

Sažeti prikaz Međunarodnog sustava jedinica SI

Mjeriteljstvo je znanost o mjerenju koja obuhvaća sva mjerenja koja se provode na poznatoj razini nesigurnosti u svim područjima ljudske djelatnosti

Međunarodni ured za utege i mjere (BIPM) osnovan je 20. svibnja 1875. godine člankom 1. Dogovora o metru i zadužen za osiguranje temelja za jedinstveni suvisli sustav mjerenja za uporabu u cijelome svijetu. Desetični metrički sustav koji potječe iz vremena francuske revolucije temeljio se na metru i kilogramu. U skladu s uvjetima Dogovora iz 1875. godine bile su izrađene nove međunarodne pramjere metra i kilograma koje je 1889. godine službeno prihvatila prva Opća konferencija za utege i mjere (CGPM). Sustav se s vremenom razvijao tako da sada uključuje sedam osnovnih jedinica. Godine 1960. na 11. CGPM-u odlučeno je da se nazove Međunarodnim sustavom jedinica (Système International d'Unités, SI). SI nije statičan, nego se razvija kako bi se uskladio sa stalno rastućim zahtjevima u svijetu za mjerenjem na svim razinama točnosti i u svim područjima znanosti, tehnike i ljudskoga djelovanja. Ovaj je dokument sažetak **SI brošure**, publikacije BIPM-a koja je izraz trenutačnog stanja SI-a.

Sedam **osnovnih jedinica** SI-a navedenih u tablici 1. osiguravaju referenciju koja se upotrebljava za definiranje svih mjernih jedinica Međunarodnog sustava jedinica. S napretkom znanosti i poboljšavanjem mjernih metoda, revidirale su se i njihove definicije. Što je točnije mjerenje veća se pozornost zahtijeva za ostvarenje mjernih jedinica.



Međunarodna pramjera kilograma (K) jedini je preostali artefakt koji se upotrebljava za definiranje neke osnovne jedinice SI-a.

Tablica 1.: Sedam osnovnih jedinica SI-a

Veličina
Jedinica (znak): definicija jedinice
duljina metar (m): Metar je duljina puta koji u vakuumu prijeđe svjetlost u vremenskom odsječku od 1/299 792 458 sekunde. <i>Iz toga slijedi da je brzina svjetlosti u vakuumu (c_0) točno $299\,792\,458\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.</i>
masa kilogram (kg): Kilogram je jedinica mase: ona je jednaka masi međunarodne pramjere kilograma <i>Iz toga slijedi da je masa međunarodne pramjere kilograma ($m(K)$) uvijek jednaka točno 1 kg.</i>
vrijeme sekunda (s): Sekunda je trajanje od 9 192 631 770 perioda zračenja koje odgovara prijelazu između dviju hiperfinskih razina osnovnog stanja cezijeva atoma 133. <i>Iz toga slijedi da je hiperfino cijepanje u osnovnome stanju cezijeva atoma 133, $\nu(\text{hfs Cs})$ jednako točno $9\,192\,631\,770\,\text{Hz}$.</i>
električna struja amper (A): Amper je ona stalna struja koja bi kad bi se održavala u dva ravna usporedna vodiča neizmjerne duljine i zanemariva kružnoga poprečnog presjeka postavljena u vakuumu na međusobnoj udaljenosti od 1 m proizvođila između tih vodiča silu jednaku 2×10^{-7} njutna po metru duljine. <i>Iz toga slijedi da je magnetska stalnica (μ_0) koja se također naziva permeabilnošću praznoga prostora jednaka točno $4\pi \times 10^{-7}\,\text{H/m}$.</i>
termodinamička temperatura kelvin (K): Kelvin (jedinica termodinamičke temperature) dio je 1/273,16 termodinamičke temperature trojne točke vode. <i>Iz toga slijedi da je termodinamička temperatura trojne točke vode (T_{tpw}) jednaka točno 273,16 K.</i>
količina tvari mol (mol): 1. Mol je količina tvari u sustavu koji sadržava onoliko elementarnih jedinki koliko ima atoma u 0,012 kilograma ugljika 12. 2. Kad se upotrebljava mol, moraju se navesti elementarne jedinke, a to mogu biti atomi, molekule, ioni, elektroni, druge čestice ili pojedinačno navedene skupine takvih čestica. <i>Iz toga slijedi da je molekularna masa ugljika 12 ($M(^{12}\text{C})$) jednaka točno 12 g/mol.</i>
svjetlosna jakost kandela (cd): Kandela je svjetlosna jakost izvora koji u danome smjeru zrači jednobožno zračenje frekvencije 540×10^{12} herca i koji ima jakost zračenja u tome smjeru od 1/683 vata po steradijanu. <i>Iz toga slijedi da je djelotvornost spektralne svjetline (K) za jednobožno zračenje frekvencije od $540 \times 10^{12}\,\text{Hz}$ jednaka točno 683 lm/W.</i>

