

UDK 388.161:531.711

528.081

Pregledni rad

## O OSNOVNOJ MJERNOJ JEDINICI U GEODEZIJI

Dušan BENČIĆ — Zagreb\*

### UVOD

Duljina je jedna od brojnih fizikalnih veličina. Karakteristika duljine je njena aksiomska veličina, tj. ona je do danas jedna od osnovnih polaznih veličina, za razliku od izvedenih veličina. Zbog toga se i njena jedinica smatra ishodišnom nezavisnom osnovnom jedinicom.

Prema osnovnoj jednadžbi meteorologije:

$$\text{mjerni broj (brojčani iznos)} = \frac{\text{veličina}}{\text{mjerna jedinica}}$$

Slijedi, da je u osnovi svakog mjerenja određivanje mjernog broja, što zahtjeva i poznavanje jedinice. U načelu jednostavno, u praktičnoj primjeni složeno — počevši od određivanja i međunarodnog usvajanja jedinice sve do njene reprodukcije, odnosno prenošenja jedinice od etalona do mjerila i mjernih sredstava, kao i njihove kontrole, čime se danas bave brojne metrološke institucije u svijetu.

Za mnoge fizikalne veličine mjerna jedinica se utjelovljuje na taj način što se određena osobina izvedenog tijela proglasi mjernom jedinicom. Takvo utjelovljenje (engl. physical embodiment, njem. Verkörperung) mjerne jedinice naziva se *mjera*. Zadatak je nacionalnih metroloških institucija, da se prema usvojenim baždarnim sustavima izvrši prenošenje tzv. *nacionalne mjere* ili *pramjere*, odnosno nacionalnog etalona na referentna mjerna sredstva nižih stupnjeva po određenim razinama točnosti, a čime se bave mjerni laboratoriji.

Od pramjere se zahtjeva potpuna postojanost jedinice (»vječno prkošenje zuba vremena«), koju pramjera utjelovljuje, no to je praktički nemoguće postići. Međutim, vrhunska metrologija želi se tom idealu što više približiti nastojanjem da mjernu jedinicu ne pohranjuje u obliku pramjere, već da jedinicu reproducira bilo kad, bilo gdje u određenim uvjetima po poznatoj francuskoj krilatici, da mjerna jedinica vrijedi »A tous les temps, à tous les peuples«.

Za pouzdanu reprodukciju mjerne jedinice primjenjuju se danas prirodne pojave koje se mogu u danim uvjetima identično ponoviti. Uredaje kod kojih

\* Adresa autora: Prof. dr Dušan Benčić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, Kačićeva 26

se prirodna pojava koristi u metrološke svrhe nazivamo *prirodnim mjerama* odnosno *pramjerilima*. Upotrebljavaju se za najtočnije reprodukcije jedinice.

Razlika između pramjere i pramjerila je u tome što se u pramjere fizikalna jedinica utjelovljuje i čuva u vrlo složenim okolnostima, a od pramjerila se jedino traži pouzdanost reprodukcije, što je značajna prednost.

Interesantno je, da je za osnovnu jedinicu duljine (već u samom početku zamišljenom u načelu »à tous les temps...«), najprije izrađena pramjera, a nakon toga razrađena pramjerila na bazi interferencije svjetlosti.

#### *Postanak metričkog sustava jedinica*

Ponato je koliko je u Evropi i svijetu u proteklim stoljećima vladalo nejedinstvo mjernih jedinica. Tako npr. M. Brezinščak navodi: »Iz kronika se, na primjer, zna da je Badensko nadvojvodstvo imalo oko 1800. godine, dakle prije 180 godina, 112 različitih »lakata«, 92 površinske mjere, 65 mjera za drvo, 163 mjere za žito, 123 akova i vjedra itd.«.

Zbog toga se rodila želja za prirodnom pramjerom duljine u prvom redu. U početku su postojala tri prijedloga: duljina sekundarnog njihala (Huygens, 1664.), dio duljine ekvatora ili dio duljine nekog meridijana, što se, dakle, uvijek može reproducirati. Konačno je odlučeno, da se za jedinicu duljine novog metričkog sustava odabere 40-milijunti dio zemaljskog meridijana (1790). Mjerenje luka pariškog meridijana između Dunkerquea i Barcelone započeli su Delambre i Méchain, a sedam godina kasnije završili Arago i Biot. U obradi mjernih rezultata sudjelovalo je 26 evropskih znanstvenika u trajanju dvije godine. Posebna komisija u kojoj su bili Francuzi Laplace, Legendre i Méchain, Nizozemac Van Swinden, Švicarac Tralles i Španjolac Ciscar ustanovila je da duljina jedne četvrtine pariškog meridijana iznosi 5 130 740 toise (toise — jedinica duljine u to vrijeme u Francuskoj kojoj je pramjera bila tzv. normalni štap — »Toise de Châtelet«).

