/wp-content/uploads/2016/09/Od-lakta-do-metra.pdf>
01.10.2017.
- [16] Witteveen, W. The Royal Cubit
<https://www.willemwitteveen.com/the-royal-cubit/> 01.10.2017.
- [17] Wikipedia, Pramjera
<https://hr.wikipedia.org/wiki/Pramjera> 01.10.2017.
- [18] UK Metric Association, Making the first international kilograms and meters
<http://www.metric.org.uk/first-kg-prototype> 01.10.2017.
- [19] Howarth P.; Redgrave F. Mjeriteljstvo ukratko, 3. izdanje, prijevod: Molnar M.
<http://www.dzm.hr/download/repository/MjeriteljstvoUkratko3.pdf> 01.11.2017.
- [20] European space agency, Rosetta
<http://sci.esa.int/rosetta/14615-comet-67p/> 01.11.2017.
- [21] Obrada rezultata mjerenja, PMF – Fizički odsjek, Zagreb
<http://www.phy.pmf.unizg.hr/~sanja/wp-content/uploads/2012/09/POGRE%C5%A0KE-PRI-MJERENJU.pdf> 01.11.2017.
- [22] BIPM, International Prototype of the Kilogram
<https://www.bipm.org/en/bipm/mass/ipk/> 15.10.2017.
- [23] Wikipedia, CGS sustav
https://hr.wikipedia.org/wiki/CGS_sustav 15.10.2017.
- [24] BIPM, SI Brochure: The International System of Units [8th edition, 2014.]
<https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/section1-8.html> 15.10.2017.
- [25] Wikipedia, Međunarodni sustav mjernih jedinica
https://hr.wikipedia.org/wiki/Me%C4%91unarodni_sustav_mjernih_jedinica
15.10.2017.

- [26] Samoudi, B. Realisation of the metre by using a femtosecond laser frequency comb: applications in optical frequency metrology
https://www.metrology-journal.org/articles/ijmqe/full_html/2017/01/ijmqe160044/ijmqe160044.html
 15.10.2017.
- [27] National Physical Laboratory, Realisation of SI Units
http://www.kayelaby.npl.co.uk/units_and_fundamental_constants/1_1/1_1_2.html
 15.10.2017.
- [28] Centre for Advanced Laser Techniques, Frekventni češalj
<http://calt.ifs.hr/research/cesalj/> 15.10.2017.
- [29] BIPM, Practical realization of the definition of the kilogram
<https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/kilogram.html> 15.10.2017.
- [30] Wikipedia, Atomic clock
https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_clock 15.10.2017.
- [31] NIST, Bringing the World Closer to Revised Measurement System, Scientists Update Four Key Fundamental Constants
<https://www.nist.gov/news-events/news/2017/10/bringing-world-closer-revised-measurement-system-scientists-update-four-key> 10.11.2017.
- [32] Gibney, E. Nature, Kilogram conflict resolved at last
<http://www.nature.com/news/kilogram-conflict-resolved-at-last-1.18550>
 10.11.2017.
- [33] Teorija informacija – predavanja, Slučajni signali
http://lab405.fesb.hr/TINF/teorijainf_10.htm 10.11.2017.
- [34] Planinić, M. Predavanja iz metodike nastave fizike 1, Zagreb: PMF, 2014.
- [35] Sušac A.; Pećina P. Praktikum iz eksperimentalne nastave fizike 1, Zagreb: PMF, 2014.
- [36] Sušac A.; Bubić A.; Martinjak P.; Planinić M.; Palmović M. Graphical representations of data improve student understanding of measurement and uncertainty: An eye-tracking study
<https://journals.aps.org/prper/pdf/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.020125>
 01.12.2017.