

## I peatükk. SISSEJUHATUS

### 1. MÕOTMINE

**1.1. Füüsikaliste suuruste võrdlemine.** Füüsikalisi suurusi mõõdetakse füüsikaliste objektide võrdlemise teel. Objektideks võivad olla füüsikalised kehad, protsessid või muu. Näiteks massi mõõtmise korral võrreldakse kehasid, kiiruse mõõtmise korral aga protsesse.

Kui eksisteeriks vaid üks objekt, poleks võrdlemine ega mõõtmine võimalik.

Korraga saab võrrelda ainult kaht objekti omavahel. Kui objekte on rohkem, võrreldakse neid paarikaupa.

Objekte saab võrrelda mitmeti. Näiteks kahe varda korral võib uurida, kumb neist on pikem, kumb raskem, kummal on suurem elektriline takistus jne. Põhimõtteliselt erinevad võrdlusviisid tähendavad erinevate füüsikaliste suuruste võrdlemist. Võrdlemise eesmärk on samaväärne füüsikalise suuruse defineerimisega.

Võrdlemine võib piirduda võimaliku ekvivalentsuse või mitteekvivalentsuse selgitamisega. Võrdluse tulemuseks võib olla näiteks konstaleering, et kaks uuritavat keha on elektriliselt ühenimeliselt laetud.

Täiuslikuma võrdlemise korral määratakse objektide järjestus võrreldava suuruse järgi. Näiteks ühe mineraaliga teist kriipides otsustatakse, kumb kahest mineraalst on kõvem.

Veel täiuslikuma võrdlemise korral tehakse kindlaks füüsikaliste suuruste arvuline suhe. Suurusi, mille korral see on võimalik, nimetatakse *divitiivseteks*<sup>1</sup> Tähtsamad füüsikalised suurused, nagu pikkus, mass, ajavahemik, on divitiivsed.

<sup>1</sup> *Divisio* (lad.) — jagamine.

Kahe objekti  $A$  ja  $B$  kindla reegli kohasel ühendamisel saadud liitobjekti  $C$  iseloomustab suurus  $f_C$ , mis sõltub ühendatavate objektide iseloomustavatest suurustest  $f_A$  ning  $f_B$ . Kui sõltuvuse algebralised omadused langevad kokku arvude liitmise tehte algebraliste omadustega, siis nimetatakse füüsikalist suurust  $f$  *aditiivseks*. Aditiivsusest järeldub alati divitiivsus: suhte määramiseks võib kasutada tavalist liitmisel-lahutamisel põhinevat jagamisalgoritmi. On aga olemas füüsikalisi suurusi, näiteks absoluutne temperatuur, mis pole aditiivsed, kuid on siiski divitiivsed. Selleks et kahele objektile  $A$  ja  $B$  vastavusse seatud arvu  $s_{AB}$  võiks nimetada füüsikaliste suuruste suhteks, on tarvis, et kõigi objektide korral  $s_{AA}=1$  ja  $s_{AB} s_{BC}=s_{AC}$ .

**1.2. Divitiivse suuruse mõõtmine.** Kaht objekti  $A$  ja  $B$  võrreldes võib saada näiteks tulemuse: objekti  $A$  mass on 2,5 korda suurem kui objekti  $B$  mass. Arv 2,5 on masside suhe. Objektide mass pole võimalik ainult arvude abil väljendada. Vaadeldud näite korral on massi mõõtmise tulemus järgmine: objekti  $A$  massi väärtus  $m_A$  on 2,5  $m_B$ , objekti  $B$  massi väärtus  $m_B$  on 0,4  $m_A$ . See näib olevat tautoloogia, kuid põhimõtteliselt pole enam võimalik teada saada.

Kui võrdlemisele kuuluvaid objekte on palju, valitakse nende hulgas üks eriline objekt  $E$  ning kõiki teisi objekte võrreldakse ainult objektiga  $E$ . Kui objekti  $A$  mass osutub objekti  $E$  massist  $m_E$  viis korda suuremaks ja objekti  $B$  mass objekti  $E$  massist kaks korda suuremaks, siis kirjutatakse  $m_A=5 m_E$  ning  $m_B=2 m_E$ . Avaldanud kõik massid massi  $m_E$  kaudu, saab nende omavahelisi suhteid leida arvutamise teel. Näiteks objektide  $A$  ja  $B$  masside suhe arvutatakse nii:  $m_A/m_B=5 m_E/2 m_E=2,5$ .

