

Usporedba rezultata umjeravanja barometra visokog razreda točnosti

Nasić, Dino

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:424329>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-06**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dino Nasić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Student:

Dino Nasić

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Lovorki Grgec Bermanec na savjetima, uloženom vremenu i riječima podrške prilikom izrade ovog rada.

Dino Nasić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dino Nasić** Mat. br.: 0035209037

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba rezultata umjeravanja barometra visokog razreda točnosti**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparison of calibration results of high accuracy barometer**

Opis zadatka:

Mjerenje i umjeravanje je proces koji zahtijeva stalno potvrđivanje rezultata i iskazanih mjernih nesigurnosti. S ciljem otkrivanja sustavnih pogrešaka te dobivanja i održavanja akreditacije, umjerni laboratoriji uvode odgovarajuće mjere osiguranja kvalitete rezultata kao što su: sudjelovanje u međulaboratorijskim usporedbama, ponavljanje, praćenje i ocjenjivanje rezultata umjeravanja. Svrha ovog rada je organizirati, provesti i analizirati međulaboratorijsku usporedbu akreditiranih umjernih laboratorija za tlak u području mjerenja tlaka okoline (barometarskog tlaka). U radu koristiti mjernu opremu Laboratorija za procesna mjerenja (LPM-a).

Potrebno je izraditi:

- Pregled osnova mjerenja tlaka okoline i umjeravanja barometara.
- Pregled normi i uputa za provedbu međulaboratorijskih usporedbi i obradu rezultata.
- Protokol usporedbe za tlak od 500 do 1100 hPa.
- Opis provedenih mjerenja u laboratorijima koji sudjeluju.
- Opis provedenih mjerenja u LPM-u i procjenu mjerne nesigurnosti za sve točke.
- Analizu rezultata usporedbe određivanjem En vrijednosti.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

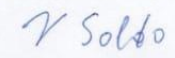
Datum predaje rada:
1. rok: 18. veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Sadržaj

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA.....	II
POPIS OZNAKA	III
SAŽETAK.....	IV
SUMMARY	V
1. UVOD.....	1
2. MJERENJE.....	3
2.1 Metrologija	3
2.2 Međunarodni sustav mjernih jedinica-SI sustava.....	3
2.2.1 Osnovne jedinice SI sustava.....	4
2.2.2 Izvedene jedinice SI sustava	5
3. MJERENJE TLAKA	6
3.1 Tlak.....	6
3.2 Metode mjerenja tlaka	7
3.2.1 Indirektne metode mjerenja tlaka.....	8
3.2.2 Direktne metode	8
3.3 Metode mjerenja atmosferskog tlaka.....	12
3.3.1 Živini barometri.....	12
3.3.2 Aneroidni barometri	15
3.3.3 Digitalni barometri	16
4. UMJERAVANJE MJERILA TLAKA	18
4.1 Mjerna nesigurnost	18
4.1.1 Procjena mjerne nesigurnosti tipa A	19
4.1.2 Procjena mjerne nesigurnosti tipa B.....	19
4.2 EURAMET	20
4.2.1 Umjeravanje elektromehaničkih i mehaničkih manometara.....	20
4.2.2 Umjeravanje tlačnih vaga.....	21
4.3 DKD.....	22
4.3.1 Metode umjeravanja	23
5. NORME I UPUTE ZA PROVEDBU MEĐULABORATORIJSKIH USPOREBI	27
5.1 Upute EURAMET-a.....	27
5.1.1 Pilot-laboratorij	27
5.1.2 Protokol i priprema za usporedbu	28

5.1.3	Objava usporedbe	28
5.2	Hrvatska akreditacijska agencija (HAA).....	29
6.	OPIS PROVEDENIH MJERENJA	32
6.1	Mjerenje u laboratoriju DHMZ-a	32
6.1.1	Rezultati mjerenja u laboratoriju DHMZ-a.....	34
6.2	Mjerenje u BMB laboratoriju	34
6.2.1	Rezultati mjerenja u BMB laboratoriju	36
6.3	Mjerenje u LPM-u	36
6.3.1	Rezultati mjerenja u LPM-u.....	38
7.	ANALIZA REZULTATA MEĐULABORATORIJSKE USPOREDBE	39
7.1	Usporedba LPM-a i laboratorija DHMZ-a	39
7.2	Usporedba LPM-a i BMB laboratorija	40
8.	ZAKLJUČAK	43
	LITERATURA.....	44
	PRILOZI.....	45

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz mjernih jedinica za duljinu u doba Egipta	2
Slika 2. Osnovne fizikalne veličine pripadajuće jedinice	4
Slika 3. Neke izvedene jedinice SI sustava bez posebnih oznaka i znakova	5
Slika 4. Odnos apsolutnih i manometarskih tlakova	7
Slika 5. Indirektne metode mjerenja tlaka.....	8
Slika 6. Direktne metode mjerenja tlaka	9
Slika 7. Manometar u obliku U-cijevi.....	9
Slika 8. Manometar s nagnutom cijevi	9
Slika 9. Jednostavna shema tlačne vage	10
Slika 10. Podjela tlačnih vaga	11
Slika 11. Jednostavna shema Bourdonove cijevi	11
Slika 12. Jednostavan živin barometar	13
Slika 13. Kew barometar	14
Slika 14. Shema Fortinovog barometra.....	15
Slika 15. Barograf	16
Slika 16. Barometar s cilindričnim rezonatorom	16
Slika 17. Shema barometra sa silicijskim kapacitivnim osjetnikom.....	17
Slika 18. Shematski prikaz metode A	25
Slika 19. Detaljni prikaz segmenta metode A	25
Slika 20. Shematski prikaz metode B.....	25
Slika 21. Shematski prikaz metode C.....	26
Slika 22. Izvještaj za prijavu sudjelovanja u međulaboratorijskim usporedbama	30
Slika 23. Digitalni barometar Vaisala, PTB330	32
Slika 24. Tlačna vaga Ruska, 2465A-754A	33
Slika 25. Ručno namještanje mjerne točke	35
Slika 26. Referentni uređaj (lijevo) i umjeravani uređaj (desno).....	35
Slika 27. Tlačna vaga TLVAG-09	37
Slika 28. Grafički prikaz usporedbe LPM-a i laboratorija DHMZ-a	40
Slika 29. Grafički prikaz usporedbe LPM-a i BMB laboratorija	41
Slika 30. Grafički prikaz vrijednosti E_n	41
Slika 31. Grafički prikaz usporedbe LPM-a, BMB laboratorija i laboratorija DHMZ-a.....	42

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovne metode umjeravanja prema DKD-R 6-1	24
Tablica 2. Referentni uređaji	33
Tablica 3. Okolišni uvjeti u laboratoriju DHMZ-a	34
Tablica 4. Rezultati mjerenja u laboratoriju DHMZ-a	34
Tablica 5. Okolišni uvjeti u BMB laboratoriju	35
Tablica 6. Izmjerene vrijednosti u BMB laboratoriju	36
Tablica 7. Izračunate vrijednosti u BMB laboratoriju	36
Tablica 8. Okolišni uvjeti u LPM-u	37
Tablica 9. Izmjerene vrijednosti u LPM-u	38
Tablica 10. Izračunate vrijednosti u LPM-u	38
Tablica 11. Usporedba rezultata LPM-a i laboratorija DHMZ-a	39
Tablica 12. Usporedba rezultata LPM-a i BMB laboratorija	40

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
p	Pa	Tlak
F	N	Sila
A	m ²	Površina
w	N/m ³	Specifična težina
h	m	Visina stupca tekućine
g	m/s ²	Gravitacijsko ubrzanje
\bar{x}_l	bar	Srednja vrijednost izmjerene veličine
u	bar	Standardna nesigurnost
n	-	Broj ponavljanja mjerenja
s	bar	Standardno odstupanje
t	°C	Temperatura
φ	%	Relativna vlažnost
U	bar	Proširena mjerna nesigurnost
U_{lab}	bar	Proširena mjerna nesigurnost umjeravanog laboratorija
U_{LPM}	bar	Proširena mjerna nesigurnost LPM-a
U_{BMB}	bar	Proširena mjerna nesigurnost BMB laboratorija
U_{DHMZ}	bar	Proširena mjerna nesigurnost laboratorija DHMZ-a
a	bar	Polu-interval mjerne nesigurnosti
A_{ef}	m ²	Efektivna površina
A_0	m ²	Efektivna površina pri početnom tlaku
k	-	Faktor pokrivanja
p_e	bar	Izmjereni tlak referentnog uređaja
M_{sr}	bar	Srednja vrijednost izmjerenog tlaka umjeravanog uređaja
h	bar	Histereza
b	bar	Ponovljivost
x_{lab}	bar	Mjerni odmak umjeravanog laboratorija
x_{LPM}	bar	Mjerni odmak LPM-a
E_n	bar	Faktor slaganja
u_A	bar	Standardno odstupanje

SAŽETAK

U okviru ovog rada opisana je organizacija, provedba i analiza međulaboratorijske usporedbe u kojoj su sudjelovala tri akreditirana umjerna laboratorija za tlak u području mjerenja tlaka okoline: Laboratorij za procesna mjerenja (LPM), umjerni laboratorij Državnog hidrometeorološkog zavoda te BMB laboratorij. Umjeravanje je provedeno u području od 500 do 1100 hPa, a kao umjeravani uređaj korišten je digitalni, kapacitivni barometar Vaisala, PTB330. Kako bi se detaljno mogao pojasniti spomenuti postupak, uvodno je opisano samo mjerenje, tj. mjeriteljstvo kao znanstvena disciplina, a dan je i pregled osnovnih metoda mjerenja barometarskog tlaka, kao i postupaka umjeravanja barometara. Detaljno su opisane osnovne norme i upute za provedbu međulaboratorijskih usporedbi, od kojih su, za nas najznačajnije, one EURAMET-a i DKD-a. Glavni cilj cijelog rada bio je odrediti vrijednosti faktora slaganja E_n temeljem kojeg vršimo procjenu kvalitete međulaboratorijske usporedbe.

Ključne riječi: mjerenje, umjeravanje, međulaboratorijska usporedba, barometar, tlak, norma, laboratorij, faktor slaganja (E_n)

SUMMARY

This paper describes organization, execution and analysis of an interlaboratory comparison in which three accredited calibration laboratories for pressure in the field of ambient pressure measurement took place: Laboratory for process measurements (LPM), calibration laboratory of the Croatian Meteorological and Hydrological Service and BMB laboratory. Calibration was performed in the range of 500 to 1100 hPa and a digital, capacitive barometer Viasala, PTB330 was used as a calibration device. In order to explain the mentioned procedure in detail, in the introduction measurement itself, ie metrology as a scientific discipline is described, and also an overview of basic methods of barometric pressure measurement, as well as an overview of barometer calibration methods is given. The basic norms and instructions for the implementation of interlaboratory comparisons are described in detail, of which the most important for us are those of EURAMET and DKD. The main purpose of the whole paper was to determine values of agreement factor (E_n), which is used to evaluate the quality of interlaboratory comparison.

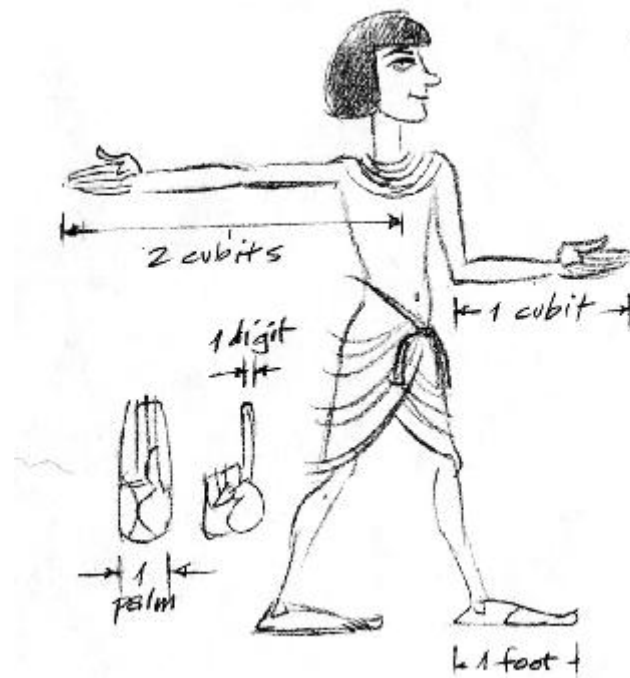
Key words: measurement, calibration, interlaboratory comparison, barometer, pressure, norm, laboratory, agreement factor (E_n)

1. UVOD

Globalna ekonomija sadašnjice ovisi o pouzdanim mjerenjima i ispitivanjima kojima se može vjerovati i koja su međusobno prihvaćena na međunarodnoj razini. Ona ne smiju stvarati tehničke zapreke trgovini. Preduvjet za to je šire upotrebljavana čvrsta metrološka infrastruktura koja je danas postigla gotovo razinu savršenstva. Mjerenje susrećemo na svakodnevnoj bazi. Koristimo ga prilikom izvođenja nekih osnovnih ljudskih potreba kao što je kuhanje pa sve do nekih složenijih radnji kao što je projektiranje i sl. Stare jedinice koje su bazirane na dijelovima tijela su zbog nepraktičnosti zamijenjene novima, a mjerni uređaji uvelike su se unaprijedili i automatizirali te omogućuju puno veću točnost mjerenja koja je rezultat preciznog te učestalog umjeravanja, koje je tema ovoga rada.

Ipak, standard na koji smo danas navikli postoji tek u skorijoj sadašnjosti, a potreba za mjerenjem javlja se još u doba starih civilizacija koje su nastanjivale naš planet u trećem i četvrtom tisućljeću prije Krista, a koristile su se najčešće dijelovima tijela za stvaranje mjernih jedinica. Iako tada metrološka infrastruktura nije bila ni približno razvijena kao danas, svejedno je bila od iznimne važnosti. Tako su, primjerice, u drevnom Egiptu smrtnom kaznom kažnjavani oni koji bi zaboravili ili zanemarili svoju dužnost umjeravanja etalonske jedinice duljine za svakoga punog mjeseca. Pogibelji ovoga oblika bili su izloženi graditelji na gradilištima faraonskih piramida i hramova. Stari su Egipćani osmislili i koristili egipatski lakat koji je možda i najznačajnija mjerna jedinica za duljinu Staroga vijeka, a bio je temeljen na glavnom kraljevskom etalonu lakta od crnoga granita kojega su koristili za umjeravanje štapova i ravnala. Iz navedenoga proizlazi da je, sukladno potrebama za mjerenjem, od samih početaka iznikla i potreba za konstantnim umjeravanjem mjernih uređaja, tj. uspoređivanjem vrijednosti koje isti pokazuju s vrijednostima pramjere, tj. etalona. Sumerani su imali mjerne jedinice za duljinu, površinu, volumen i težinu. Podijeljena u 60 šekela, mina je bila mjerna jedinica za težinu te je bila otprilike ekvivalentna jednome kilogramu [1]. Iako se s prolaskom vremena javljala potreba za stalnim razvijanjem i unaprjeđenjem sustava mjerenja, mjerne jedinice koje su stvorile najstarije civilizacije su poslužile kao temelj za razvoj metričkih sustava budućim naraštajima. Međutim, uvijek su se javljale poteškoće zbog nepostojanja standardizacije i unifikacije mjera. Još u srednjem vijeku se znalo događati da regije te gradovi unutar iste države imaju različite mjerne jedinice te se prvi uspjesi po tome pitanju ostvaruju u 12. i 13. stoljeću. Srednji vijek je općenito po pitanju razvoja metrologije bio zaboravna etapa. Značajniji iskoraci po tom pitanju događaju se krajem 18. stoljeća kada su ozakonjeni metrički mjerni i decimalni sustav kojim su, osim metra, uvedeni i jedinica za vrijeme (sekunda), težinu (kilogram), površinu (kvadratni

metar) te jedinica za volumen (kubični metar). Daljnji razvoj je zahtijevao uvođenje jedinstvenog metarskog sustava u svrhu olakšanja trgovine te samoga napretka tehnologije i gospodarstva pa je 1875. godine u Parizu potpisan Dogovor o metru koji je bio od velikoga značaja za Europu. Naposljetku je osnovan Međunarodni ured za utege i mjere sa sjedištem u Parizu čime je stvoren temelj današnjoj metrološkoj infrastrukturi [2].