Jedinica duljine nazvana je metar (predložio Borda prema grčkoj riječi »metron« = mjera), a utvrđena je sa:

$$\text{metar} = 3 \text{ stope} + 11,269 \text{ pariških linija}$$

Veće i manje jedinice izvodile su se iz tako definiranog metra na decimalnom principu.

U Francuskoj je zakonom od 7. travnja 1795. godine propisan decimalni metrički sustav kojim su utvrđeni i nazivi jedinica tog sustava: metar (za duljinu), ar (za površinu), litar (za volumen) i gram (za masu). Duljinu metra i masu kilograma materijalno je utjelovio Fortin izradivši dvije mjere presjeka  $25 \times 4,05$  mm čiji su krajevi na razmaku 1 metar (tzv. krajnja mjera — »etalons à bouts«). Obje pramjere pohranjene su 22. lipnja 1799. godine u arhivu Francuske Republike. Po tome i naziv »arhivski metar« i »arhivski kilogram«. Arhiviranjem metra i kilograma nije uspjelo što se željelo, da to budu prirodne mjere, budući da bi svako novo mjerenje, uz suvremenije i bolje mjerne metode i uređaje, dalo nove vrijednosti. Time je propala i ideja o univerzalnoj prirodnoj veličini jedinice duljine.

No potreba za evropskom i svjetskom unifikacijom jedinica ostala je i dalje prisutna, a francuski primjer moto za daljnje akcije. Snažan poticaj

svjetskom uvođenju metričkog sustava dali su geodeti na svojoj Međunarodnoj geodetskoj konferenciji održanoj u Berlinu 1867. godine. Ova konferencija sazvana je prvenstveno u vezi ispitivanja sistematskih razlika koje su se pojavile pri tadašnjoj triangulaciji Evrope. Konferencija je preporučila »u interesu znanosti, a geodezije napose« primjenu metričkog sustava jedinica.

U kolovozu 1870. godine francuska vlada saziva međunarodnu konferenciju (prisustvovalo 15 zemalja) na kojoj je osnovana Međunarodna komisija za metar. Na zasjedanju ove komisije 24. rujna 1872. godine uz prisustvo stručnih predstavnika 30 država prihvaćeno je više rezolucija kojima se objašnjava način izrade novih metričkih pramjera i način njihove komparacije s pariškim arhivskim mjerama.

1872. godinu možemo stoga smatrati godinom postanka metričkog sustava jedinica.

## KONVENCIJA O METRU I PRVA DEFINICIJA JEDINICE METAR

Međunarodna komisija za metar nije mogla donositi odluke koje bi obavezivale države, stoga su u Parizu diplomatski predstavnici država potpisali predloženu Konvenciju o metru 20. svibnja 1875. godine, pa je to službeni početak primjene metričkog sustava jedinica u svijetu.

Konvencijom o metru definisane su jedinice duljine metar i jedinica mase kilogram u obliku materijalnih pramjera, a osnovana su međunarodna tijela:

Međunarodni komitet za mjere i utege (Comité International des Poids et Mesures, kratica CIMP) i Međunarodni ured za mjere i utege (Bureau International des Poids et Mesures, kratica BIPM) kao stalni znanstveni zavod s lokacijom u povijesnom dvorcu »Paviljon de Breteuil« u Sèvresu kraj Pariza.

Određeno je, da se svakih 6 godina saziva u Parizu Generalna konferencija za mjere i utege i da ona utvrđuje program rada CIPM i pravce razvoja BIPM. Članstvo država potpisnica osigurava ne samo učestvovanje, pravo glasa na sjednicama Konferencije, već svaka članica postaje suvlasnik uređaja i pramjera u BIPM, uz pravo dobivanja na upotrebu kopija međunarodnih pramjera — nacionalnih etalona uz pravo komparacije.

Međunarodni komitet (CIPM) ima 18 članova eksperata različitih nacionalnosti, a imenuje ih Generalna konferencija. U radu mu pomažu savjetodavni odbori kojih ima sedam, a jedan od njih je i Savjetodavni odbor za definiciju metra (Comité Consultatif pour la Definition du Metre, CCDM, 1952).