Ülaltoodud arutlustes võib sõna «mass» asendada ükskõik mille divitiivse füüsikalise suuruse nimetusega.

Erilist objekti, millega kõiki teisi objekte võrreldakse, nimetatakse võrdlemisele kuuluva füüsikalise suuruse *etaloniks*.

Massi etaloniks on valitud spetsiaalselt sel eesmärgil valmistatud, Pariisis säilitatav viht. Sama vihti võiks kasutada ka pikkuse etalonina, mida aga ei tehta. Täpsuse huvides on pikkuse etaloniks valitud teine objekt.

Füüsikalise suuruse etaloni abil fikseeritud väärtust nimetatakse selle füüsikalise suuruse *mõõtühikuks*.

Igale konkreetsele mõõtühikule antakse konkreetne nimi. Pariisis säilitatava vihi massi väärtust nimetatakse kilogrammiks.

Füüsikalise suuruse väärtus väljendatakse mõõtühiku kaudu. Mingi objekti massi väärtust võib väljendada näiteks avaldisega 5 kg.

Arvu, mis näitab füüsikalise suuruse suhet mõõtühikusse, nimetatakse füüsikalise suuruse *mõõtaruks* ehk *arvväärtuseks kasutatud mõõtühiku järgi*.

Eelnimetatud objekti massi mõõtaru kilogrammi järgi on 5, grammi järgi aga 5000. Et mõõtaru oleb mõõtühikust, ei tohi mõõtaru esitades unustada nimetamast mõõtühikut.

Mõõtaru ehk arväärtuse tähisena võib kasutada vastava füüsikalise suuruse tähist, lisades sellele kooloniga või kaldsulgudega eraldatult mõõtühiku tähise. Kui  $m=5$  kg, siis võib kirjutada kas  $m : \text{kg}=5$  või  $m/\text{kg}=5$ .

**1.3. Kuidas kaalutakse heeringat.** Praktilised järeldused eelnevalt näivad paradoksaalsetena: kui müüja soovib teada müüdava heeringa massi, peab ta heeringat võrdlema Pariisis asuva etaloniga. Etalone hoitakse tugevamate lukkude taga kui kulda, ja võib arvata, et müüja ei näe kilogrammi etaloni mitte kunagi. Ometi heeringas kaalutakse ära.

Kilogrammi etaloniga võrreldakse vahetult erilisi, etaloni tunnistajateks nimetatavaid vihte. Etaloni tunnistajatega võrreldakse NSVL algetaloniks nimetatavat vihti. Seni on seda tehtud vaid kaks korda: 1889. a. ja 1950. a. NSVL algetaloniga võrreldakse etaloni koopiaid, nendega omakorda tööetalone. Mõõtmisahela järgmisteks lülideks on järjekorras esimest, teist, kolmandat ja neljandat järku taatelvihid. Neljandat järku taatelvihtidega võrreldakse kaupluses kasutatavat osutikaalu ja vihte. Heeringas on pika mõõtmisahela viimane, üheteistkümnes lüli.

Niiviisi tehaksegi kindlaks heeringa massi ja kilogrammi etaloni massi suhe.

**1.4. Otsene ja kaudne mõõtmine.** Otsese mõõtmise korral määratakse mõõtmisele kuuluva suuruse väärtus muid füüsikalisi suurusi mõõtmata. Kaudse mõõtmise korral mõõdetakse otseselt teisi, mõõtmisele kuuluva suurusega tuntud viisil seotud füüsikalisi suurusi. Lõpptulemuseni jõutakse arvutamise teel.

Näited. Ringi pindala määramiseks mõõdetakse mõõtjoonlaua abil otseselt ringi läbimõõt  $d$  ja siis arvutatakse valemi  $S = \pi d^2/4$  abil pindala. Risttahuka tiheduse määramiseks mõõdetakse kaalu abil otseselt risttahuka mass  $m$  ja nihiku abil külgede pikkused  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Tiheduse kaudse mõõtmise tulemus leitakse valemi  $\rho = m/(abc)$  abil.