Slika 1. Prikaz mjernih jedinica za duljinu u doba Egipta

2. MJERENJE

Mjerenje je postupak određivanja vrijednosti neke mjerne, fizikalne veličine. Može biti izravno i neizravno. Izravno mjerenje vrši se izravnim uspoređivanjem dobivene vrijednosti s istovrsnom usporedbenom veličinom-mjernom jedinicom. Neizravno mjerenje se vrši izravnim mjerenjem onih mjernih veličina od kojih je izvedena tražena fizikalna veličina te naknadnim izračunom njene vrijednosti.

2.1 Metrologija

Mjeriteljstvo ili metrologija je znanstvena disciplina koja se bavi mjerenjem u svim njegovim teorijskim i praktičnim oblicima, koji uključuju metode mjerenja te ostvarivanje i održavanje etalona fizikalnih veličina, razvoj i izradu mjernih instrumenata te analizu mjernih rezultata. Metrologija izvršava tri bitna zadatka [3]:

1. Definiira mjerne jedinice prihvaćene na međunarodnoj razini (npr. kilogram).
2. Ostvarivanje mjernih jedinica pomoću znanstvenih metoda.
3. Utvrđivanje lanca sljedivosti pri utvrđivanju i dokumentiranju točnosti i vrijednosti mjerenja te prijenosu toga znanja.

Mjeriteljstvo se dijeli na tri glavne kategorije:

1. Znanstvena metrologija koja razvija i organizira mjerne etalone i bavi se njihovim održavanjem.
2. Industrijska metrologija koja se bavi osiguravanjem propisnog funkcioniranja mjerila u industrijskim postrojenjima, proizvodnim procesima i ispitivanjima.
3. Zakonska metrologija koja se bavi točnošću mjerenja gdje ona utječu na razvidnost gospodarskih transakcija, zdravlje i sigurnost.

2.2 Međunarodni sustav mjernih jedinica SI sustava

Međunarodni sustav mjernih jedinica je sustav mjernih jedinica čija je uporaba zakonom propisana u svim državama osim u SAD-u, Liberiji i Mjanmaru, a u Hrvatskoj je uveden u uporabu 1. siječnja 1981. godine. Mjerne se jedinice definiraju u Međunarodnom uredu za mjere i utege (CIPM) u Parizu te se dijele na:

- osnovne jedinice
- izvedene jedinice s posebnim oznakama i znakovima

- izvedene jedinice bez posebnih oznaka i znakova

Kategorija posebnih jedinica koja je sadržavala meridijan i steradian ukinuta je 1995. godine, a spomenute jedinice postale su izvedene jedinice bez posebnih oznaka i znakova.

2.2.1 Osnovne jedinice SI sustava

SI sustav temelji se na sedam osnovnim fizikalnih veličina, a to su: masa, duljina, vrijeme, električna struja, termodinamička temperatura, svjetlosna jakost i količina tvari. Pripadajuće im mjerne jedinice nazivamo osnovnim mjernim jedinicama koje su međusobno nezavisne. Na slici 2. su prikazane osnovne fizikalne veličine uz pripadajuće im mjerne jedinice:

	OSNOVNA VELIČINA	OSNOVNA JEDINICA	ZNAK
1	Duljina	metar	m
2	Masa	kilogram	kg
3	Vrijeme	sekunda	s
4	Električna struja	amper	A
5	Termodinamička temperatura	kelvin	K
6	Količina tvari	mol	mol
7	Svjetlosna jakost	kandela	cd

Slika 2. Osnovne fizikalne veličine pripadajuće jedinice

Definicija osnovnih mjernih jedinica SI sustava [3]:

Metar - numerička vrijednost brzine svjetlosti u vakuumu, c , jednaka je 299792458 m/s.

Kilogram - numerička vrijednost Planckove konstante, h , jednaka je $6,62607015 \cdot 10^{-34}$ J*s (kg*m²/s).

Sekunda - numerička vrijednost frekvencije (prijelaza osnovnog stanja atoma) cezija-133, $\Delta\nu_{Cs}$, jednaka je 9192631770 Hz (1/s).

Amper - numerička vrijednost elementarnog naboja, e , jednaka je $1,602176634 \cdot 10^{-19}$ C (A*s).

Kelvin - numerička vrijednost Boltzmannove konstante, k , jednaka je $1,380649 \cdot 10^{-23}$ J/K (kg*m²/s²K).

Mol - količina tvari koja sadrži elementarnih entiteta u iznosu od $6,02214076 \cdot 10^{23}$, koji označava fiksnu vrijednost Avogadrove konstante, N_A , kad je izražena jedinicom 1/mol.

Kandela - numerička vrijednost svjetlosne učinkovitosti (monokromatskog zračenja frekvencije 540 THz), K_{cd} , jednaka je 683 cd/W ($\text{cd} \cdot \text{s}^3 / \text{kg} \cdot \text{m}^2$).

2.2.2 Izvedene jedinice SI sustava

Izvedene jedinice SI sustava se korištenjem dijeljenja i množenja prikazuju pomoću osnovnih jedinica, tj. izvode iz osnovnih jedinica ovisno o fizikalnim zakonima i vezama među veličinama koje ih tvore [3].

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

Slika 3. Neke izvedene jedinice SI sustava bez posebnih oznaka i znakova

Osim izvedenih jedinica bez posebnih oznaka i znakova, postoje i one koje imaju posebne nazive i znakove, te se koristeći njih mogu dobiti nove izvedene jedinice.

Od jedinica u uporabi valja spomenuti i jedinice izvan SI sustava čija je primjena dopuštena (npr. min, bar, h...).

3. MJERENJE TLAKA

Iako nam nekad ukazuje na promjene tlaka oko nas (npr. kada se penjemo na uzvisine pa osjećamo pritisak), ljudsko tijelo uglavnom nije sposobno zorno razlikovati promjere u atmosferskom tlaku, no to ne znači da su one od zanemarivog značaja. Promjene atmosferskog tlaka ne samo da su od iznimne važnosti u industrijskim pogonima, laboratorijima..., nego i u svakodnevnom životu te utječe na njegovu kvalitetu. Na određenu populaciju se promjene atmosferskog tlaka negativno manifestiraju u obliku različitih zdravstvenih tegoba, te je čak razvijena grana znanosti koja se bavi utjecajem vremena (pa tako i tlaka) na ljude, životinje i biljke-biometeorologija. Često smo toga i nesvjesni, ali prilagodne na promjene tlaka nalaze se svuda oko nas. Primjerice, u avionima i drugim vrstama letjelica se umjetno stvara tlak kako bi se putnici osjećali ugodno prilikom leta na visinama, gdje je tlak prilično niži od nama uobičajenog. Zato se zadnjih 200 godina, a pogotovo u skorije doba, intenzivno ulaže te su razvijeni raznovrsni sustavi i načini mjerenja statičkoga tlaka u rasponima čak od 10^{-8} do 10^{-9} Pa.

Instrumenti kojima se mjeri tlak uvijek u suštini mjere razliku tlaka, a ovisno o tome koja referentna vrijednost je uzeta u obzir, mjere apsolutni, relativni ili diferencijalni tlak. Mogu mjeriti i vakuum, no tu se ne radi o 100%-tnom vakuumu, nego o najmanjoj postizivoj vrijednosti tlaka u danim uvjetima. Pošto se atmosferski tlak mijenja s vremenom, valja napomenuti da se moraju izvršiti određene korekcije kako bi se on uzeo kao referentna vrijednost prilikom mjerenja.

3.1 Tlak [4]

Tlak je fizikalna veličina definirana preko normalne sile koja djeluje na jedinicu površine sustava. Za fluid u mirovanju definiran je jednadžbom:

$$p = \frac{dF}{dA} \quad (1)$$

u kojoj dA označava diferencijal površine, tj. najmanji dio površine kod koje su efekti fluida jednaki onima u cijelome kontinuumu. U mehanici fluida tlak je definiran preko specifične težine w i visine stupca fluida h , prema jednadžbi (2):

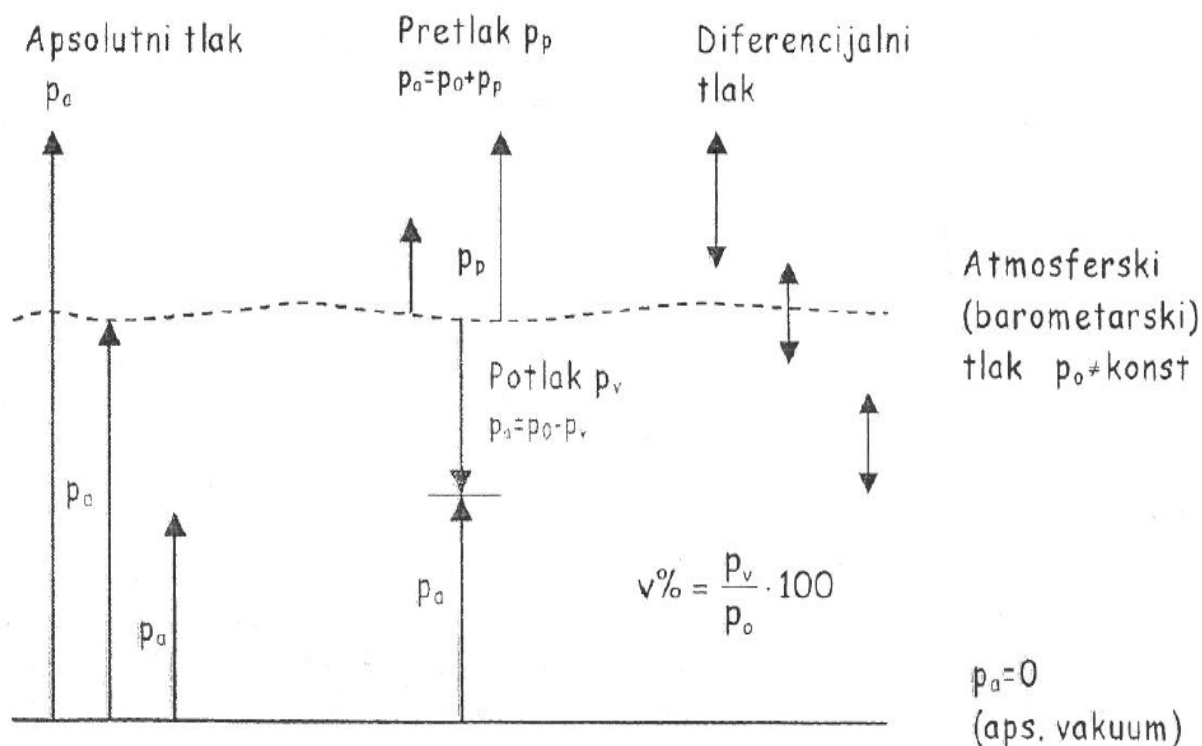
$$dp = -wdh \quad (2)$$

Sva osnovna mjerenja tlaka se temelje na prethodne dvije jednadžbe. Općenito, tlak je rezultat djelovanja molekula unutar nekog fluida na stjenke posude. U slučaju da posuda ne sadrži niti jednu molekulu, tlak u njoj je jednak nuli, tj. u posudi se nalazi 100 %-tni vakuum. Ukoliko bi tlak mjerili na skali koja koristi apsolutnu nulu kao referentnu vrijednost, dobiveni rezultat

mjerenja bio bi apsolutni tlak, dok bi, u slučaju korištenja okolišnog tlaka kao referentne vrijednosti, mjerili relativni tlak. Ako bi mjereni relativni tlak bio veći od okolišnog, mjerili bi pretlak, a ako bi mjereni tlak u posudi bio manji od okolišnog, radilo bi se o podtlaku. Odnos apsolutnog i tlaka okoline dan je jednadžbom (3):

$$\text{Apsolutni tlak} = \text{tlak okoline} \pm \text{relativni tlak} \quad (3)$$

Postoje i slučajevi kada se traži razlika tlaka između dva zasebna sustava te se tada kao referentna vrijednost ne mora uzimati ni atmosferski tlak ni nula, već neka druga vrijednost te tada mjerimo diferencijalni tlak. Slika 1. pobliže objašnjava odnose između nabrojanih vrsta tlakova:



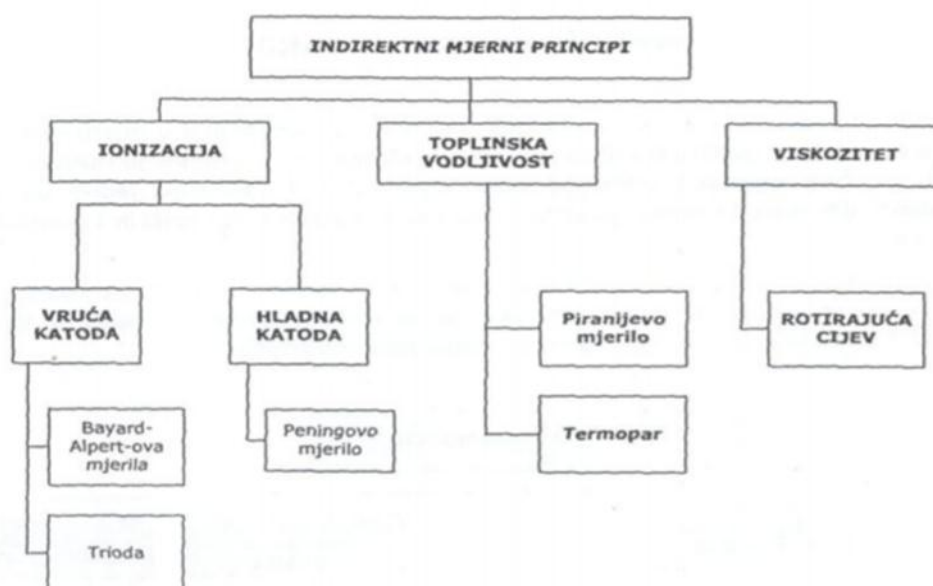
Slika 4. Odnos apsolutnih i manometarskih tlakova [4]

3.2 Metode mjerenja tlaka

Obzirom da postoji mnoštvo različitih metoda mjerenja i instrumenata za mjerenje tlaka, postoji i nekoliko različitih klasifikacija istih. Jedna od osnovnih klasifikacija je podjela na indirektnu i direktnu metode mjerenja tlaka.