Sedam **osnovnih veličina** kojima odgovara sedam **osnovnih jedinica** jesu: duljina, masa, vrijeme, električna struja, termodinamička temperatura, količina tvari i svjetlosna jakost. **Osnovne veličine** i **osnovne jedinice** daju se u tablici 2. zajedno s njihovim znakovima

Tablica 2.: Osnovne veličine i jedinice koje se upotrebljavaju u SI-u

Osnovna veličina	Znak	Osnovna jedinica	Znak
duljina	l, h, x, r itd.	metar	m
masa	m	kilogram	kg
vrijeme	t	sekunda	s
električna struja	I, i	amper	A
termodinamička temperatura	T	kelvin	K
količina tvari	n	mol	mol
svjetlosna jakost	I_v	kandela	cd

Sve se druge veličine opisuju kao **izvedene veličine** i mjere se uporabom **izvedenih jedinica** koje se definiraju kao umnošci potencija **osnovnih jedinica**. Primjeri **izvedenih veličina** i **jedinica** dani su u tablici 3.

Tablica 3.: Primjeri izvedenih veličina i jedinica

Izvedena veličina	Znak	Izvedena SI jedinica	Znak
ploština	A	čtvorni metar	m^2
obujam	V	kubični metar	m^3
brzina	v	metar u sekundi	m/s
ubrzanje	a	metar u sekundi na kvadrat	m/s^2
valni broj	σ, ν	recipročni metar	m^{-1}
gustoća mase	ρ	kilogram po kubičnome metru	kg/m^3
plošna gustoća	ρ_A	kilogram po četvornome metru	kg/m^3
specifični obujam	ν	kubični metar po kilogramu	m^3/kg
gustoća struje	j	amper po četvornome metru	A/m^2
jakost magnetskoga polja	H	amper po metru	A/m
koncentracija	c	mol po kubičnome metru	mol/m^3
masena koncentracija	ρ, γ	kilogram po kubičnome metru	kg/m^3
osvjetljenje	L_v	kandela po četvornome metru	cd/m^2
indeks loma	n	(broj) jedan	1
relativna permitivnost	μ_r	(broj) jedan	1

Napominjemo da su indeks loma i relativna permeabilnost primjeri nedimenzijskih veličina za koje je SI jedinica jednaka broju jedan (1) premda se ta jedinica ne piše.

Određenim **izvedenim jedinicama** dani su **posebni nazivi** koji omogućuju da se u sažetu obliku izraze kombinacije os-

novnih jedinica koje se često upotrebljavaju. Tako je naprimjer džul (znak J) po definiciji jednak $m^2 kg s^{-2}$. Trenutačno postoje 22 posebna naziva za jedinice odobrene za uporabu u SI-u, a one se daju u tablici 4.

Tablica 4.: Izvedene jedinice s posebnim nazivima u SI-u

Izvedena veličina	Naziv izvedene jedinice	Znak jedinice	Izražena s pomoću drugih jedinica
ravninski kut	radijan	rad	$m/m = 1$
prostorni kut	steradian	sr	$m^2/m^2 = 1$
frekvencija	herc	Hz	s^{-1}
sila	njutn	N	$m kg s^{-2}$
tlak, naprezanje	paskal	Pa	$N/m^2 = m^{-1} kg s^{-2}$
energija, rad, količina topline	džul	J	$N m = m^2 kg s^{-2}$
snaga, izračeni tijek	vat	W	$J/s = m^2 kg s^{-3}$
električni naboj, količina elektriciteta	kulon	C	$s A$
razlika električnih potencijala	volt	V	$W/A = m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
kapacitet	farad	F	$C/V = m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
električni otpor	om	Ω	$V/A = m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
električna vodljivost	simens	S	$A/V = m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
magnetski tijek	veber	Wb	$V s = m^2 kg s^{-2} A^{-1}$
gustoća magnetskog tijeka	tesla	T	$Wb/m^2 = kg s^{-2} A^{-1}$
indukcija	henri	H	$Wb/A = m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
Celzijeva temperatura	Celzijev stupanj	$^{\circ}C$	K
svjetlosni tijek	lumen	lm	$cd sr = cd$
osvjetljenje	luks	lx	$lm/m^2 = m^{-2} cd$
aktivnost radionuklida	bekerel	Bq	s^{-1}
apsorbirana doza, specifična (predana) energija, kerma	grej	Gy	$J/kg = m^2 s^{-2}$
dozni ekvivalent, okolišni dozni ekvivalent	sivert	Sv	$J/kg = m^2 s^{-2}$
katalitička aktivnost	katal	kat	$s^{-1} mol$