Üht ja sama füüsikalist suurust on sageli võimalik mõõta mitmel viisil. Näiteks juhtme takistust võib mõõta otseselt oommeetri abil, kaudselt voltmeetri ja ampermeetri abil ( $R = U/I$ ), kaudselt kalorimeetri, ampermeetri ja kella abil ( $R = Q/(It)$ ) jne.

**1.5. Mõõtmise üldine käsitlus.** Kirjeldatud moodused võimaldavad mõõta ainult divitiivseid suurusi. Üldjuhul nimetatakse mõõtmiseks iga katset, mis seab füüsikalise suuruse reaalse objektiga esitatud väärtusele vastavusse konkreetse mõõtarvu.

Füüsikalise suuruse ühele väärtusele on võimalik omistada erinevaid mõõtarve. Ühese mõõtmistulemuse saamiseks on tarvis, et iga väärtuse jaoks oleks kokku lepitud kindel mõõtarv. Füüsikalise suuruse väärtusele mõõtarvu omistamisel moodustub paar, mille esimeseks komponendiks on füüsikalise suuruse väärtus ja teiseks komponendiks mõõtarv. Kõigi niisuguste paaride hulka nimetatakse *füüsikalise suuruse skaalaks*. Mõõtmist võib nüüd tõlgendada skaalaelemendi teise komponendi määramisena esimest komponenti esitava füüsikalise objekti järgi.

Mõõtarv üksi ei fikseeri füüsikalise suuruse väärtust. Füüsikalise suuruse väärtuse näitamiseks on tarvis esitada mõõtarv ja näidata skaala, mille järgi mõõtarv on määratud.

Mineraloogias kasutatavat Mohsi kõvaduse skaalat säilitatakse kümnest mineraalitükist koosneva komplekti abil. Skaala koosneb kümnest elemendist. Iga elemendi esimeseks komponendiks on ühe komplekti kuuluva mineraali kõvadus, teiseks komponendiks on mineraalitükile märgitud arv. Kui arvud mineraalitükkidel ära

segada, saame uue skaala, mis on moodustatud kõvaduse endistest väärtustest ja endistest arvudest, kuid koosneb uutest paaridest. Skaala muutmisel ei muutu ühegi mineraali kõvadus, muutuvad vaid kõvaduse näitarvud.

Füüsikalise suuruse mõõtmisel on tarvis tunda kasutatava skaala matemaatilist struktuuri. Skaalade struktuure käsitletakse järgnevatel punktides.

**1.6. Suhteskaala ja vaheskaala.** Punktis 1.2 kirjeldatud mõõtmiseeskirja kohaselt divitiivse füüsikalise suuruse jaoks moodustatud skaalat nimetatakse *suhteskaalaks*. Suhteskaala kahe elemendi mõõtarvude suhe võrdub füüsikalise suuruse väärtuste katse teel määratava suhtega. Suhteskaala fikseerimiseks piisab, kui fikseeritakse etaloni abil üksainus skaalaelement.

Füüsikas on kõige olulisemaks skaalatüübiks suhteskaala.

*Vaheskaalaks* ehk intervallskaalaks nimetatakse niisugust skaalat, mis ise ei ole suhteskaala, kuid mille elementide vahed moodustavad suhteskaala.

Vaheskaala näiteks sobib tavaline ajahetke skaala. Kahest ajahetkest, olgu need kell 11.53 20. sept. 1970 ja kell 12.11 20. sept. 1970, ei saa moodustada suhet, saab aga moodustada vahe, mille väärtus on parajasti 18 minutit. Erinevalt ajahetkest on ajavahe-  
mik divitiivne: võib öelda, et ajavahe-  
mik 36 minutit on kaks korda suurem, kui ajavahe-  
mik 18 minutit. Tavaline ajavahe-  
mike skaala on koostatud divitiivsuse omaduse abil ja kuulub suhteskaalade hulka. Ajahetke skaala koostamiseks valitakse kokkuleppeline nullpunkt ning mõõdetakse ajahetke ajavahe-  
mikuga selle hetke ja kokkuleppelise nullhetke vahel. Niiviisi saadaksegi ajahetke mõõtmiseks vaheskaala.