3.2.1 Indirektne metode mjerenja tlaka

Uređaji za indirektno mjerenje tlaka promatraju i koriste učinak te posljedice tlaka koji djeluje na materijale ili tijela određenog oblika, kako bi odredili iznos samoga tlaka. Primjeri takvih učinaka su fleksibilne deformacije šupljih ploča ili tijela, promjena magnetskih ili električnih karakteristika materijala ili optički i kemijski učinci na različita tijela i tvari. Za izvođenje ovih mjerenja potrebni su i mjerni pretvarači na koje djeluje tlak. Oni tlačno opterećenje, koje djeluje na njih, pretvaraju u izlazni signal. Izlazni signal je pneumatske ili električne prirode, a može biti digitalni ili analogni, te je funkcija nametnutog tlaka.

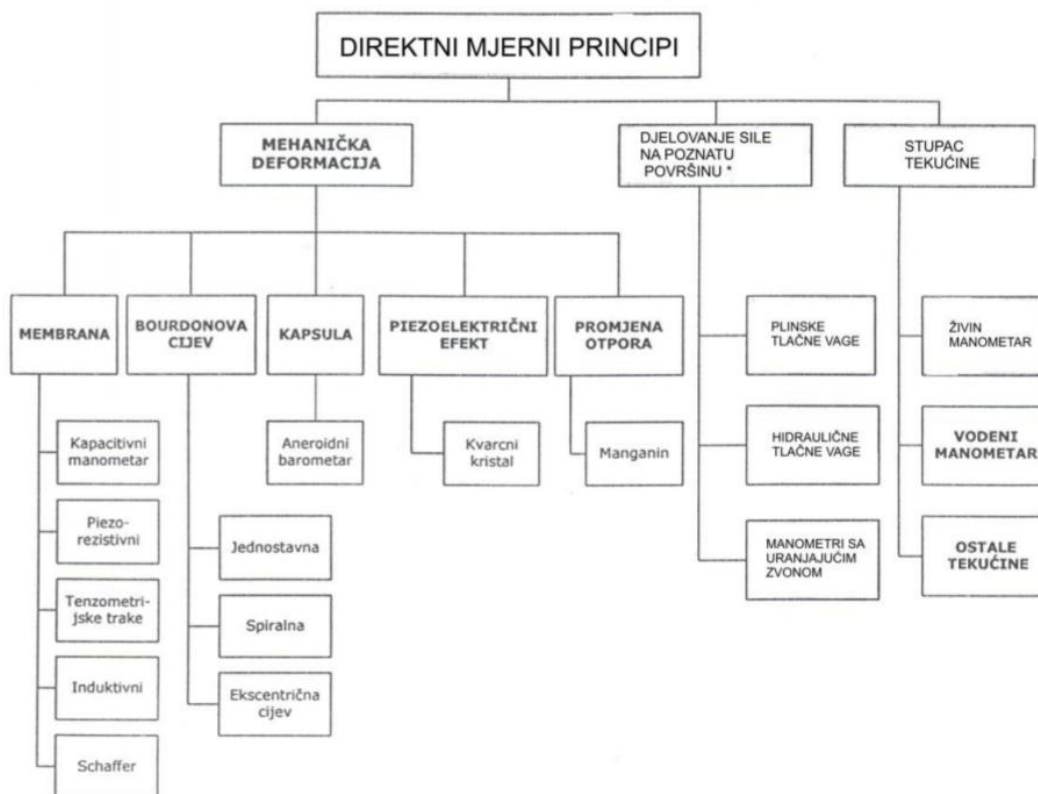


Slika 5. Indirektne metode mjerenja tlaka

3.2.2 Direktne metode

Direktne metode dobivaju rezultate na temelju veza iz osnovnih jednadžbi za tlak (1) i (2). Dijelev se na tri osnovna principa:

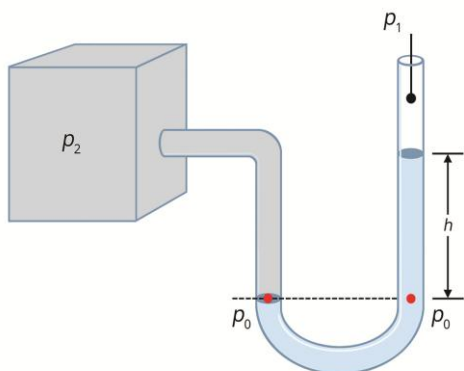
1. Mjerenje stupca tekućine
2. Mjerenje mehaničke deformacije
3. Mjerenje posredstvom djelovanja sile na poznatu površinu



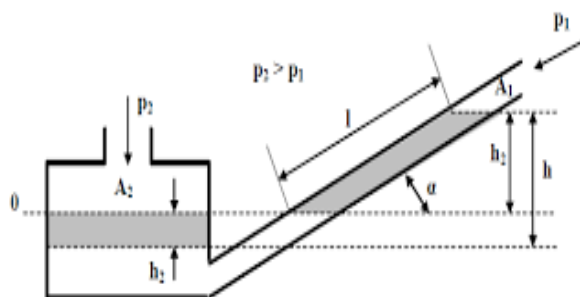
Slika 6. Direktne metode mjerenja tlaka

3.2.2.1 Mjerenje stupca tekućine [5]

Iako je jedna od najstarijih, metoda mjerenja tlaka pomoću stupca tekućine još uvijek je jedna od najpreciznijih i najkorištenijih metoda, a očituje se u usporedbi manometarskog tlaka koji se mjeri s visinom stupca tekućine prema formuli (2).



Slika 7. Manometar u obliku U-cijevi



Slika 8. Manometar s nagnutom cijevi

Slika 7. prikazuje manometar u obliku U-cijevi koja je ispunjena tekućinom. Na temelju razlike visina između površina tekućine dobiva se vrijednost tlaka. Na referentnoj razini, koja se nalazi

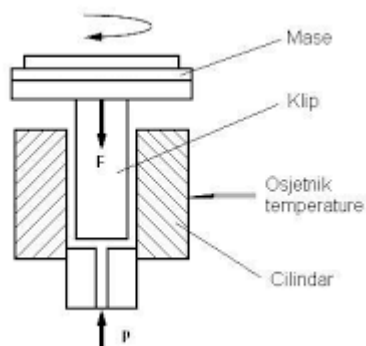
na dnu visine h , ravnoteža tlaka uvjetovana je tlakom p_0 koji djeluje s donje strane i zbrojem hidrostatskog tlaka tekućine ρgh i tlaka p_1 koji djeluje s gornje strane. Jednadžba ravnoteže na referentnoj visini glasi:

$$p_0 = \rho gh + p_1 \quad (4)$$

Ako je gornji dio cijevi zatvoren i evakuiran, vrijednost tlaka p_1 jednaka je nuli. U tom slučaju ovaj instrument postaje barometar. Ukoliko se zahtjeva veća preciznost ili daljnja obrada mjernog rezultata, razlika u visinama se može mjeriti otpornom žicom koja se umetne u fluid, ili refleksijom zvučnih ili svjetlosnih valova. Odabir tekućine koja se koristi za mjerenje ovisi o vrijednosti tlaka koja se mjeri. Najčešće odabir tekućine svodi se na živu, alkohol, ulje ili vodu, dok je živa redovit izbor ako se uređaj koristi kao barometar (visina stupca od oko 0,75 m dovoljna je za mjerenja okolišnog tlaka). Ova metoda koristi se u pravilu za mjerenja nižih tlakova i vakuuma.

3.2.2.2 Mjerenje posredstvom djelovanja sile na poznatu površinu

Najrelevantniji predstavnik ove metode mjerenja tlaka su tlačne vage koje su ujedno i najprecizniji referentni instrumenti za mjerenje tlaka pa se baš njih koristi kao etalon za ostala mjerila. Glavni sastavni dio tlačnih vaga čini sklop klip-cilindar koji ujedno definira i efektivnu površinu [6].



Slika 9. Jednostavna shema tlačne vage [6]

Princip rada tlačnih vaga temelj nalazi u zakonu promjene hidrostatičkog tlaka, a sam mehanizam mjerenja očituje se u postizanju ravnotežnih uvjeta između sile uzrokovane masom s gornje strane te sile uzrokovane tlakom fluida koji se dovodi s donje strane klipa (najčešće dušik ili bijelo ulje). Kada se postignu ravnotežni uvjeti, klip i utezi plutaju te počnu slobodno rotirati u cilindru kako bi se uklonilo trenje. Tada je vaga u ravnoteži s tlakom nepoznatog iznosa u sustavu. Kroz procjep između klipa i cilindra postoji određeno istjecanje fluida, zbog kojeg se kontinuirano mora dodavati tlak u sustav kako bi se održalo ravnotežno, „plutajuće“ stanje.

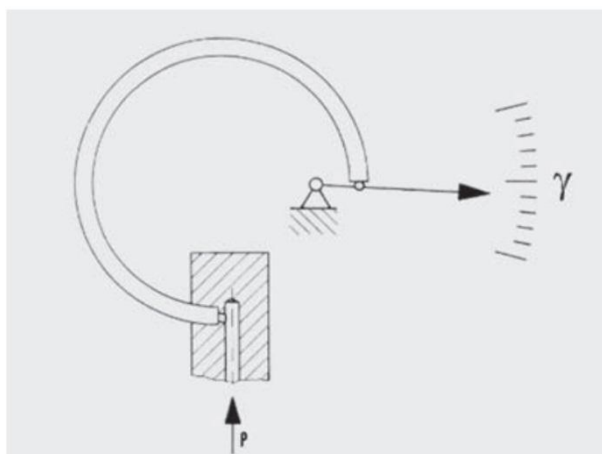
Tlačne vage dijele se na hidrauličke i plinske, a hidrauličke tlačne vage mogu biti uljne ili vodene. Na slici 10. prikazana je navedena podjela te primjena pojedinih vrsta tlačnih vaga ovisno o tlaku koji se mjeri:



Slika 10. Podjela tlačnih vaga

3.2.2.3 Mjerenje mehaničke deformacije

Metoda određivanja tlaka posredstvom mehaničke deformacije koristi svojstvo elastične deformacije senzora koji je izložen promjeni tlaka. Princip rada ove metode prikazan je na slici 11. koja prikazuje jedan od najčešćih instrumenata koji koriste ovu metodu mjerenja-Bourdonova cijev.



Slika 11. Jednostavna shema Bourdonove cijevi

Instrumenti za ovu metodu mjerenja sastoje se od tri funkcionalna dijela koji su instalirani unutar kućišta: senzora, kretanja i brojčanika. Kao što je prikazano na slici 11., senzor se uslijed djelovanja tlaka p deformira te zapravo pretvara tlak u pomak [5]. Kretanje pojačava pomak te ga pretvara u kut rotacije γ . Brojčanik je označen s mjernom ljestvicom koja pretvara položaj pokazivača dobivenog kuta rotacije γ u očitavanje tlaka.

3.3 Metode mjerenja atmosferskog tlaka

Atmosferski tlak jednak je težini okomitog stupca zraka iznad Zemljine površine, koji doseže vanjski rub atmosfere. Barometar je mjerni instrument kojim se mjeri atmosferski tlak. Standardna mjerna jedinica kojom bi svi barometri, korišteni u meteorološke svrhe, trebali biti skalirani je hektopascal (hPa), iako su neki skalirani i u milimetrima žive (mmHg). Jednadžbama (5) i (6) iskazana je veza između navedenih mjernih jedinica [7]:

$$1\text{hPa} = 0,750062 \text{ mmHg} \quad (5)$$

$$1\text{mmHg} = 1,333224 \text{ hPa} \quad (6)$$

Osnovna podjela barometara:

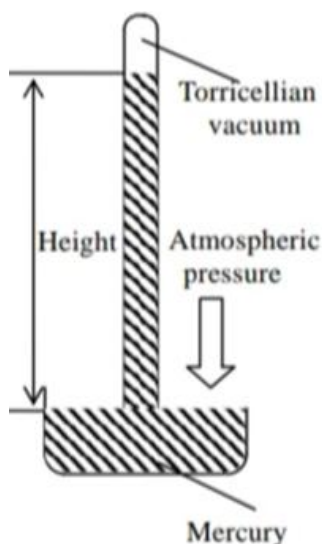
1. Tekućinski (živini) barometri
2. Aneroidni barometri
3. Digitalni barometri

3.3.1 Živini barometri

Živin barometar je najstariji tip barometra. Izumio ga talijanski fizičar Torricelli davne 1643. godine. Umjesto žive u početnim stadijima eksperimenata koristio je vodu. Međutim, vodu je zbog puno manje gustoće (koja je stoga zahtijevala puno veću visinu stupca tekućine) ubrzo zamijenio živom koja ima i bolji utjecaj kapilarnosti (zbog iznosom većih kohezivnih sila u odnosu na adhezivne, površina ima konveksan oblik pa je visinu lakše odrediti).

3.3.1.1 Jednostavan živin barometar [7]

Svi barometri ovog tipa rade na istom principu. Kada se cijev s otvorom na vrhu napuni živom, okrene naopačke te smjesti u spremnik sa živom, živa počne istjecati iz cijevi u spremnik. Kada živa prestane istjecati i postigne se ravnotežno stanje, na suprotnom kraju cijevi postigne se „Torricellijev vakuum“. Visina žive u cijevi precizno se mjeri pa se na temelju jednadžbi (5) i (6) računa iznos tlaka.



Slika 12. Jednostavan živin barometar [7]

Ovaj tip barometra koristi se za mjerenja koja ne zahtijevaju iznimnu preciznost. Ukoliko situacija zahtijeva veću preciznost, određene modifikacije se moraju izvršiti nad ovim osnovnim tipom barometra. Naime, problem se javlja prilikom promjene atmosferskoga tlaka. Istu bi trebali očitati na temelju promjene visine stupca tekućine žive u cijevi koja se uspoređuje s razinom žive u spremniku, ali se kod jednostavnog živinog barometra tada mijenja i razina žive u spremniku. Rješenje ovog problema ponudio nam je izum Kew i Fortinovog barometra.

3.3.1.2 Kew barometar

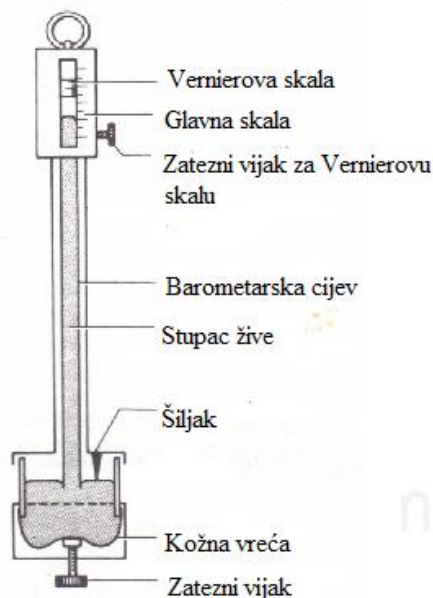
Kew barometar najčešće je korišten instrument u meteorološkim mjerenjima. Kao i kod jednostavnog živinog barometra, njegov spremnik žive konstantne je zapremnine. Promjene atmosferskog tlaka i razine žive u spremniku kompenzira malim promjenama na mjernoj ljestvici koja se nalazi na cijevi. Pomicanjem prema gore, razmak između točaka mjerne ljestvice se u malom iznosu smanjuje, čime se omogućuje preciznije mjerenje. Često se koristi u mjerenjima na moru jer mogu poništiti oscilacije visine stupca žive uzrokovane gibanjem broda. Prednost je i što se mogu lako transportirati (vodoravno ili naopačke) sa spremnikom žive gore i cijevi ispunjenom živom.