Istraživački radovi, eksperimentalne provjere i sama izrada pramjera trajala je 14 godina. Kao što je poznato prametar je konačno izveden iz legure platine (90%), iridija (10%) i s profilom sličnim slovu H.

Generalna konferencija za mjere i utege na svom prvom zajedanju 26. rujna 1889. proglasila je jedan od četrdesetak izvanrednih primjeraka prametra međunarodnim prametrom (obilježen oznakom A6) i jedinicu duljine »metar« definirala:

»Jedinica duljine je metar koji je pri temperaturi 0°C definiran razmakom između dvije srednje crtice na pramjeri metra, pohranjenog u BIPM u

Sèvresu. Pramjera ma točno duljinu 1 m kad je pri normalnom atmosferskom laku poduprta u vodoravnom položaju sa dva valjka promjera najmanje 1 centimetar koji su međusobno udaljeni 571 milimetar.

Jugoslavija posjeduje kopiju prametra br. 30 od 1879. godine i član je Generalne konferencije za mjere i utege.

## PRAMJERILO ZA JEDINICU DULJINE — VALNI METAR

U suvremenom razvoju mjerne tehnike štapni prametar i njegovo prenošenje nije više moglo udovoljiti zahtjevima preciznosti mjerenja duljine. Zbog toga je bio nužan prelaz na primjenu pramjerila za duljinu, a na osnovi već usvojene međunarodne pramjere metra.

A. A. Michelson, jedan od prvih direktora BIPM usporedio je prvi put primjenom svoje poznate interferometrijske metode (kojom je zacrtan put razvoja i današnjih preciznih interferometara primjenjenih za komparacije u laboratorijima — npr. Dopplerov laserski interferometar) duljinu prametra u Sèvresu sa valnom duljinom zračenja monokromatske svjetlosti. Na temelju daljnjih preciznih mjerenja Benoita, Fabrya i Perota utvrđena je duljina crvene kadmijeve linije:

$$\lambda_c = 6438,4696 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

što odgovara

$$\text{metar} = 1553164,13 \lambda_c (\text{Cd})$$

u suhom zraku temperature 15 °C i normalnog atmosferskog pritiska (sadržaj CO<sub>2</sub> u zraku 0,03%).

Tu vrijednost prihvatila je 1927. godine Generalna konferencija za mjere i utege, ali nije mijenjala definiciju metra od 1889. godine, jer se tražio bolji izvor monokromatskog zračenja.

Istaknimo, da je u toku polovine ovog stoljeća došlo do značajnog razvoja interferencijskih metoda i njihove primjene za mjerenja vrhunskih točnosti (danas najtočnije poznate metode mjerenja duljina).

Isto tako sve više se teži za općom unifikacijom jedinica (razvijeni su u međuvremenu različiti sustavi jedinica npr. CGS, MTS itd.). Na devetoj Generalnoj konferenciji 1948. godine Međunarodni savez teorijske i primjenjene fizike predložio je uvođenje praktičnijeg sistema: metar, kilogram, sekunda, kelvin, amper i candela. Međunarodni komitet (CIPM) na svojim sjednicama 1956. i 1958. godine je utvrdio:

da se novi sistem jedinica, zasnovan na šest osnovnih jedinica, nazove Međunarodni sistem jedinica sa skraćenom oznakom SI.

Generalna konferencija za mjere i utege na svom značajnom jedanaestom zasjedanju 14. listopada 1960. godine donosi rezoluciju o ustanovljenju međunarodnog sistema SI i prihvaća novu definiciju metra:

»Metar je duljina jednaka 1650763,73 duljine vala u vakuumu zračenja koje odgovara prijelazu između razina 2 p<sub>10</sub> i 5 d<sub>3</sub> atoma kriptona 86«.

Svakako ova reprodukcija jedinice je složena. Npr. kriptonska izbojna žarulja mora se stalno hladiti tako da se nalazi na temperaturi — 209 °C.

Rezolucijom broj 6 istovremeno Generalna konferencija stavlja izvan snage definiciju metra pomoću štapne pramjere iz 1889. godine. Ova nova definicija jedinice duljine ulazi u zakonodavstva gotovo svih država svijeta (u Jugoslaviji 1961. godine).