Premda su herc i bekerel jednaki recipročnoj sekundi, herc se upotrebljava samo za periodične pojave, a bekerel samo za stohastičke procese pri radioaktivnom raspadu.

Jedinica je Celzijeva temperature Celzijev stupanj ($^{\circ}C$) koji je po veličini jednak kelvinu (K), jedinici termodinamičke temperature. Veličina Celzijeva temperatura t povezana je s termodinamičkom temperaturom T jednadžbom $t/^{\circ}C = T/K - 273,15$.

Sivert se također upotrebljava za veličine usmjerenoga doznog ekvivalenta i osobnoga doznog ekvivalenta.

Posljednja četiri posebna naziva jedinica iz tablice 4. prihvaćena su posebno za mjerenja koja se odnose na zaštitu ljudskog zdravlja.

Za svaku veličinu postoji samo jedna SI jedinica (premda se ona često može izražavati na različite načine uporabom posebnih naziva). Međutim ista se SI jedinica može upotrebljavati za izražavanje vrijednosti nekoliko različitih veličina (npr. SI jedinica J/K može se upotrebljavati i za izražavanje toplinskoga kapaciteta i entropije). Važno je prema tomu da se za određivanje veličine ne upotrebljava samo jedinica. To se pravilo primjenjuje ne samo na znanstvene tekstove nego također i na mjerila (tj. mjerila trebaju pokazivati ne samo jedinicu nego također i odgovarajuću mjernu veličinu).

Nedimenzijske veličine koje se također nazivlju veličinama dimenzije jedan obično se definiraju kao omjeri dviju veličina iste vrste (npr. indeks loma omjer je dviju brzina, a relativna permitivnost omjer je permitivnosti dielektričnog medija i permitivnosti praznoga prostora). Prema tomu jedinica nedimenzijske veličine omjer je dviju istovjetnih SI jedinica, te je prema tomu uvijek jednaka jedan. Međutim pri izražavanju vrijednosti nedimenzijskih veličina jedinica *jedan* (1) se ne piše.

Desetični višekratnici i nišekratnici jedinica

Za uporabu sa SI jedinicama prihvaćen je skup predmetaka za izražavanje vrijednosti veličina koje su mnogo manje ili mnogo veće od SI jedinice koja se upotrebljavaju bez predmetaka. SI predmetci dani su u tablici 5. Oni se mogu upotrebljavati sa svim **osnovnim jedinicama** i sa svim **izvedenim jedinicama** koje imaju posebne nazive.

Tablica 5.: SI predmetci

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

Kad se upotrebljavaju predmetci, naziv predmetka i naziv jedinice sastavljaju se kako bi činili jednu riječ te se slično znak predmetka i znak jedinice pišu bez razmaka kako bi činili jedan znak koji se može potencirati. Naprimjer, možemo pisati: kilometar (km); mikrovolt (μV); femtosekunda (fs); 50 V/cm = 50 V (10⁻² m)⁻¹ = 5000 V/m.

Kad se **osnovne** i **izvedene jedinice** upotrebljavaju bez ikakva predmetka, dobiveni se skup jedinica opisuje kao **suvisao**. Upo-

raba suvisla skupa jedinica ima tehničke prednosti (vidi **SI brošuru**). Ipak je uporaba predmetaka prikladna jer se njome izbjegava potreba uporabe faktora 10ⁿ za izražavanje vrijednosti veoma velikih ili veoma malih veličina. Naprimjer, duljinu kemijske veze prikladnije je dati u nanometrima (nm) nego u metrima (m), a udaljenost između Londona i Pariza prikladnije je dati u kilometrima (km) nego u metrima.

Kilogram (kg) iznimka je jer premda je on **osnovna jedinica**, njegov naziv iz povijesnih razloga sadrži predmetak. Višekratnici i nišekratnici kilograma tvore se dodavanjem naziva predmetka nazivu *gram*: tako pišemo miligram (mg), *ali ne* mikrokilogram (μkg).