Slika 13. Kew barometar

3.3.1.3 Fortinov barometar [7]

Za razliku od Kew barometra, spremnik žive Fortinovog barometra promjenjivog je volumena, ali visina žive u spremniku se uvijek dovodi na istu razinu. Visina stupca žive mjeri se uporabom Vernierove ljestvice. Na Vernierovoj ljestvici nula je istovjetna referentnoj točki unutar spremnika te je određena vrškom šiljka koji se nalazi na vrhu spremnika žive. Donji dio spremnika izveden je kao vreća od savitljivog materijala (najčešće koža). Dovod i odvod žive u kožnu vreću, a zatim i u staklenu cijev, kontrolira se zakretanjem zateznog vijka. Princip rada Fortinovog barometra očituje se u stezanju ili otpuštanju zateznog vijka (a time i kožne vreće) prilikom promjena atmosferskog tlaka sve dok se u spremniku ne postigne željena razina žive, tj. dok vršak šiljka ne dotakne površinu žive. Kada se to postigne, sa staklene cijevi se očitava iznos atmosferskog tlaka. Fortinov barometar primjenjiv je samo prilikom mjerenja atmosferskog tlaka unutar normalnog raspona.



Slika 14. Shema Fortinovog barometra

3.3.2 Aneroidni barometri

Francuski znanstvenik Lucien Vidi izumio je 1844. godine aneroidni barometar. Zahvaljujući svojoj kompaktnosti, nižoj cijeni i mogućnosti lakog transporta koji uvjetuju lakše korištenje, aneroidni barometri su polagano zamijenili živine barometre u širokoj primjeni. Također, sigurniji su za korištenje jer nema izlaganja živi prilikom mjerenja. Ipak, mjerenja vršena ovim instrumentima manje su precizna [7]. Aneroidni barometar sastavljen je od komore, opruge koja čuva komoru od pritiska tlaka, zupčanika i poluga koje pojačavaju i prenose male iznose varijacija. Princip rada temelji se na širenju i kontrakciji zapečaćene, evakuirane metalne komore ili membrane uslijed promjene atmosferskog tlaka oko nje. Elastičnost komore varira ovisno o temperaturi kojoj je izložena te se u svrhu temperaturne kompenzacije postavlja bimetalna pločica. Komora se, nakon deformacije uzrokovane tlakom, ne vraća odmah u početno stanje čak i kad se tlak smanji. Ovo svojstvo naziva se histereza te uzrokuje greške u mjerenju. Da bi se ovo spriječilo, komora mora biti izrađena od posebnih materijala. Promjene dimenzija komore registrira se mehaničkim (barografi) ili električnim putem. Ukoliko se radi o registraciji električnim putem, komora na temelju postojećih deformacija mijenja parametre koji definiraju kapacitet ili premješta propusnu jezgru koja se nalazi u zavojnici žice koja uzrokuje induktivitet. Barograf je jedna od izvedbi aneroidnih barometara koja promjene dimenzija komore registrira mehaničkim putem. Promjene dimenzija komore šalju se preko sustava poluga (u obliku pomaka) olovci za zapisivanje koja se pomiče po satu s bubnjem te zapisuje vrijednosti tlaka.



Slika 15. Barograf

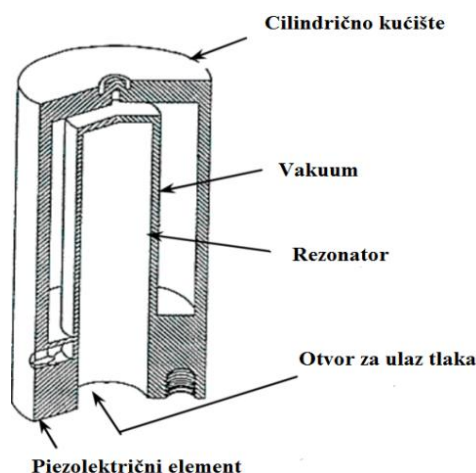
3.3.3 Digitalni barometri

Digitalni barometri predstavljaju novo doba u mjerenju atmosferskog tlaka. Imaju sposobnost mjeriti trenutni tlak te ga zajedno s mjerenjima u nekoliko prethodnih sati prikazati u obliku grafa. Zahtijevaju stabilan i kontinuiran dovod energije. Dva su osnovna tipa digitalnih barometara [7]:

1. Barometar s cilindričnim rezonatorom
2. Barometar sa silicijskim kapacitivnim osjetnikom

3.3.3.1 Barometar s cilindričnim rezonatorom [7]

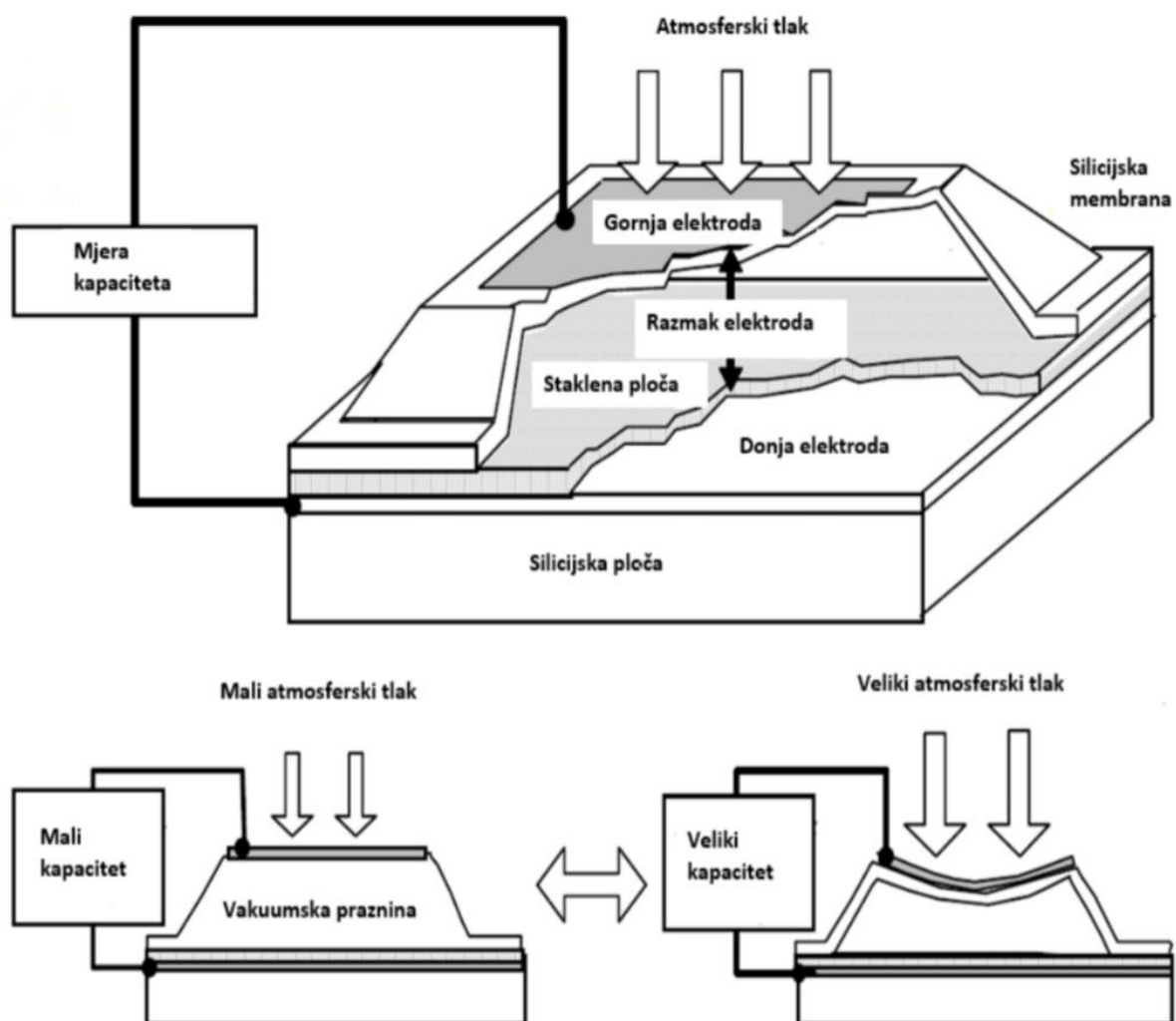
Osjetnik kod ove vrste barometra je dvostruki metalni cilindar koji je zatvoren s jedne strane. Prostor između cilindara je evakuiran. Prirodna frekvencija tankog, unutarnjeg cilindra ovisi o atmosferskom tlaku. Princip rada temelji se na dovođenju unutarnjeg cilindra u rezonantno stanje te naknadnom očitavanju promjena u rezonantnoj frekvenciji nastalih uslijed promjena atmosferskog tlaka pomoću piezoelektričnog elementa. Na temelju očitanih promjena može se očitati i promjena atmosferskog tlaka. Treba uzeti u obzir i utjecaj temperaturne promjene koja se ispravlja postavljanjem temperaturnog senzora unutar instrumenta.



Slika 16. Barometar s cilindričnim rezonatorom [7]

3.3.3.2 Barometar sa silicijskim kapacitivnim osjetnikom [7]

Senzor tlaka ovog tipa barometara svega je nekoliko milimetara velik. Sastoji se od silicijske oblatne, silicijskog čipa koji služi kao podloga i izolirajuće staklene ploče. Silicijska oblatna formira jednu elektrodu i silicijsku membranu, a silicijski čip formira drugu. Između silicijske membrane i staklene ploče nalazi se vakuumska praznina. Prilikom promjena atmosferskog tlaka deformira se silicijska membrana te se time mijenja i volumen vakuumske praznine na čijim se suprotnim stranama nalaze elektrode. One promjenu volumena detektiraju u obliku promjene elektrostatskog kapaciteta koja se mjeri i pretvara u vrijednost atmosferskog tlaka. Ovi barometri očituju se visokom preciznošću i dugotrajnošću. Slika 7. prikazuje shemu ovog tipa barometra:



Slika 17. Shema barometra sa silicijskim kapacitivnim osjetnikom [7]

4. UMJERAVANJE MJERILA TLAKA

Umjeravanje, kalibriranje ili baždarenje je naziv za skupinu postupaka koji u određenim uvjetima uspostavljaju odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neki mjerni sustav ili mjerilo i vrijednosti koje su ostvarene etalonima. Ipak, postavlja se pitanje koliko se uopće može vjerovati vrijednostima etalona prema kojem se ravnamo prilikom umjeravanja? Rješenje ovog problema nalazi se u pojmu mjerne sljedivosti-svojstva vrijednosti ili mjernog rezultata etalona kojim se on dovodi u vezu s referentnim etalonima (najčešće međunarodni ili državni) neprekinutim lancem usporedbi s utvrđenim nesigurnostima. Umjeravanje se vrši da bi se:

- uspostavila i prikazala sljedivost
- osiguralo sukladnost rezultata mjerenja s drugim mjerenjima
- odredila točnost očitanih rezultata mjernog instrumenta
- utvrdila pouzdanost mjernog instrumenta

4.1 Mjerna nesigurnost

Rezultat mjerenja nije potpun bez uzimanja u obzir i mjerne nesigurnosti. Mjerna nesigurnost je parametar pridružen rezultatu mjerenja. Ona označuje rasipanje vrijednosti koje se smije pripisati mjernoj veličini te izražava sumnju u sami rezultat nekog mjerenja. Ako želimo kvantificirati mjernu nesigurnost potrebno je poznavati dvije vrijednosti [6]:

- interval nesigurnosti ili njegovu širinu
- nivo pouzdanosti koji iskazuje sigurnost u točnost same vrijednosti u intervalu nesigurnosti

Izvori grešaka, a time i mjerne nesigurnosti u mjerenju:

- okolišni uvjeti (temperatura i vlaga)
- tip mjerne metode te njene pretpostavke i aproksimacije
- vještina i pristranost mjeritelja
- nereprezentativnost uzorkovanja
- neispravnosti mjernih instrumenata (trošenje, šumovi, itd.)
- mjerne nesigurnosti instrumenata koji se koriste za mjerenje
- mjerena veličina (nestabilnost, slaba ponovljivost, itd.)
- vjerodostojnost referentnih tvari i mjernih etalona

Neovisno o izvoru mjerne nesigurnost, one se procjenjuju na dva načina: metoda procjene „tipa A“ i metoda procjene „tipa B“. Većina mjerenja zahtijeva korištenje obje metode procjene mjerne nesigurnosti.

4.1.1 Procjena mjerne nesigurnosti tipa A [6]

Procjene tipa A koriste statistiku dobivenu iz učestalog ponavljanja mjerenja bez kojeg se ova metoda ne može koristiti. Prethodno računanju kombinirane mjerne nesigurnosti potrebno je podatke dobivene iz svih izvora svesti na standardnu nesigurnost (u) kako ne bi došlo do zabune. Standardna nesigurnost za ovu metodu mjerenja računa se iz standardne devijacije za sve rezultate mjerenja. Obrada podataka vrši se posredstvom Gaussove ili normalne razdiobe u kojoj su podaci grupirani oko srednje vrijednosti, a udaljavanjem od srednje vrijednosti smanjuje se i učestalost njihova pojavljivanja. Jednadžbe za izračun mjerne nesigurnosti ovom metodom:

- srednja vrijednost:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{i,k} \quad (7)$$

- eksperimentalna standardna devijacija:

$$s(\bar{x}_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad (8)$$

- eksperimentalno standardno odstupanje srednje vrijednosti:

$$s(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

$$u_A = s(\bar{x}_i) \quad (10)$$

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (11)$$

4.1.2 Procjena mjerne nesigurnosti tipa B [6]

Procjena tipa B ne temelji se na statistici, nego na nekim drugim informacijama iz vanjskih umjerenica, proračuna, proizvođačkih specifikacija ili izvora koji su objavljeni. Može biti temeljena i na zdravom razumu i prethodnom iskustvu. Ukoliko se radi o vanjskim umjerenicama u kojima je mjerna nesigurnost izražena u obliku proširene nesigurnosti, moramo dijeliti s faktorom pokrivanja. Prilikom korištenja ove metode, poznat nam je isključivo interval nesigurnosti u kojem se najvjerojatnije nalazi točna vrijednost. Ovakva razdioba je pravokutna te se standardna nesigurnost računa iz formule (12):

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

4.2 EURAMET

EURAMET je udruženje Europske udruge za slobodnu trgovinu i nacionalnih organizacija za mjerenje država članica EU. Osnovan je u siječnju 2007. godine. Glavni cilj je postizanje usklađivanja u radu i suradnji nacionalnih mjeriteljskih instituta te razvoj i održavanje integrirane mjeriteljske infrastrukture na području Europe, a da se pritom ne zanemare potrebe poslovanja i industrije država članica. Inzistira na korištenju tehničkih vodiča i vodiča za umjeravanje od strane drugih organizacija (regionalne mjeriteljske organizacije, Nacionalni mjeriteljski institut, itd.) u svrhu usklađivanja tehničkih postupaka u području mjerenja.