Takva definicija metra nazvana je i »valnim metrom«. Valnim metrom dobiveno je pramjerilo duljine kojim se u znanstvenim opremljenim mjernim laboratorijima može mnogo preciznije reproducirati mjerena duljina budući se relativna nesigurnost reprodukcije kreće reda veličine  $\pm 1.10^{-9}$ .

No razvoj mjerne tehnike i mogućnosti reprodukcije jedinica ni tu ne zastaje.

Interferencijska mjerenja omogućila su i točno određivanje brzine širenja svjetlosti, što je u geodeziji izuzetno važno zbog razvoja elektroničkog mjerenja duljine.

## NOVA DEFINICIJA METRA

Petnaesta Generalna konferencija za mjere i utege rezolucijom broj 2 1975. godine preporučuje za brzinu prostiranja svjetlosti u vakuumu:

$$c = 299\,792\,458 (1 \pm 4.10^{-9}) \text{ m/s.}$$

Ideja nove definicije metra proizlazi iz jednadžbe:

$$l = c \cdot t$$

u kojoj je:  $l$  duljina puta

$t$  trajanje prostiranja svjetlosti

$c$  brzina svjetlosti u vakuumu, a koja je preporučena na petnaestoj Generalnoj konferenciji.

Usvoji li se brzina prostiranja svjetlosti kao bespogrešna (per definitionem), to uvrštenjem u jednadžbu uz  $l = 1 \text{ m}$  dobivamo vremenski interval u kojem svjetlost pređe razmak jedan metar u vakuumu:

$$t = \frac{1 \text{ m}}{299\,792\,458 \text{ m/s}} = \frac{\text{s}}{299\,792\,458}$$

slijedi:

$$t = 3,335\,640\,952 \cdot 10^{-9} \text{ s.}$$

Sedamnaesta Generalna konferencija za mjere i utege održana 17. do 21. listopada 1983. godine na temelju prijedloga CIPM donosi Rezoluciju o novoj definiciji metra: Sedamnaesta Generalna konferencija za mjere i utege, ocjenjujući

da sadašnja definicija ne dopušta da se za sve potrebe dovoljno precizno ostvari metar;

da napredak ostvaren ovladavanjem laserima omogućuje dobivanje zračenja koja su ponovljivija i prikladnija za primjenu nego što je zračenje koje odašilje svjetiljka s kriptonom 86;

da je napredak pri mjerenju frekvencija i valnih duljina tih zračenja doveo do skladnih podataka o brzini svjetlosti kojima je točnost u prvom redu ograničena ostvarenjem metra prema sadašnjoj definiciji;

da vrijednosti valnih duljina, određene mjerenjem frekvencije i polazeći od zadane vrijednosti brzine svjetlosti, imaju veću preciznost nego što se može postići usporedbom s valnom duljinom pramjerila na kripton 86;

da je korisno, posebno za astronomiju i geodeziju, da se zadrži nepromijenjenom vrijednost brzine svjetlosti koju je svojom rezolucijom broj 2 preporučila 1975. godine Petnaesta konferencija za mjere i utege;

da su razmotreni različiti oblici nove definicije metra, a svi su doveli do toga da se brzini svjetlosti pridijeli točna vrijednost, jednaka preporučenoj, i da to ne stvara nesigurnost  $\pm 4 \cdot 10^{-9}$  najboljih ostvarenja metra prema sadašnjoj definiciji metra;

da su ti različiti oblici, koji se odnose ili na put što ga svjetlost prijeđe u naznačenom vremenskom intervalu ili na valnu duljinu zračenja mjerene ili naznačene frekvencije, bili predmetom savjetovanja i temeljitih rasprava koje su ih pokazale ekvivalentnima te da je postignuta suglasnost u korist prvog oblika;

da je Savjetodavni odbor za definiciju metra sada u stanju da daje upute za praktično ostvarenje takve definicije, upute koje mogu obuhvatiti uporabu narančastog zračenja kriptona 86 upotrebljavanoga do sada u svojstvu etalona, a koje se u budućnosti mogu dopuniti ili obnoviti;

odlučuje

1. Metar je jednak duljini puta koji svjetlost prijeđe u praznini za vrijeme jednog 299 792 458-og dijela sekunde.

2. Ukida se definicija metra utemeljena na prijelazu između razina  $2 p_{10}$  i  $5 d_5$  atoma kriptona 86 koja je bila na snazi od 1960. godine.