Jedinice izvan SI-a

SI je jedini sustav jedinica koji je univerzalno prihvaćen, tako da on ima izrazitu prednost u uspostavljanju međunarodnog dijaloga. Druge jedinice, tj. jedinice izvan SI-a općenito se definiraju s pomoću SI-a jedinica. Uporaba SI također pojednostavljuje znanstveno školovanje. Iz svih tih razloga u svim područjima znanosti i tehnike preporučuje se uporaba SI jedinica.

Ipak se još široko upotrebljavaju neke jedinice izvan SI-a. Nekoliko takvih jedinica, kao što su jedinice vremena minuta, sat i dan, uvijek će se upotrebljavati jer su duboko ukorijenjene u našu kulturu. Druge se upotrebljavaju iz povijesnih razloga kako bi se zadovoljili interesi posebnih skupina ili jer ne postoji prikladna SI zamjena. Znanstvenicima treba uvijek ostaviti pravo da upotrebljavaju jedinice koje su najprikladnije svrsi. Međutim kad se upotrebljavaju jedinice izvan SI-a treba uvijek navesti njihove faktore pretvorbe prema SI jedinicama. U tablici 6. u nastavku navodi se nekoliko jedinica izvan SI-a zajedno

Tablica 6.: Nekoliko jedinica izvan SI-a

Veličina	Jedinica	Znak	Vrijednost u SI jedinicama
vrijeme	minuta	min	1 min = 60 s
	sat	h	1 h = 60 min = 3 600 s
	dan	d	1 d = 24 h = 86 400 s
obujam	litra	L ili l	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
masa	tona	t	1 t = 10 ³ kg
energija	elektronvolt	eV	1 eV ≈ 1,602 × 10 ⁻¹⁹ J
tlak	bar	bar	1 bar = 100 kPa
	milimetar živina stupca	mmHg	1 mmHg ≈ 133,3 Pa
duljina	angstrem	Å	1 Å = 10 ⁻¹⁰ m
	morska milja	M	1 M = 1852 m
sila	din	din	1 din = 10 ⁻⁵ N
energija	erg	erg	1 erg = 10 ⁻⁷ J

s njihovim faktorima pretvorbe u SI-u. Za detaljniji popis vidi **SI brošuru** ili mrežnu stranicu BIPM-a.

Znakovi jedinica pišu se velikim početnim slovom kad su nazvani prema imenima osoba (primjer, amper (A); kelvin (K); herc (Hz); kulon (C)). Inače se uvijek pišu malim početnim

slovom (npr. metar (m); sekunda (s); mol (mol)). Iznimka je znak za litru: može se upotrebljavati malo slovo l ili veliko slovo L; veliko je slovo dopušteno kako bi se izbjeglo brkanje malog slova l i broje jedan (1).

Znak za morsku milju dan je ovdje kao M; ne postoji međutim opći sporazum o nekome znaku za morsku milju.

Jezik znanosti: uporaba SI-a za iskazivanje vrijednosti veličina

Vrijednost veličine piše se kao umnožak broja i jedinice, a broj kojim se množi jedinica brojčana je vrijednost veličine izražene tom jedinicom. Između broja i jedinice uvijek se ostavlja jedan prostorni razmak. Za nedimenzijske veličine za koje je jedinica broj jedan jedinica se izostavlja. Brojčana vrijednost ovisi o odabiru jedinice tako da ista vrijednost veličine može imati različite brojčane vrijednosti kad se iskazuje u različitim jedinicama kao u primjerima u nastavku.

Brzina bicikla približno je jednaka:

$$v = 5,0 \text{ m/s} = 18 \text{ km/h.}$$

Valna duljina jedne žute natrijeve linije jednaka je:

$$\lambda = 5,896 \times 10^{-7} \text{ m} = 589,6 \text{ nm.}$$

Znakovi veličina tiskaju se kurzivom, a to su općenito pojedinačna slova latinice ili grčkoga alfabeta. Mogu se upotrebljavati velika ili mala slova, a dopunski se podatci o veličini mogu doдати kao indeksi ili kao podatci u zagradama.