4.2.1 Umjeravanje elektromehaničkih i mehaničkih manometara

Na ovaj način umjeravaju se tri tipa elektromehaničkih manometara (tlačni transmiteri, tlačni pretvornici i manometri s analognim ili digitalnim pokazivačem) te Bourdonove cijevi, koje spadaju u mehaničke manometre. Proces umjeravanja bi trebao omogućiti, ovisno o zahtjevima, procjenu histereze, linearnosti i ponavljanja instrumenta koji se umjerava. Umjeravanje se provodi u ravnomjerno raspoređenim točkama između graničnih točaka tlaka te uključuje i instalaciju opreme i odabir metode umjeravanja. Referentni etalon mora zadovoljavati nacionalne ili internacionalne standarde, te bi trebao imati barem dvostruko manju mjernu nesigurnost od umjeravanog instrumenta. Usporedba rezultata mjerenja instrumenta koji se umjerava i referentnog etalona se može izvršiti na dva načina [8]:

- podešavanje tlaka prema vrijednostima očitanim s instrumenta koji se umjerava
- podešavanje tlaka prema vrijednostima očitanim s referentnog etalona

Tri su osnovne metode umjeravanja [8]:

1. Osnovna metoda
2. Standardna metoda
3. Opsežna metoda

4.2.1.1 Osnovna metoda

Koristi se kod instrumenata kojima je proširena mjerna nesigurnost veća od, ili jednaka 0,2% ukupne mjerne skale [8]. Umjeravanje se odrađuje u jednom mjernom ciklusu, u šest različitih točaka koje se sastoje od nizova povećanja i smanjenja tlaka. Procjena ponovljivosti se vrši na

temelju umjeravanja tako što se tri puta ponavlja mjerenje porasta tlaka u dvije točke. Preporuča se da je jedna na početku mjerne skale (0%), a druga točka otprilike na polovici mjerne skale (40-60%). Vrijednost ponovljivosti se onda primjenjuje i na ostale točke.

4.2.1.2 Standardna metoda

Koristi se kod instrumenata kojima je proširena mjerna nesigurnost veća od, ili jednaka 0,05%, a manja od 0,2% mjerne skale [8]. Za razliku od prethodne metode, umjeravanje se provodi u jednom mjernom ciklusu u jedanaest različitih točaka koje se sastoje od nizova povećanja i smanjenja tlaka. Ponovljivost se procjenjuje na temelju umjeravanja tako što se tri puta ponavlja mjerenje porasta tlaka u četiri točke (preporuča se na 0%, 20%, 50% i 80% ukupne mjerne skale).

4.2.1.3 Opsežna metoda

Koristi se kod instrumenata kojima je proširena mjerna nesigurnost manja od 0,05% ukupne mjerne skale [8]. Umjeravanje se provodi u tri mjerna ciklusa. Svaki sadrži 11 različitih točaka koje se sastoje od nizova povećanja i smanjenja tlaka.

4.2.2 Umjeravanje tlačnih vaga

Ovaj način umjeravanja odnosi se i na hidrauličke i na plinske tlačne vage. Da bi umjeravanje počelo, tlačna vaga mora se nalaziti u zadovoljavajućim radnim uvjetima [9]:

1. Prostor u kojem se vrši mjerenje - temperatura prostora mora se nalaziti između 15°C i 25°C, s maksimalnim oscilacijama od 2°C. Kako bi se postigla što niža mjerna nesigurnost (0,01%), trebala bi se mjeriti i temperatura sklopa klip-cilindara. Mora se kontrolirati i protok zraka.
2. Montaža instrumenta - instrument se postavlja podalje od izvora nestabilnosti u zraku (klima uređaji, ventilacija, itd.). Umjeravani instrument treba biti postavljen što bliže referentnom etalonu, a visinska razlika među njima treba biti minimalna. Cjevovod treba biti što kraći i širi, a treba se i osigurati njegova čistoća. Potrebno je i instalirati prikladan sustav odvodnje te sustav za mjerenje temperature. Podloga na kojoj se vrši mjerenje mora biti kruta i stabilna, sa provjerenom horizontalnošću.
3. Održavanje tlaka - kod plinskih tlačnih vaga potrebno je koristiti čist i suh plin na temperaturi bliskoj okolišnoj. Sustav cijevi, kao i pumpe, mora biti iznimno čist, te se u slučaju korištenja apsolutnih vagi treba mjeriti i osigurati minimalni preostali tlak. Kod hidrauličkih vaga potrebno je koristiti tekućinu koji propisuje proizvođač. Cijevi također moraju biti očišćene.

4. Referentni etalon - za umjeravanje tlačne vage najčešće se koristi druga tlačna vaga, iako se za tlakove niže od 300 kPa može koristiti i živin barometar. Etalon mora zadovoljavati nacionalni standard i mora imati priznati certifikat o umjeravanju. Mjerna nesigurnost etalona mora biti niža od one umjeravanog instrumenta.

5. Priprema tlačne vage - kako bi se postigla toplinska ravnoteža, tlačna vaga mora biti u laboratoriju barem 12 sati prije nego umjeravanje počne. Potrebna je provjera nečistoća u ulju te zamjena ulja u slučaju nedovoljne čistoće. Provjerava se pokretljivost, brzina spuštanja klipa te oštećenja i korozija na cijelom sklopu. Tlačna vaga povezuje se s referentnim etalom i definira se referentna početna točka za oba instrumenta (najčešće zadana od strane proizvođača). U svrhu eliminiranja vodene pare ispod zvona, kod apsolutnih tlačnih vaga pumpa se uključuje 30 minuta prije početka mjerenja.

Prilikom umjeravanja tlačnih vaga koriste se dvije osnovne metode mjerenja-metoda A i metoda B [9].

Osnovni cilj metode A je utvrditi pogrešku zbog pristranosti i ponovljivost umjeravane tlačne vage. To se ostvaruje utvrđivanjem iznosa umjetno dovedenog tlaka preko mase utega koji opterećuju klip. Masa instrumenta koji se kalibrira može se, ali i ne mora mjeriti. Provode se najmanje tri niza mjerenja. Svaki niz mjerenja se odvija na tlakovima koje određuju mase utega. Ne koristi se kod mjerenja koja zahtijevaju nisku mjernu nesigurnost.

Metoda B bavi se utvrđivanjem [9]:

- iznosa mase utega te klipa tlačne vage (ako je može ukloniti)
- ponovljivosti kao funkcije mjerenog tlaka
- efektivne površine A_{ef} kao funkcije mjerenog tlaka koja se pri visokim tlakovima može izraziti preko efektivne površine pri početnom tlaku A_0 i koeficijenta deformacije zbog tlaka

4.3 DKD [10]

Deutscher Kalibrierdienst ili Njemačka služba za umjeravanje je tijelo osnovano 1977. godine čije smjernice i upute koristi Njemačko akreditacijsko tijelo (DAkkS) za akreditaciju laboratorija za umjeravanje. DKD je zaslužan za izdavanje priručnika DKD-R 6-1 koji opisuje i daje smjernice za različite postupke koje trebaju poštivati akreditirani laboratoriji za umjeravanje. Najznačajnije stavke se odnose na procjenu mjerne nesigurnosti i na minimalne zahtjeve za provođenje umjeravanja. U priručniku su navedene i objašnjene metode umjeravanja

Bourdonovih cijevi, pretvornika tlaka s električnim izlazom te električnih mjerila tlaka. Akreditacijski certifikati izdani od strane ovih tijela dokazuju poštivanje nacionalnih standarda koji se vode normama DIN EN ISO 9000 i DIN EN ISO/IEC 1702. Glavni zadatak Njemačke službe za umjeravanje je promidžba umjeravanja preko širenja jedinica, a prvenstveno se promovira razmjena informacija među članovima te razvijanje uputa za umjeravanje. Ovi ciljevi se ostvaruju :

- informiranjem članova o aktualnim događanjima na području umjeravanja
- aktivnim sudjelovanjem članova u sastavljanju kalibracijskih propisa
- prisustvovanjem na okupljanjima Njemačkog akreditacijskog tijela
- objavljivanjem dokumenata od strane članova
- objavom aktivnosti DKD-a za javnost
- promoviranje tečajeva te edukacija za zaposlene na području umjeravanja
- poticanje međulaboratorijskih uspoređivanja

Mjerenja se odvijaju pri standardnim uvjetima koji podrazumijevaju tlak od jednog bara, temperaturu od 20°C i normalnu gravitaciju, a referentni etalon je mora odobren od strane akreditacijskog tijela. Sposobnost laboratorija za umjeravanje se provjerava funkcionalnim testovima (ispitivanje električne operativnosti, propusne debljine sustava linije predmeta koji se umjerava, pravilnog funkcioniranja elemenata za upravljanje, itd.) te vanjskim inspekcijama (provjera čistoće i zagađenja te dokumenata za umjeravanje, pregled oštećenja i nepravilnosti, itd.). Tek kada se izjednače temperature umjeravanog instrumenta i etalona u okviru dozvoljenog temperaturnog raspona (18°C do 28°C), umjeravanje može početi. Ono se mora odvijati u području stabilne temperature s maksimalnim oscilacijama od 1°C.

4.3.1 Metode umjeravanja

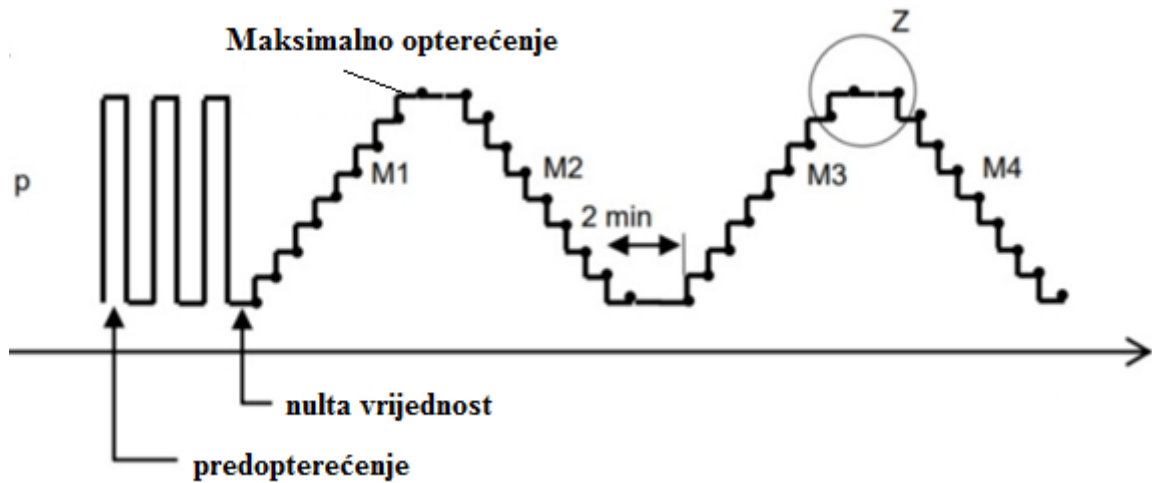
Umjeravanje bi se trebalo provesti po jednoliko raspoređenim mjernim točkama kroz mjernu raspon, a ukoliko je moguće, mjerni instrument trebao bi se umjeravati u cjelini. Treba pripaziti i na položaj ugradnje. Najmanje jedan, a po potrebi i više nizova mjerenja se provodi, ovisno o željenom iznosu mjerne nesigurnosti. Ako ponašanje instrumenta, s obzirom na utjecaj momenta, nije poznato prilikom ugradnje, ponovljivost se određuje dodatnim stezanjem, a vrijednost momenta mora se dokumentirati. Također, bitno je minimalizirati visinsku razliku između umjeravanog instrumenta i referentnog etalona ako ne želimo uvoditi dodatne korekcije. Rezultati mjerenja referentnog etalona i umjeravanog instrumenta mogu se usporediti na dva načina:

- podešavanjem tlaka prema naznaci umjeravanog instrumenta
- podešavanjem tlaka prema naznaci referentnog etalona

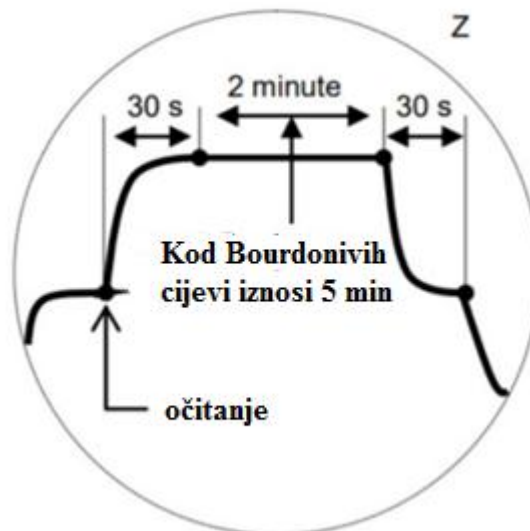
Minimalno 30 sekundi treba proći između dva predopterećenja, a toliko bi trebalo iznositi i vrijeme predopterećenja kod najviše vrijednosti. Naknadno predopterećenju i postizanju prihvatljivih radnih uvjeta, indikacija umjeravanog instrumenta postavlja se u nultu vrijednost te se odmah provodi očitavanje početne mjerne točke. Vremenski period između dva uzastopna opterećenja je konstantan i minimalno 30 sekundi dugačak, a očitavanje vrijednosti tlaka također se izvršava minimalno 30 sekundi nakon što se tlak počeo mijenjati. Gornju vrijednost mjernog raspona se očitava dva puta, prije i poslije faze čekanja jer ona označava završetak uzlazne i početak silazne serije. Očitavanje nulte vrijednosti na kraju mjerenja se provodi minimalno 30 sekundi nakon potpunog rasterećenja. Postoje tri glavne metode umjeravanja po ovom priručniku: metoda A, metoda B i metoda C. Prikaz osnovnih parametara ove tri metode dan je u tablici 4:

Tablica 1. Osnovne metode umjeravanja prema DKD-R 6-1 [10]

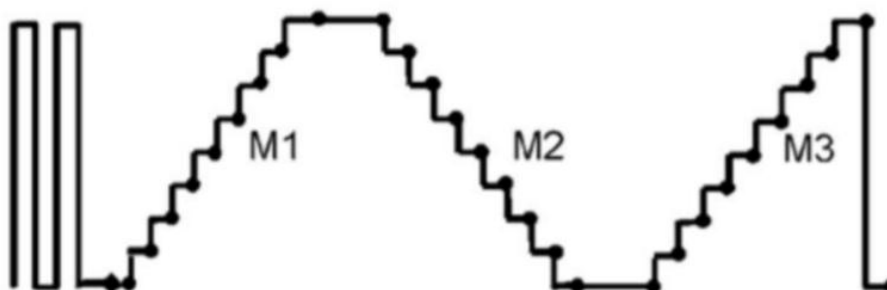
Metoda	Broj predopterećenja	Minimalan broj mjernih točaka (s nulom)	Mjerna nesigurnost (% mjernog raspona)	Trajanje promjene opterećenja i faze čekanja (s)	Trajanje faze čekanja u gornjoj točki mjernog raspona (min)	Broj mjernih nizova	
						Uzlazno	Silazno
A	3	9	< 0,1	> 30	2	2	2
B	2	9	0,1...0,6	> 30	2	2	1
C	1	5	> 0,6	> 30	2	1	1



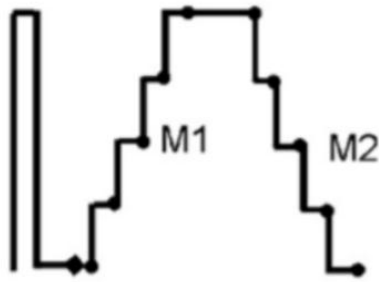
Slika 18. Shematski prikaz metode A [10]



Slika 19. Detaljni prikaz segmenta metode A [10]



Slika 20. Shematski prikaz metode B [10]



Slika 21. Shematski prikaz metode C [10]

Vremensko trajanje metode je obrnuto proporcionalno postignutoj mjernoj nesigurnosti. Metoda C je najkraća, ali raspolaže najvećom mjernom nesigurnošću. Metoda A je vremenski najduža, ali se postiže i najmanja mjerna nesigurnost. Metoda B se po spomenutim parametrima nalazi između metode A i metode C.