## ZAKLJUČNA RAZMATRANJA RAZVOJA METROLOGIJE NA GEODETSKU STRUKU

Izuzetan razvoj prirodnih i tehničkih znanosti i tehnologije sve više povezuje ove znanosti i daje im interdisciplinarni karakter. To se posebno odnosi na teoriju mjerenja i njenu granu metrologiju.

U našoj zemlji metrologija je u posljednje vrijeme u stalnom razvoju, a sve više dolazi do izražaja uska povezanost mjerne problematike različitih tehničkih područja. Na saveznom nivou osnovan je Savjet u području metrologije SFRJ. U Zagrebu je pred nekoliko godina osnovano Mjeriteljsko društvo Hrvatske. Od 1976. godine na snazi je i Zakon o mjernim jedinicama i mjerilima (sada je u izradi nacrt novog Zakona) koji propisuje obavezne kontrole mjerila i mjernih instrumenata. U tu svrhu Savezni zavod za mjere i drago-

cjene metale ovlašćuje mjerne laboratorije koji zadovoljavaju uslovima za obavljanje pregleda i žigosanja mjerila. Do sada je dobilo ovlaštenja 24 laboratorija u našoj zemlji od kojih i više njih za pregled mjerila duljine i kuta. U popisu nema nijedne geodetske institucije.

Neshvatljivo je, kako je u takvom trendu razvoja metrologije u svijetu i u našoj zemlji, geodetska struka, kojoj su u osnovi mjerenja duljina i kutova, ostala sasvim po strani. U metrološkim institucijama nema geodetskih kadrova — za ispitivanje mjerila i instrumenata u geodeziji nema ekipiranih geodetskih mjernih laboratorija. Izuzev savjetovanja koje je organizirao Institut za geodeziju Građevinskog fakulteta u Beogradu prošle godine, praktički plan-ski i organizacijski nije učinjeno ništa značajnije. Ako i imamo neka istraživanja na tom području ili razvijene poneke uređaje na našim fakultetima to je samo rezultat parcijalnih napora i zalaganja pojedinaca, bez međusobne koordinacije i uz relativno skromne investicije.

Uz današnji razvoj interferometrije ne možemo ni zamisliti suvremeni geodetski laboratorij bez npr. laserskog interferometra sa vrlo širokom mogućnosti primjene, posebno za komparacije, sa točnostima reda veličine  $0,1 \mu\text{m}$ . Kao primjer navodimo klimatizirani laboratorij ETH (Eidgenössische Technische Hochschule) U Zürichu koji na novoj lokaciji ETH na Höggerbergu ima komparator duljine 52 m, kao i 8 m za mjerne letve. Uz primjenu interferometra HP 5526 A komparira se svaka crta podjele nivelmanske letve uz digitalno očitavanje ili registraciju podataka putem pisaača (srednja pogreška  $\pm (0,2 \mu\text{m} + + 0,4 \text{ ppm}^*)$ ). Takvo opremanje skupim uređajima uz automatske registracije podataka nije moguće više sredstvima jedne institucije već zajedničkim interesom i udruživanjem sredstava geodetskih organizacija, Geodetske uprave i odgovarajućih SIZ-ova. Mora nam biti jasno, da suvremeni razvoj geodetskih instrumenata sa mikroprocesima i računalima, s vrlo visokim točnostima, zahtijeva paralelno stalan stručni pregled i kontrolu specijaliziranih stručnjaka s adekvatnim uređajima. U suprotnom slučaju i onako skupne investicije (u devizama) postaju i suviše skupe. Još 1968. godine na IV. Kongresu Saveza geodetskih inženjera i geometara u Sarajevu iznio sam u referatu potrebu osnivanja geodetskih laboratorija u većim centrima. Nadam se, da ćemo se ipak uključiti u svjetski trend razvoja metrologije i da nam valjda i mjerila i instrumente neće baždariti i ispitivati drugi.

## LITERATURA

- [1] M. Brezinščak: »Mjerenje i računanje u tehnici i znanosti«, Tehnička knjiga, Zagreb 1971.
- [2] M. Pavlović: »Međunarodni sistem jedinica u nauci i tehnici«, Beograd 1980.
- [3] \* \* \*: Izvještaji, vijesti i poruke Mjeriteljskog društva Hrvatske (2 i 4). Zagreb, 1983.

## SAŽETAK

Povodom nove definicije metra opisan je razvoj metričkog sistema s posebnim osvrtom na jedinicu duljine metar i definicije ove jedinice.

\* ppm je  $10^{-6}$  duljine