Suhteskaalal on loomulik ehk absoluutne nullpunkt, vaheskaala nullpunkt on aga tinglik. Nullpunkti nihutades saab igast suhteskaalast moodustada vaheskaala, vastupidine toiming aga ei pruugi õnnestuda.

Füüsikas on peale ajaskaalade tuntud vaheskaalad näiteks koordinaatide ja potentsiaalide jaoks. Temperatuuri mõõtmisel kasutatakse paralleelselt suhteskaalat (Kelvini skaala) ja vaheskaalat (Celsiuse skaala)

Vaheskaala fikseerimiseks on tarvis fikseerida kaks skaalaelementi. Näiteks Celsiuse skaala korral fikseeritakse jää sulamis-temperatuur ja vee keemistemperatuur. Kelvini skaala fikseeritakse aga ainult ühe elemendi abil, selleks on vee kolmikpunkti temperatuur.

**1.7. Järjeskaala ja nimeskaala.** Neid skaalatüüpe kasutatakse siis, kui mõõdetav suurus pole divitiivne ega võimalda moodustada divitiivseid vahesid, või kui divitiivsuse omadust pole mingil põhjusel võimalik kasutada.

*Järjeskaala* ehk ordinaalskaala moodustamiseks on tarvis, et

mõõdetava suuruse kõik väärtused oleksid füüsikaliselt järjestatavad. Järjeskaala mõõtarvudeks võetakse enamasti naturaalarvud füüsikalise suuruse väärtuste loomulikus järjekorras. Füüsikalise suuruse väärtuse näitamisel järjeskaala abil lisatakse mõõtarvule tavaliselt sõna «palli».

Järjeskaalade hulka kuuluvad näiteks Mohsi kõvaduse skaala ja Beauforti tuule tugevuse skaala. Beauforti skaala ei kasuta tuule kiiruse divitiivsust ega võimalda öelda, mitu korda on näiteks 8-palline tuul tugevam kui 4-palline tuul.

Järjeskaalade hulka kuulub ka üliõpilaste teadmiste mõõtmisel kasutatav skaala.

*Nimeskaala* ehk nominaalskaala korral puudub alus mõõdetava suuruse väärtuste järjestamiseks. Väärtuste kunstlikust järjestamisest hoidumiseks tavatsetakse nimeskaalas mõõtarvude asemel kasutada loomuliku järjestusega sümboloid. Nimeskaalade hulka kuulub näiteks kahest elemendist koosnev elektri-laengu polaarsuse skaala, kus mõõtarve asendavad märgid + ja –

Nimeskaala kasutamise korral nimetatakse mõõtmist tavaliselt klassifitseerimiseks.

Järjeskaala või nimeskaala fikseerimiseks on tarvis fikseerida üksikvaal kõik skaalaelemendid.

**1.8. Funktsionaalskaalad.** Olgu  $x$  füüsikalise suuruse mõõtarv suhteskaalas ja  $y=f(x)$  tuntud üks-ühene funktsioon. Et arvu  $y$  järgi saab alati määrata arvu  $x$ , siis võib füüsikalise suuruse väärtuse esitamisel kasutada arvu  $x$  asemel arvu  $y$ . Seades füüsikalise suuruse iga väärtusega paari vastava arvu  $y$ , saame füüsikalise suuruse jaoks suhteskaalal baseeruva *funktsionaalskaala*.

Kui funktsioon  $f(x)$  on võrdelisusfunktsioon  $y=ax$ , siis võrdub arvude  $y$  suhe samuti kui arvude  $x$  suhe füüsikalise suuruse väärtuste suhtega ja tuletatav funktsionaalskaala osutub samuti suhteskaalaks. Kui funktsioon  $f(x)$  on lineaarfunktsioon  $y=ax+b$ , siis osutub funktsionaalskaala vaheskaalaks. Kui aga  $f(x)$  on ebalineaarne, siis ei sarnane funktsionaalskaala omadused eespool vaadeldud skaalade omadustega.