Nakon umjeravanja, svi glavni dijelovi mjernog instrumenta dobivaju kalibracijsku oznaku, a kalibracijski certifikat mora sadržavati tablicu s rezultatima mjerenja te informacije o:

- metodi umjeravanja (A, B ili C)
- postignutoj mjernoj nesigurnosti
- mediju kojim se prenosi tlak
- referentnoj ravnini tlaka na instrumentu
- ugradbenom položaju prilikom umjeravanja
- odabranim postavkama na instrumentu

5. NORME I UPUTE ZA PROVEDBU MEĐULABORATORIJSKIH USPOREBI

Uz uključivanje u vanjske programe procjenjivanja kvalitete, međulaboratorijska ispitivanja i usporedbe koristimo u svrhu praćenja ispravnosti mjernih rezultata i samih mjernih instrumenata nekoga laboratorija. Međulaboratorijska usporedba uključuje organiziranje, provedbu i vrednovanje mjerenja ili ispitivanja sličnih ili istih predmeta ispitivanja u najmanje dva laboratorija prema definiranim uvjetima.

5.1 Upute EURAMET-a

EURAMET-ov pravilnik sadrži detaljne podatke o planiranju, pokretanju i provedbi međulaboratorijskih usporedbi unutar samoga EURAMET-a, kao i podatke o usklađivanju kriterija među različitim tehničkim odborima. Potrebno ga je koristiti zajedno s dokumentom CIPM MRA-D-05 [12], izdanim od strane Međunarodnog odbora za mjere i utege, prema kojem postoje tri osnovne vrste usporedbi koje se mogu vršiti na međunarodnoj ili regionalnoj razini [11]:

- ključne usporedbe
- dodatne usporedbe
- pilot-studije

Ključne usporedbe su najopširnije i postižu najvišu razinu kvalitete. Ove su usporedbe u nadležnosti savjetodavnog odbora te se koriste za ispitivanje glavnih metoda i tehnika u praksi. Ukoliko neki od instituta smatra da rezultati ključne usporedbe nisu vjerodostojni prikaz njihovih standarda, može zatražiti provođenje dodatnih, bilateralnih usporedbi s pilot-laboratorijem ili jednim od sudionika, te se one provode u što kraćem vremenskom roku nakon obavljenih ključnih usporedbi. Dodatne usporedbe provode regionalne metrološke organizacije u svrhu zadovoljavanja specifičnih zahtjeva i potreba koje nisu dio ključnih usporedbi. Dodatne se usporedbe tako mogu koristiti za uključivanje laboratorija koji ne zadovoljavaju potrebne uvjete za sudjelovanje u ključnim usporedbama. Pilot studije postižu najnižu razinu kvalitete i koriste za ispitivanje novijih instrumenata ili u svrhu obuke.

5.1.1 Pilot-laboratorij

Za izvođenje međulaboratorijske usporedbe opisane u ovom radu, ulogu pilot-laboratorija imao je LPM. Pilot-laboratorij izvodi koordinaciju cijele međulaboratorijske usporedbe, a zadaće koje mora obaviti su sljedeće [11]:

- odrediti sudionike
- izrađivanje tehničkog protokola u dogovoru s tehničkim odborom i sudionicima
- priprema prijenosnog etalona te njegov transport među sudionicima
- priprema registracije usporedbe za bazu podataka EURAMET-a
- usporedba rezultata mjerenja svih sudionika
- konzultacije s tehničkim odborom (ako dođe do nekih problema)
- priprema izvješća na godišnjoj razini
- procjena usporedbe
- izrada, priprema i objava konačnog izvještaja

5.1.2 Protokol i priprema za usporedbu

Važan dio svake međulaboratorijske usporedbe predstavlja tehnički protokol kojeg bi trebali poštivati svi sudionici s ciljem olakšanja samog procesa. Za njegovo sastavljanje zadužen je pilot-laboratorij. Prema EURAMET-ovim uputama trebao bi sadržavati [11]:

- kratki uvod i precizno definirane veličine koje se mjere
- opisanu shemu usporedbe
- definiran vremenski period održavanja usporedbe i dogovora oko rezultata
- opis prijenosnog uređaja
- preporuke za organizaciju i izvođenje transporta prijenosnog uređaja
- definiciju mjerne metode, točaka i uvjeta umjeravanja
- rezultate usporedbe
- popis glavnih uzroka mjerne nesigurnosti
- princip procjene rezultata i definiranu vezu s vrijednostima etalona
- definirane troškove
- literaturu, ako je korištena

5.1.3 Objava usporedbe

Prije nego se objavi, konačni izvještaj poprima prvo format nacrt A i nacrt B [11]. Pilot-laboratorij izrađuje nacrt A nakon zaprimanja rezultata mjerenja svih sudionika, te ima dva mjeseca za njegovu izradu. Sastoji se od rezultata mjerenja i početnog izračuna referentne vrijednosti ključne usporedbe. Do objave rezultata može doći samo ako niti jedan rezultata ne odstupa suviše od ostalih. Ukoliko se dogodi odstupanje nekoga od sudionika, isti nema pravo povući rezultate mjerenja ako ne postoji neki razlog koji nije povezan s izvođenjem u

laboratoriju. Pilot-laboratorij mora predložiti i oblik u kojem će rezultati biti objavljeni kada iste dostavlja ostalim sudionicima. Oni imaju na raspolaganju dva mjeseca da ocjene jesu li rezultati prihvatljivi. U trenutku kada su svi sudionici zadovoljni rezultatima, nacrt A poprima format nacrt B te ostaje u tom obliku dok ga ne odobri savjetodavni odbor. Jednom kada je dobio odobrenje, nacrt B postaje konačni izvještaj koji se šalje ostalim sudionicima i u konačnici objavljuje.

5.2 Hrvatska akreditacijska agencija (HAA)

Hrvatska akreditacijska agencija je nekomercijalna, neprofitna i neovisna javna ustanova čija je svrha obavljanje poslova nacionalne službe za akreditaciju u Republici Hrvatskoj, tj. provođenje hrvatskog tehničkog zakonodavstva koje je u skladu sa zakonodavstvom Europske unije. HAA vrši procjenu tehničke i stručne osposobljenosti laboratorija, inspekcijских i certifikacijskih tijela, verifikatora stakleničkih plinova, organizatora ispitivanja osobnosti itd. Akreditacija omogućuje međunarodno priznato dokazivanje osposobljenosti za procjenu sukladnosti u područjima umjeravanja, ispitivanja, inspekcije, verifikacije staklenički plinova te organiziranja ispitivanja sposobnosti. HAA je predstavnik Republike Hrvatske u međunarodnim i europskim akreditacijskim organizacijama pa je tako punopravni član Europske zajednice za akreditaciju (EA) i Međunarodne organizacije za akreditaciju laboratorija (ILAC). Sudjeluje i u radu Međunarodnog akreditacijskog foruma (IAF).

Da bi se međulaboratorijska usporedba provodila prema pravilima i uputama HAA, laboratorij treba posjedovati dokumente o postupcima i politici osiguranja kvalitete rezultata, kao i definiran plan kontroliranja kvalitete koji se po potrebi može revidirati [13]. Potrebno je proučiti dostupnost shema međulaboratorijskih usporedbi te ih, u slučaju da su prikladne, provesti po unaprijed definiranom, vlastitom planu i programu kontrole kvalitete rezultata. Sve međulaboratorijske usporedbe moraju biti u skladu s normom HRN EN ISO/IEC 17043:2010, a zapisi o istima moraju sadržavati podatke o planiranju, statističkom dizajnu, izvještaju i ocjenjivanju. Kriteriji prihvatljivosti su određeni shemom ispitivanja sposobnosti [13]. Najčešće uključuju granične uvjete, a prilikom određivanja uspješnosti mjerenja koriste statističke metode. Ako rezultati mjerenja ne podliježu definiranim granicama, potrebno je istražiti i ispraviti uzrok nepravilnosti. Zahtjeva se i sudjelovanje različitog osoblja u različitim krugovima sheme ispitivanja sposobnost te, ukoliko je to moguće, u vremenskom periodu od pet godina trajanja jednog akreditacijskog ciklusa svaki bi član osoblja trebao svoje sposobnosti potvrditi sudjelovanjem u jednom od krugova. Prilikom prijave za prvu akreditaciju, laboratorij mora izvijestiti HAA o svim međulaboratorijskim usporedbama unatrag tri godine u području rada u

kojem se prijavljuje za akreditaciju. Izvještaj se oblikuje u Excelu koji je prikazan na slici 22., a ukoliko laboratorij nije sudjelovao u ranijim usporedbama, to se u izvještaju treba naglasiti [13].

Slika 22. Izvještaj za prijavu sudjelovanja u međulaboratorijskim usporedbama [13]

Potrebno je dostaviti i izvješće o mjerama osiguranja kvalitete rezultata. U slučaju pojave neispravnih rezultata prilikom izvođenja međulaboratorijske usporedbe, laboratorij je dužan to prijaviti HAA zajedno s postupcima koji će biti poduzeti kako bi se ispravile nepravilnosti. HAA tada može zahtijevati od laboratorija sudjelovanje u nekom od budućih krugova ispitivanja sposobnosti kako bi utvrdio stanje tehničke osposobljenosti laboratorija. Akreditacija se obavlja u skladu s međunarodnim (ISO,ISO/IEC) i europskim (EN) normama koje su u Republici Hrvatskoj prihvaćene kao hrvatske norme (HRN), a to su [13]:

1. *HRN EN ISO/IEC 17011:2017, Ocjena sukladnosti - Opći zahtjevi za akreditacijska tijela koja akreditiraju tijela za ocjenu sukladnosti*
2. *HRN EN ISO/IEC 17020:2012, Ocjenjivanje sukladnosti - Zahtjevi za rad različitih vrsta tijela koja provode inspekciju*
3. *HRN EN ISO/IEC 17025:2017, Opći zahtjevi za osposobljenosti ispitnih i umjernih laboratorija*

- 4. HRN EN ISO/IEC 17043:2010, Ocjenjivanje sukladnosti - Opći zahtjevi za ispitivanje sposobnosti*
- 5. HRN 5725-2:2020, Osnovna metoda određivanja ponovljivosti i obnovljivosti standardne mjerne metode*
- 6. HRN ISO 13528:2017, Statističke metode pri ispitivanju sposobnosti putem međulaboratorijskih usporedbi*
- 7. HRN EN ISTO 15189:2012, Medicinski laboratoriji - Zahtjevi za kvalitetu i osposobljenost*

6. OPIS PROVEDENIH MJERENJA

U sklopu ovog ciklusa međulaboratorijskih usporedbi sudjelovala su tri laboratorija: Laboratorij za procesna mjerenja (LPM) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, BMB laboratorij i laboratorij Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ-SOUL). Predmet umjeravanja bio je digitalni, kapacitivni barometar proizvođača Vaisala, prikazan na slici 23. Model barometra je PTB 330. Područje umjeravanja obuhvaćalo je donju granicu od 500 hPa i gornju granicu od 1100 hPa.



Slika 23. Digitalni barometar Vaisala, PTB330

6.1 Mjerenje u laboratoriju DHMZ-a

Laboratorij DHMZ-a postoji i djeluje još od 1947. godine i osnutka Hidrometeorološkog zavoda Hrvatske [15]. Iako su počeci bili vrlo skromni, ipak počinju prvi laboratorijski radovi i edukacija djelatnika za rad s meteorološkim instrumentima. Daljnjim razvojem, prioritet postaje nabava sofisticirane mjerne opreme i razvoj novih umjernih metoda. Tako je 2002. godine nabavljen primarni etalon za umjeravanje mjerila tlaka, tlačna vaga te primarni etalon s generatorom za umjeravanje mjerila prizemnog ozona. Nakon reorganizacije laboratorija s ciljem zadovoljavanja norme HRN EN ISO/IEC 17025, 2008. godine se poslovi vezani uz automatske meteorološke sustave prebacuju u drugu službu, a službeni naziv postaje Samostalni odjel za umjerni laboratorij (SOUL) [15]. SOUL se 2013. preimenuje u Samostalnu službu za umjerni laboratorij (zadržana kratica SOUL) s dva odjela: Odjel umjernog laboratorija za meteorološka i hidrološka mjerila i Odjel umjernog laboratorija za mjerila kvalitete zraka. Od 2012. godine

SOUL je i službeno umjerni laboratorij koji slijedi zahtjeve norme HRN EN ISO/IEC 17025, a od 2017. godine je i nositelj državnog etalona za koncentraciju ozona i plinskih mješavina. DHMZ-SOUL obavlja umjeravanja u akreditiranom i neakreditiranom području mjerila za zavodske potrebe i za potrebe različitih vanjskih korisnika. Osim mjerenja tlaka zraka, DHMZ-SOUL mjeri i relativnu vlažnost, brzinu strujanja, sunčevo zračenje, protok, koncentraciju ugljikovog monoksida u zraku, koncentraciju sumporovog dioksida u zraku...

Laboratorij DHMZ-a je u ovoj međulaboratorijskoj usporedbi imao ulogu umjeravanog laboratorija. Postupak umjeravanja odrađen je 26. i 27. 11. 2020. godine, u skladu s metodom EURAMET cg17/v4, odnosno u 6 nizova po 11 točaka. Kao referentni uređaj korištena je tlačna vaga proizvođača Ruska, prikazana na slici 24. Model tlačne vage je 2465A-754A. Predmet umjeravanja bio je postavljen u horizontalni položaj, a dušik iz plinskog cilindra poslužio je kao tlačni medij. U ovom se laboratoriju tražena masa utega, tj. kombinacija utega različitih masa koju je potrebno montirati na klip tlačne vage, računa softverski, dok se u LPM-u računa ručno.



Slika 24. Tlačna vaga Ruska, 2465A-754A

Zajedno s tlačnog vagom, korišteni su i vakuum senzor te kontroler kao referentni uređaji koji su umjereni u akreditiranim laboratorijima. Podaci o referentnim uređajima prikazani su tablicom 2.

Tablica 2. Referentni uređaji

Referentni uređaj	Proizvođač	Model	Sljedivost
Tlačna vaga	Ruska	2465A-754A	SA-LK-012
Kontroler	Ruska	2465A-201A	SA-LK-012
Vakuuum senzor	Teledyne	AVC	SA-LK-012

Prilikom izvođenja mjerenja i rukovanja opremom, potrebno je nositi rukavice kako ne bi došlo do nepotrebnih odstupanja. Okolišni uvjeti laboratorija DHMZ-a dani su tablicom 3.