Za mnoge veličine postoje preporučeni znakovi koje su dali mjerodavni autoriteti kao što su ISO (Međunarodna organizacija za normizaciju) i različite međunarodne znanstvene udruge kao što su IUPAP i IUPAC. Primjeri su:

T	za temperaturu
C_p	za toplinski kapacitet pri stalnome tlaku
x_i	za molni udio (udio količine tvari) vrsta i
μ_r	za relativnu permeabilnost
$m(\mathcal{K})$	za masu međunarodne pramjere kilograma $\mathcal{K}$

Znakovi jedinica tiskaju se uspravnim slovima bez obzira na vrstu slova koja se upotrebljava u okolnom tekstu. To su matematički entiteti, a ne kratice; iza njih se nikad ne stavlja točka (osim na kraju rečenice) niti se sklanjaju (kao kratice). Uporaba je ispravnog oblika za znakove jedinica obvezatna i prikazuje se primjerima u **SI brošuri**. Znakovi jedinica mogu se katkad sastojati od više slova. Oni se pišu malim slovima osim što se pišu velikim početnim slovom kad je jedinica nazvana po osobi. Međutim kad se piše naziv jedinice, on se mora pisati malim slovom (osim na početku rečenice) kako bi se jedinica razlikovala od samog čovjeka.

Pri pisanju vrijednosti veličine kao umnoška brojčane vrijednosti i jedinice s brojem i jedinicom može se postupati prema uobičajenim algebarskim pravilima. Naprimjer, jednadžba $T = 293 \text{ K}$ može se jednako napisati kao $T/K = 293$. Taj se postupak opisuje kao uporaba računa s veličinama ili kao algebra veličina. Za uporabu često je koristan omjer veličine s njezinom jedinicom u naslovima stupaca u tablicama ili pri označivanju osi na grafikonima, tako da su upisane vrijednosti u tablicama ili oznake na osima jednostavno brojevi. Primjer u nastavku poka-

zuje tablicu tlaka pare kao funkciju temperature, a logaritam tlaka pare kao funkciju recipročne temperature s tako označenim stupcem.

T/K	$10^3 T/\text{K}$	p/MPa	$\ln(p/\text{MPa})$
216,55	4,6179	0,5180	-0,6578
273,15	3,6610	3,4853	1,2486
304,19	3,2874	7,3815	1,9990

Umjesto izraza 10^3 K/T mogu se upotrebljavati istovrijedni algebarski oblici kao što su kK/T ili $10^3 (T/\text{K})^{-1}$.

Pri tvorbi umnožaka ili količnika jedinica primjenjuju se uobičajena algebarska pravila. Pri tvorbi umnožaka jedinica između jedinica treba ostaviti prazan prostor (ili alternativno kao množidbeni znak upotrijebiti točku na polovici visine stupca). Treba dobro zapamtiti važnost razmaka, naprimjer m s označuje umnožak metra i sekunde, ali ms označuje milisekundu. Kako bi se izbjegle nejasnoće pri tvorbi složenih umnožaka jedinica, također se upotrebljavaju zagrade ili negativni eksponenti. Naprimjer, molarna plinska stalnica može se dati izrazom:

$$pV_m/T = R = 8,314 \text{ Pa m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \\ = 8,314 \text{ Pa m}^3/(\text{mol K}).$$

Pri pisanju brojeva desetični znak može biti točka ili zarez, kako je prikladno za dane okolnosti. U dokumentima na engleskome jeziku uobičajena je točka, ali je za mnoge kontinentalne europske jezike u nekim drugim zemljama uobičajen zarez.

Kad broj ima više znamenaka, obično se radi lakšeg čitanja znamenke razvrstavaju oko desetičnog zareza u skupine po tri. To nije bitno, ali se često radi i općenito je korisno. Kad se to radi skupine od tri znamenke treba odvojiti samo (malim) razmakom, ne trebaju se upotrebljavati ni točka ni zarez. Nesigurnost brojčanih vrijednosti veličine može se često prikladno prikazati navođenjem nesigurnosti u tri najmanje važne znamenke u zagradama nakon broja.

Primjer: Vrijednost elementarnog naboja dana je u 2002 u CODATA popisu temeljnih stalnica kao:

$$e = 1,602\,176\,53\,(14) \times 10^{-19} \text{ C.}$$

gdje je 14 standardna nesigurnost u posljednjim znamenkama navedene brojčane vrijednosti.

Za dodatne informacije
vidi mrežnu stranicu BIPM-a
ili 8. izdanje **SI brošure**,
koji su dostupni na



<http://www.bipm.org>

Ovaj je sažetak priredio Savjetodavni odbor za jedinice (CCU) Međunarodnog odbora za utege i mjere, a objavio ga je BIPM.

Ožujak 2006

Ernst Gobel, predsjednik CIPM-a
Ian Mills, predsjednik CCU
Andrew Wallard, direktor BIPM-a