Funktsionaalskaalad moodustatakse ka nimeta arvude jaoks. Niisuguse skaala näiteks on punktis 8.5 lähemalt vaadeldav logaritmiline Belli skaala.

Paljud füüsikalised suurused pole üldse otseselt mõõdetavad ja nende väärtusi määratakse arvutamise teel teiste füüsikaliste suuruste väärtuste järgi. Arvutatud mõõtarv on teiste mõõtarvude funktsioon ja kaudselt mõõdetava suuruse skaala on funktsionaalskaala. Enamasti on funktsiooni väärtus võrdeline ühe suhteskaalas avaldatud argumendi väärtusega. Näiteks tiheduse  $\rho=m/V$  mõõtarv on võrdeline massi mõõtarvuga. Kui tiheduste suhe lugeda võrdseks samas ruumalal sisalduvate masside suhtega, siis osutub tiheduse skaala matemaatilise struktuuri poolest suhteskaalaks.

Niiviisi võib enamiku kaudselt mõõdetavate suuruste skaaladest arvata suhteskaalade hulka.

**1.9. Metroloogiline seadusandlus.** Vanasti, kui mõõtühikud ei olnud veel seadusandluse objektiks, kasutati igas linnas oma mõõtühikuid. Niisugune mõõtühikute segadus mõjuku kaasaegsele kaubandusele, tööstusele ja teadusele samuti kui kuulus keelte-segadus Paabeli torni ehitamisele.

Nõukogude Liidus on mõõtmisvahenditele esitatavad nõuded ja mõõtühikud ühtlustatud seaduse jõudu omavate *riiklike standarditega*. NSVL riikliku standardi tähis koosneb lühendist «GOST» ja kahest sidekriipsuga ühendatud numbrist: esimene neist on järjekorranumber, teine näitab standardi väljaandmise aastat. Näiteks elektrimõõteriistadele esitatavaid nõudeid sisaldav standard GOST 1845-52 on tähise järgi otsustades välja antud 1952. aastal. Standardi muutmisel tavaliselt järjekorranumbrit ei muudeta. Kui 1959. a. GOST 1845-52 asendati uuega, siis sai see tähiseks GOST 1845-59.

## 2. MÕÖTÜHIKUD

**2.1. Mõõtühikute ajaloost.** Ühtsed riiklikud mõõtühikud olid kasutusel juba vanas Egiptuses ja Babüloonias. Egiptlased oskasid mõõtühikuid tuletada: pindala mõõtsid nad ruutühikutes. Kordsed ühikud võeti kasutusele Babüloonias. Vanast Babüloonias on pärit tänapäevani kasutatavad ajaühikud tund, minut ja sekund.

Keskaegne naturaalmajandus ei vajanud üleriigilisi mõõtühikuid ja mõõduasjandus arenes tagurpidi. Igas linnas oli küünral ise pikkus ja margal ise mass. Esimestena seadsid korra majja inglased: 15. sajandi lõpul kehtestati Inglismaal ametlikud riiklikud mõõtühikud.

Meetermõõdustik sündis Prantsusmaal. 1791. a. kevadel kuulutas Prantsuse Rahvuskogu dekreet seaduslikuks pikkusühikuks ühe kümnemiljondiku Pariisi veerandmeridiaani pikkusest. Meetri definitsiooni on mitu korda muudetud, püüdes alati säilitada mõõtühiku väärtust praktiliselt muutumatuna. Kaua oli meetri etaloniks plaatina ja iriidiumi sulamist valmistatud erilise ristlõikega varras. Nüüd on meetril uuesti looduslik etalon.

Kilogrammi ajalugu on mõneti sarnane meetri ajalooaga. Meetermõõdustiku esimeseks massi etaloniks oli 1 cm<sup>3</sup> puhast vett jää sulamistemperatuuril, mõõtühikule anti nimeks gramm. Esimese etaloni iga oli lühike. Etaloni vahetamisel ei soovitud juba tarvitusele võetud grammi väärtust oluliselt muuta ja nii sai uus massi põhiühik endale liitnime: kilogramm.

Uued mõõtühikud juurdusid aeglaselt. Kõige varem võtsid