Tablica 3. Okolišni uvjeti u laboratoriju DHMZ-a

Temperatura zraka (°C)	20,3 - 22,2
Relativna vlažnost zraka (%)	24 - 32
Tlak zraka (hPa)	1010 - 1012

6.1.1 Rezultati mjerenja u laboratoriju DHMZ-a

Rezultati mjerenja u laboratoriju DHMZ-a prikazani su tablicom 4. koja sadrži vrijednosti izmjerenog tlaka referentnog i ispitivanog uređaja, odstupanje i mjernu nesigurnost. Prikazana proširena mjerna nesigurnost iskazana je kao standardna mjerna nesigurnost pomnožena faktorom pokrivanja k , tako da vjerojatnosti pokrivanja odgovara približno 95%. Standardna mjerna nesigurnost određena je publikacijom ILAC-P14 (01/2013).

Tablica 4. Rezultati mjerenja u laboratoriju DHMZ-a

Br.	Mjerna točka (hPa)	Referentni uređaj (hPa)	Umjeravani uređaj (hPa)	Mjerni odmak (hPa)	Mjerna nesigurnost
	-	p_e	M	$M - p_e$	U
1	520,000	518,010	518,400	0,390	0,080
2	560,000	558,900	559,280	0,380	0,080
3	620,000	617,340	617,690	0,350	0,080
4	680,000	678,690	679,010	0,320	0,090
5	740,000	740,030	740,330	0,300	0,090
6	800,000	798,470	798,750	0,280	0,090
7	860,000	859,820	860,080	0,260	0,100
8	920,000	918,250	918,490	0,240	0,100
9	980,000	979,600	979,830	0,230	0,100
10	1040,000	1038,030	1038,240	0,210	0,110
11	1080,000	1078,930	1079,130	0,200	0,110

6.2 Mjerenje u BMB laboratoriju

BMB laboratorij osnovan je 1987. godine kada postaje prvi privatni laboratorij na području Hrvatske [16]. Od početka je bio registriran kao Ovlašteni laboratorij tadašnjeg Saveznog zavoda za mjere i dragocjene kovine Beograd sa Zakonom o mjernim jedinicama i mjerilima, a kasnije postaje i ovlašteni servis novonastalog Državnog zavoda za normizaciju i mjeriteljstvo (DZNM). Odlukom HAA o dodjeljivanju akreditacije prema normi HRN EN ISO/IEC 17025, BMB

laboratorij 2010. godine postaje akreditirani umjerni laboratorij za umjeravanje temperature i mjerila tlaka, a 2014. godine i relativne vlažnosti [16].

Kao i DHMZ-SOUL, BMB laboratorij imao je ulogu umjeravanog laboratorija. Postupak umjeravanja odrađen je 9.12.2020. godine prema odobrenom postupku UP13 Umjeravanje mjerila tlaka sukladnom Uputi DKD-R 6-1. Kao referentni uređaj korišten je drugi digitalni barometar Vaisala, PTB 330, umjeren u FINAS K008 laboratoriju. Umjeravani barometar bio je postavljen horizontalno, a referentna razina nalazila mu se na priključku. Zrak je korišten kao tlačni medij. Za razliku od DHMZ-SOUL-a i LPM-a, u BMB laboratoriju mjerna se točka namješta ručno, a ne pomoću mase utega i izjednačavanja sila na površinu.



Slika 25. Ručno namještanje mjerne točke



Slika 26. Referentni uređaj (lijevo) i umjeravani uređaj (desno)

Tablica 5. Okolišni uvjeti u BMB laboratoriju

Temperatura zraka (°C)	21,4
Relativna vlažnost (%)	39,4
Tlak zraka (hPa)	992,2

6.2.1 Rezultati mjerenja u BMB laboratoriju

Nesigurnost navedena u tablici je proširena mjerna nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju ($k=2$), tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95%. Umjeravanje je izvedeno korištenjem metode B umjeravanja sukladno Uputi DKD-R 6-1 u mjernim točkama 520, 620, 740, 860, 980 i 1080 hPa.

Tablica 6. Izmjerene vrijednosti u BMB laboratoriju

Br.	Mjerna točka (hPa)	Referentni uređaj (hPa)	Umjeravani uređaj (hPa)		
			Uzlazno	Silazno	Uzlazno
	-	p_e	$M1$	$M2$	$M3$
1	520,000	519,980	520,300	520,300	520,300
2	620,000	619,980	620,270	620,270	620,270
3	740,000	739,960	740,210	740,210	740,220
4	860,000	859,960	860,170	860,180	860,180
5	980,000	980,160	980,160	980,160	980,170
6	1080,000	1080,130	1080,130	1080,130	1080,130

Tablica 7. Izračunate vrijednosti u BMB laboratoriju

Br.	Mjerna točka (hPa)	Referentni uređaj (hPa)	Srednja vrijednost (hPa)	Mjerni odmak (hPa)	Histereza h (hPa)	Ponovljivosti b (hPa)	Mjerna nesigurnost (hPa)
	-	p_e	M_{sr}	$M_{sr} - p_e$	$M2 - M1$	$M3 - M1$	U
1	520,000	519,980	520,300	0,320	0,000	0,000	0,100
2	620,000	619,980	620,270	0,290	0,000	0,000	0,100
3	740,000	739,960	740,220	0,260	-0,010	0,000	0,100
4	860,000	859,960	860,180	0,220	0,010	0,010	0,100
5	980,000	980,160	980,160	0,170	0,000	0,010	0,100
6	1080,00	1080,130	1080,130	0,140	0,000	0,000	0,100

6.3 Mjerenje u LPM-u

Laboratorij za procesna mjerenja (LPM) nalazi se na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu (FSB). LPM ima više od 50 godina iskustva u znanstvenom, nastavnom i stručnom radu vezanom za teoretska i praktična znanja o mjerenju toplinskih i procesnih veličina kao što su temperatura, tlak, vlažnost, protok... LPM je nositelj državnih etalona za tlak, vlažnost i temperaturu Hrvatskog mjeriteljskog instituta [17], a od 2002. godine i službeno je akreditirani umjerni laboratorij prema normi HRN EN ISO/IEC 17025. Rad laboratorija odlikovan je vrhunskom stručnom spremom djelatnika koji su znanje stekli na brojnim stručnim i znanstvenim usavršavanjima u inozemstvu i sudjelovali u brojnim znanstvenim i stručnim radovima. Osim što

je opremljen najmodernijom mjernom i računalnom opremom, LPM aktivno sudjeluje i u edukaciji mladih kadrova FSB-a.

LPM je sudjelovao u dvije međulaboratorijske usporedbe na europskoj razini u skorije vrijeme. U periodu od 2011. do 2012. godine provedena je usporedba u području negativnog tlaka od -950 do 0 hPa (sudjelovalo 14 laboratorija) [18], a od 2009. do 2012. godine provedena je usporedba u području od 25 do 200 kPa (sudjelovala 23 laboratorija) [19]. Zbog toga što je uspoređivan s europskim etalonima, LPM je imao ulogu pilot-laboratorija u ovoj usporedbi. Umjeravanje je odrađeno 3.12.2020. godine prema internoj proceduri umjeravanja postupkom usporedbe CPTL-02, u skladu s Uputom DKD-R 6-1. Kao referentni uređaj korištena je tlačna vaga DHI interne oznake TLVAG-09, koja je umjerena u njemačkom nacionalnom metrološkom institutu naziva PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt). Umjeravani barometar bio je vertikalno položen prilikom umjeravanja, a kao tlačni medij korišten je dušik.



Slika 27. Tlačna vaga TLVAG-09

Tablica 8. Okolišni uvjeti u LPM-u

Temperatura zraka (°C)	27±1
Relativna vlažnost (%)	997±1
Tlak zraka (hPa)	22±2

6.3.1 Rezultati mjerenja u LPM-u

Umjeravanje u LPM-u obavljeno je metodom B umjeravanja sukladno Uputi DKD-R 6-1, a rezultati su prikazani tablicama 9. i 10. Proširena mjerna nesigurnost izračunata je na isti način kao i u BMB laboratoriju.

Tablica 9. Izmjerene vrijednosti u LPM-u

Br.	Mjerna točka (hPa)	Referentni uređaj (hPa)	Umjeravani uređaj (hPa)		
			Uzlazno	Silazno	Uzlazno
	-	p_e	$M1$	$M2$	$M3$
1	520,000	520,043	520,460	520,460	520,460
2	620,000	620,050	620,420	620,420	620,420
3	740,000	740,057	740,390	740,390	740,380
4	860,000	860,065	860,350	860,3600	860,350
5	980,000	980,075	980,330	980,330	980,330
6	1080,000	1080,082	1080,310	1080,310	1080,310

Tablica 10. Izračunate vrijednosti u LPM-u

Br.	Mjerna točka (hPa)	Referentni uređaj (hPa)	Srednja vrijednost (hPa)	Mjerni odmak (hPa)	Histereza h (hPa)	Ponovljivosti b (hPa)	Mjerna nesigurnost (hPa)
	-	p_e	M_{sr}	$M_{sr} - p_e$	$M2 - M1$	$M3 - M1$	U
1	520,000	520,0430	520,46	0,417	0,000	0,000	0,030
2	620,000	620,0500	620,420	0,370	0,000	0,000	0,035
3	740,000	740,0570	740,390	0,330	0,000	-0,010	0,042
4	860,000	860,0650	860,360	0,290	0,010	0,000	0,049
5	980,000	980,0750	980,330	0,255	0,000	0,000	0,055
6	1080,00	1080,0820	1080,310	0,228	0,000	0,000	0,061

7. ANALIZA REZULTATA MEĐULABORATORIJSKE USPOREDBE

Analiza rezultata međulaboratorijske usporedbe provodi se računanjem unaprijed definiranih kriterija prihvatljivosti koji podliježu dogovorenim graničnim vrijednostima. Najčešće korištena metoda analize uspoređuje izmjerene podatke i izračunate mjerne nesigurnosti sudionika s referentnim vrijednostima. Spomenuti postupak rezultira dobivanjem faktora slaganja E_n koji predstavlja kriterij prihvatljivosti korišten u ovoj međulaboratorijskoj usporedbi i definiran je jednadžbom (13):

$$E_n = \frac{|x_{LPM} - x_{lab}|}{\sqrt{(U_{lab}^2 + U_{LPM}^2)}}, \quad (13)$$

u kojoj x_{LPM} označava mjerni odmak LPM-a, x_{lab} označava mjerni odmak umjeravanog laboratorija (DHMZ-SOUL ili BMB laboratorij), a U_{lab} i U_{LPM} označavaju mjernu nesigurnost umjeravanog laboratorija, odnosno LPM-a. Granične vrijednosti E_n iznose:

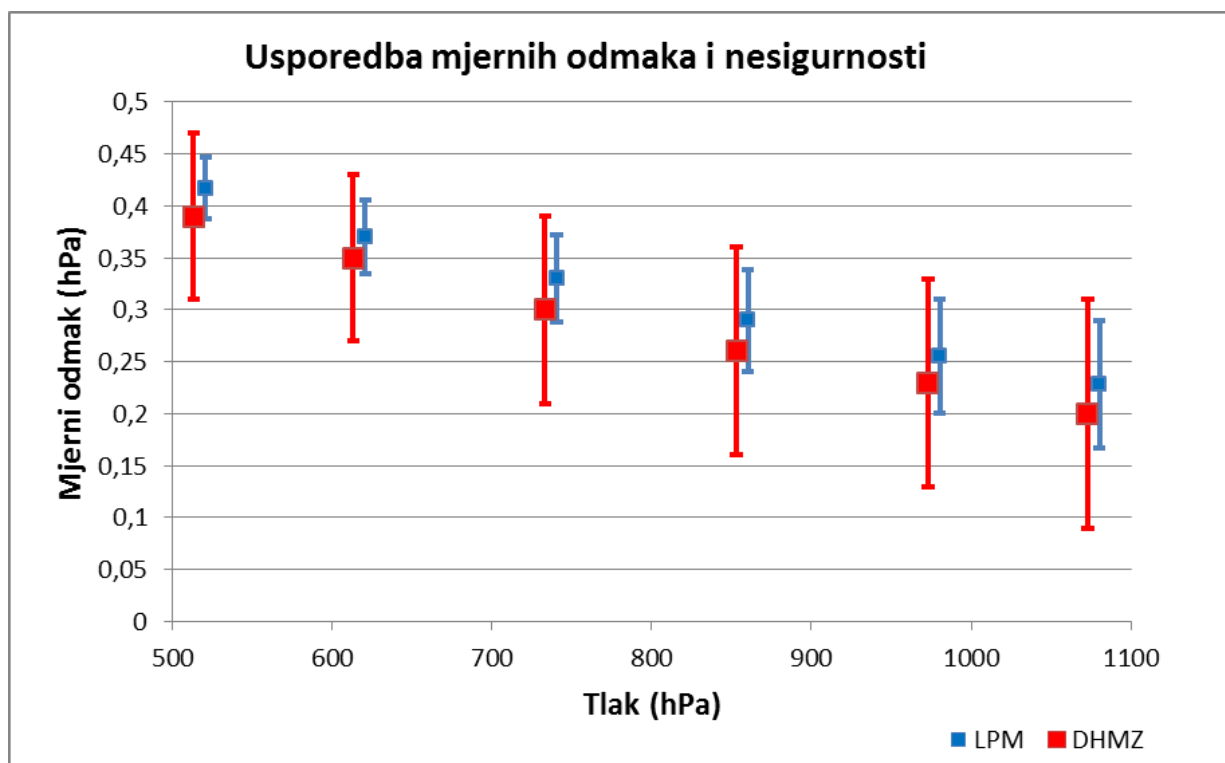
- $|E_n| \leq 1$ kriterij zadovoljava, u pravilu nisu potrebne korekcije
- $|E_n| > 1$ kriterij ne zadovoljava, potrebne korekcije

7.1 Usporedba LPM-a i laboratorija DHMZ-a

Tablica 11. Usporedba rezultata LPM-a i laboratorija DHMZ-a

Br.	Mjerna točka (hPa)	Mjerni odmak (LPM) (hPa)	Mjerni odmak (DHMZ) (hPa)	Mjerna nesigurnost (LPM) (hPa)	Mjerna nesigurnost (DHMZ) (hPa)	Faktor slaganja (-)
	-	$(M_{sr} - p_e)_{LPM}$	$(M_{sr} - p_e)_{DHMZ}$	U_{LPM}	U_{DHMZ}	E_n
1	520,000	0,417	0,390	0,030	0,080	0,316
2	620,000	0,370	0,350	0,035	0,080	0,229
3	740,000	0,330	0,300	0,042	0,090	0,302
4	860,000	0,290	0,260	0,049	0,100	0,269
5	980,000	0,255	0,230	0,055	0,100	0,219
6	1080,000	0,228	0,200	0,061	0,110	0,223

Iz tablice 11. vidljivo je da je faktor slaganja E_n u svim mjernim točkama manji od 1 pa je kriterij prihvatljivosti zadovoljio granične uvjete te nisu potrebne korekcije.



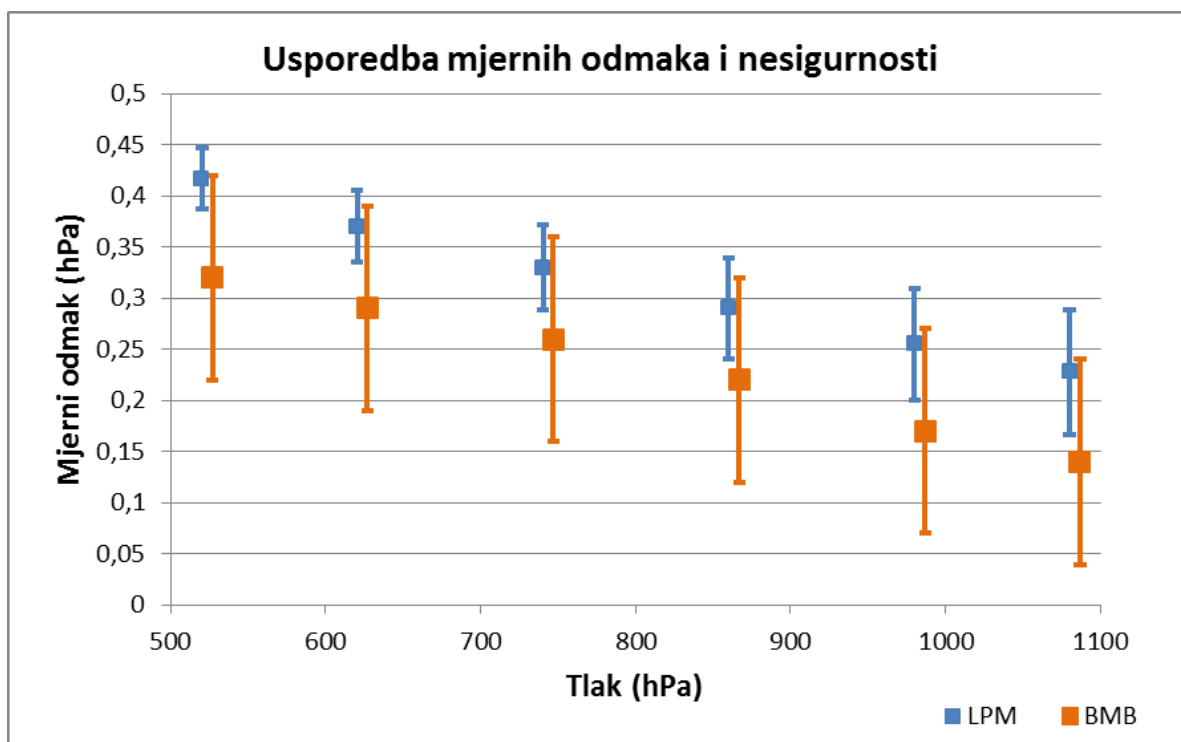
Slika 28. Grafički prikaz usporedbe LPM-a i laboratorija DHMZ-a

7.2 Usporedba LPM-a i BMB laboratorija

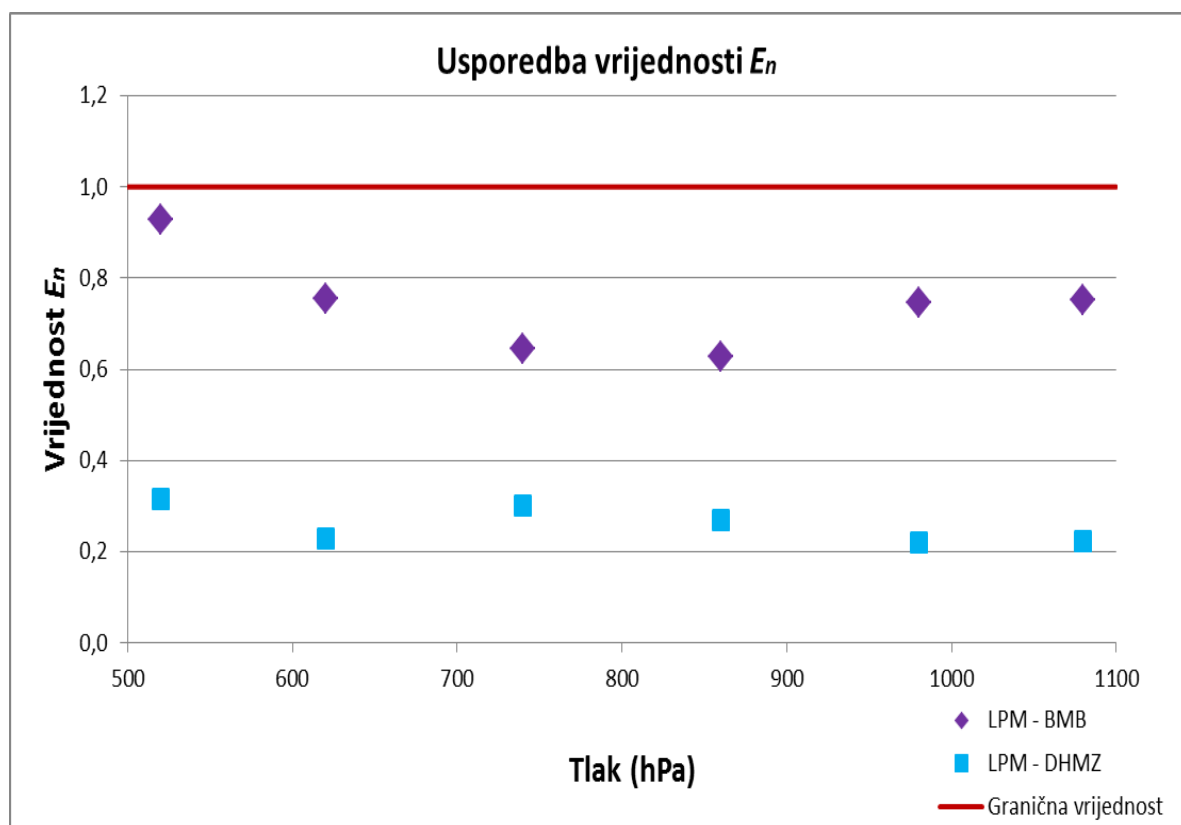
Tablica 12. Usporedba rezultata LPM-a i BMB laboratorija

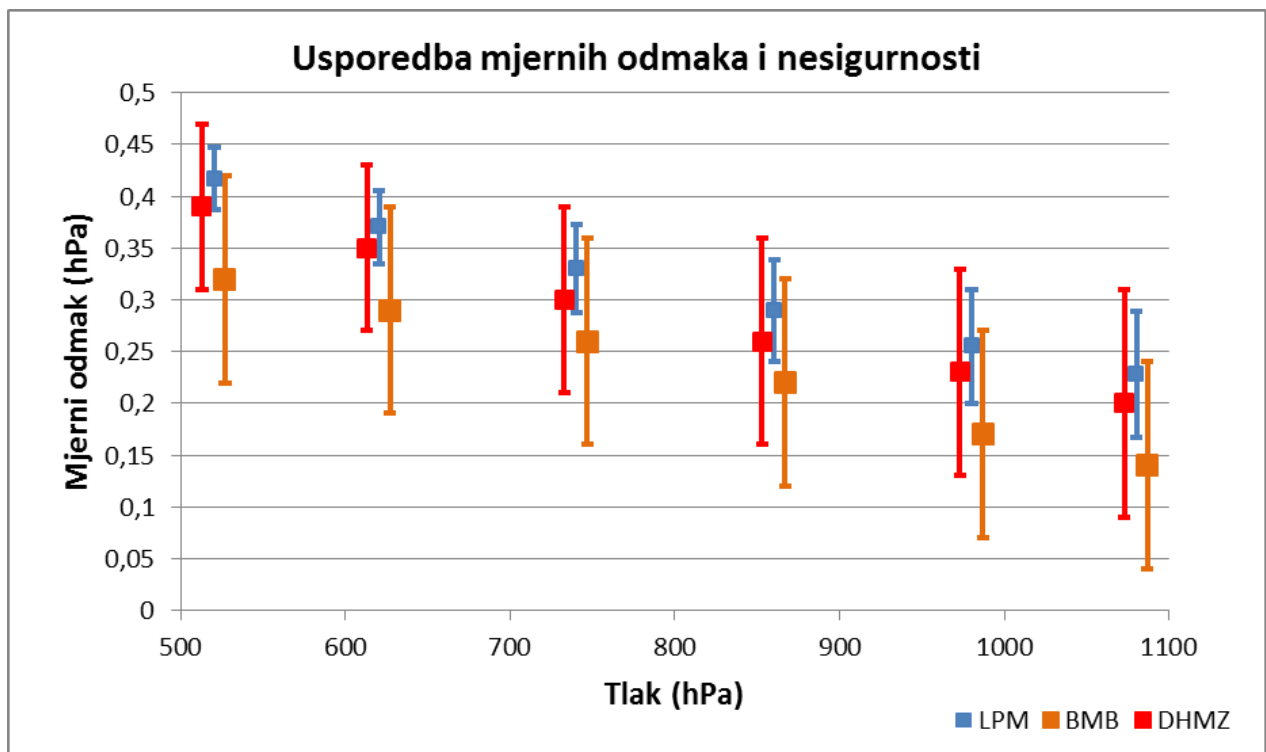
Br.	Mjerna točka (hPa)	Mjerni odmak (LPM) (hPa)	Mjerni odmak (BMB) (hPa)	Mjerna nesigurnost (LPM) (hPa)	Mjerna nesigurnost (BMB) (hPa)	Faktor slaganja (-)
	-	$(M_{sr} - p_e)_{LPM}$	$(M_{sr} - p_e)_{BMB}$	U_{LPM}	U_{BMB}	E_n
1	520,000	0,417	0,320	0,030	0,100	0,929
2	620,000	0,370	0,290	0,035	0,100	0,755
3	740,000	0,330	0,260	0,042	0,100	0,645
4	860,000	0,290	0,220	0,049	0,100	0,629
5	980,000	0,255	0,170	0,055	0,100	0,745
6	1080,000	0,228	0,140	0,061	0,100	0,751

Iz tablice 12. vidljivo je da je faktor slaganja E_n u svim mjernim točkama manji od 1 pa je kriterij prihvatljivost zadovoljio granične uvjete.



Slika 29. Grafički prikaz usporedbe LPM-a i BMB laboratorija

Slika 30. Grafički prikaz vrijednosti E_n



Slika 31. Grafički prikaz usporedbe LPM-a, BMB laboratorija i laboratorija DHMZ-a

8. ZAKLJUČAK

U uvodnom dijelu ovog rada dan je pregled najvažnijih teorijskih čimbenika koje je nužno poznavati prilikom izvođenja međulaboratorijske usporedbe. Opisane su metode mjerenja tlaka (direktna i indirektna), a naglasak je stavljen na metode mjerenja barometarskog tlaka i umjeravanja barometara. Definirane su i norme i upute koje se moraju poštivati te protokol izvođenja usporedbe. Naposljetku je izvedena međulaboratorijska usporedba, čiji je pilot-laboratorij bio LPM. Svaki laboratorij zasebno je proveo umjeravanje digitalnog barometra Vaisala, PTB330 u mjernom području od 500 do 1100 hPa, a ulogu umjeravanog laboratorija imali su BMB laboratorij i laboratorij DHMZ-a.

Sudjelovanjem u ovoj međulaboratorijskoj usporedbi omogućeno je stjecanje praktičnih znanja potrebnih za provedbu analize usporedbe, čiji je glavni cilj bio izračunati vrijednosti faktora slaganja (E_n). Grafički prikaz rezultata, vidljiv na slici 30., ukazuje da je vrijednost E_n za međulaboratorijsku usporedbu između LPM-a i laboratorija DHMZ-a u svim mjernim točkama prilično manji od granične vrijednosti, koja iznosi jedan. Vrijednost E_n je, za usporedbu između LPM-a i BMB laboratorija, nešto viša te je čak blizu granične vrijednosti u nekim točkama. Iako to nije idealno, svejedno se smatra prihvatljivim te nisu potrebne dodatne korekcije. Pošto je kriterij prihvatljivosti E_n zadovoljio granične uvjete u oba slučaja, može se zaključiti da su svi sudionici ispravno odradili svoj dio usporedbe te da su mjerni rezultati i uređaji ispravni. Stoga se može zaključiti da je međulaboratorijska usporedba uspješno provedena i rezultati se mogu objaviti.

LITERATURA

- [1] *Science, time and measurement in Mesopotamia*, <http://factsanddetails.com/world/cat56/sub402/item1511.html#chapter-4>, 10. 12. 2020.
- [2] *Povijest metričkog sustava*, <https://dzm.gov.hr/istaknute-teme/zakonsko-mjeriteljstvo/mjerne-jedinice-228/povijest-metricog-sustava/247>, 10. 12. 2020.
- [3] Howarth, P., Redgrave F.: *Metrology-in short, 3rd edition*, srpanj 2008.
- [4] Grgec Bermanec, L., Zvizdić, D.: *Podloge za predavanja iz kolegija Mjerenje u energetici*, 2017.
- [5] WIKA Handbook, *Pressure and Temperature measurement, U.S Edition*, 2008.
- [6] Grgec Bermanec, L., Zvizdić, D.: *Predavanja iz kolegija Mjerenje u energetici*, 2015.
- [7] *Measurement of Atmospheric Pressure*, https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/r_ic/Our%20activities/International/CP5-Pressure.pdf, 12. 12. 2020.
- [8] EURAMET, *Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers*, EURAMET Calibration Guide No. 17 Version 4.0, travanj 2019.
- [9] EURAMET, *Guidelines on the Calibration of Pressure Balances*, EURAMET Calibration Guide No. 3 Version 1.0, ožujak 2011.
- [10] DKD, *Calibration of Pressure Gauges*, Guideline DKD-R 6-1 Edition 3/2014, ožujak 2014.
- [11] EURAMET, *Guide on Comparisons*, EURAMET Guide No. 4 Version 1.0, svibanj 2016.
- [12] CIPM MRA, *Measurement comparisons in the CIPM MRA*, CIPM MRA-D-05 Version 1.6, ožujak 2016.
- [13] HAA, *Pravila za međulaboratorijske usporedbe*, HAA-Pr-2/6, 6. izdanje, listopad 2019.
- [14] Grgec Bermanec, L., Zvizdić, D.: *Interlaboratory comparison in the pressure range from 0 to 2 MPa for accredited calibration laboratories*, 2015.
- [15] DHMZ, <https://meteo.hr/infrastruktura.php?section=laboratoriji¶m=soul>, 1. 2. 2021.
- [16] BMB laboratorij Brcković-Povijest, <http://www.bmb-laboratorij.hr/povijest/>, 1. 2. 2021.
- [17] Laboratorij za procesna mjerenja, <https://www.fsb.unizg.hr/?ztermo&lpm>, 2. 2. 2021
- [18] Saxholm, S., Otal, P., Altintas, A., Grgec Bermanec, L., Durgut, Y., Hanrahan, R., Kockac, I., Lefkopoulos, A., Pražák, D., Sandu, I.: *EURAMET.M.P-S9: Comparison in the negative gauge pressure range -950 to 0 hPa*, Metrologia 53, 2016.
- [19] Wuentrich, C., Alisic, S., Altintas, A., Andel, I., Choi, I., Eltawil, A., Koças, I., Faràr, P.: *EURAMET.M.P-K8: Comparison in gas media (absolute ad gauge mode) in range from 25 to 200 kPa*, Metrologia 53, 2017.

PRILOZI

1. CD-R disc