

ISPITIVANJE OSJETLJIVOG BAROMETARSKOG VISINOMJERA

TESTING OF SENSITIVE BAROMETRIC ALTIMETER

Josipa Vukelić, Jelena Ćosić, Josip Stepanić

Izvorni znanstveni članak

Sažetak: U današnje vrijeme nema učinkovitog, jednostavnog i pouzdanog uređaja za precizno određivanje trenutne visine leta malih bespilotnih letjelica. To je jedan od razloga zašto se kvadrotori i slične bespilotne letjelice ne mogu u većoj mjeri koristiti u stvarnoj okolini. U radu je opisana konstrukcija prototipa barometarskog visinomjera izrazito velike osjetljivosti mjerenja malih promjena visine. Doprinos nekih elemenata prototipa na osjetljivost mjerenja visine određena je statističkim planom pokusa. Planom pokusa obuhvaćeni su elementi: volumen osjetilne posude (A), promjer osjetnika za atmosferski tlak (B) i viskoznost kapljevine koja predstavlja granicu volumena osjetilne posude (C). Najveći utjecaj u pokusu pokazao je element C, a sljedeći po redu kombinacija elemenata B i C. Uzimajući u obzir uvjete provođenja pokusa, konstruirani prototip pokazao se dovoljno osjetljivim s obzirom na traženo razlučivanje promjena visine. Međutim, robusnost odabrane konstrukcije nije dovoljna za predviđenu primjenu. Na temelju dobivenih rezultata izdvojeni su smjerovi unapređivanja prototipa.

Ključne riječi: barometarski visinomjer, bespilotne letjelice, kvadrotori, osjetljivost, plan pokusa

Original scientific paper

Abstract: Currently there is no efficient, simple and reliable device for precise measurement of altitude of small unmanned aerial vehicles during their flights. That is one of the reasons why quadrotors and similar unmanned aerial vehicles cannot be used in a larger extent in realistic environments. This article describes the construction of a prototype of barometric altimeter with extremely high sensitivity in measuring the small altitude changes. Contribution of the prototype's elements on the sensitivity of altitude measurement was determined using statistically designed experiment. The designed experiment explicitly took into account the following elements: volume of the prototype's vessel (A), the diameter of the sensor of atmospheric pressure (B), and the viscosity of liquid that forms the vessel's boundary (C). The largest contribution is that of the element C, while the second largest is the combination of elements B and C. Taking into account the experimental conditions, the designed prototype demonstrated its sufficient sensitivity regarding the stated resolution of altitude changes. However, its robustness is not sufficient for the predicted application. Based on the results, the directions for the prototype improvement are selected.

Key words: barometric altimeter, unmanned aerial vehicles, quadrotors, sensitivity, design of experiment

1. UVOD

Danas ne postoji učinkovit, pouzdan i nenapajan autonomni instrument za precizno mjerenje trenutne visine leta malih bespilotnih letjelica, neovisno o tome služe li one za prijenos mase, energije ili informacije [1], [2]. To je jedan od razloga zašto se takve letjelice ne koriste u većoj mjeri u stvarnoj okolini.

Tipični instrumenti određivanja visine leta malih bespilotnih letjelica, npr. kvadrotora, u današnje vrijeme su infracrveni i/ili ultrazvučni daljinomjeri. Oni se koriste tako da mjere udaljenost od letjelice do vertikalne, niže prepreke. U jednostavnim, npr. laboratorijskim okolinama, tako izmjerena udaljenost zapravo odgovara visini leta letjelice u odnosu na podlogu. Instrumenti su spojeni na računalo čineći tako povratnu vezu između motora i tražene visine leta, što omogućuje autonomno ili poluautonomno provođenje

različitih letnih manevara. Prednosti infracrvenih i ultrazvučnih daljinomjera su relativno mala masa i potrošnja energije, relativno brzi odziv i primjenjivost u većem rasponu visina leta u odnosu na podlogu.

Međutim, infracrveni i ultrazvučni daljinomjeri pokazuju i niz ograničenja kod mjerenja visine leta:

- Ne rade pouzdano ako podloga ne reflektira dovoljno usmjerenu relativno veliku količinu upadnog zračenja. Takve su podloge npr. kose podloge, valovite, vrlo hrapave podloge, podloge koje su porozne ili prekrivene vegetacijom (travom, drvećem), kao i strukture koje su na drugi način kompleksne (naselja s više međusobno različitih gusto poslaganih objekata).
- Ne rade pouzdano u okolini u kojoj postoje dodatni, intenzivni izvori zračenja na koja su osjetljivi. Npr., infracrveni senzori koji nisu izrazito spektralno

diskriminativni, zagušeni su pod djelovanjem sunčevog infracrvenog zračenja.

- Ako dvije letjelice opremljene spomenutim instrumentima za mjerenje visine leta jedna iznad druge, onda viša letjelica dobiva podatak o visini leta koji je pogrešno izmjereno kao udaljenost od niže letjelice.

Dodatni problemi kod mjerenja udaljenosti pomoću instrumenata, a koji upućuju na daljnje manjkavosti infracrvenih i ultrazvučnih instrumenata, analizirani su drugdje [3].

Budući da se u stvarnosti i kod mnogih režima leta javljaju spomenute situacije, male, autonomne bespilotne letjelice opremljene uobičajenim infracrvenim ili ultrazvučnim instrumentima za mjerenje visine gotovo su neupotrebljive.

Kako bi se proširila mogućnost upotrebe malih, autonomnih bespilotnih letjelica u velikom broju realnih okolina, razmotrena je mogućnost primjene instrumenta za mjerenje visine leta koji je primjenjiv u stvarnoj okolini. Odabrani princip rada mjerenja visine je barometarsko mjerenje visine, tj. mjerenje visine leta temeljeno na razlici statičkog tlaka na trenutnoj visini leta u odnosu na statički tlak na referentnoj površini. Barometarski uređaji redovito se koriste za mjerenje visine u avionima i većim letjelicama [3], [5], ali se do danas gotovo ne koriste u manjim bespilotnim letjelicama.

U ovom radu opisana je konstrukcija prototipa osjetljivog barometarskog visinomjera te su navedeni i analizirani rezultati ispitivanja njegove osjetljivosti. Prototip je nenapajan i omogućuje autonomno određivanje trenutne visine leta u odnosu na tlo, neovisno o količini sunčevog zračenja, o vrsti teksture podloge i o broju letjelica koje lete jedna blizu drugoj.

Članak se sastoji od sljedećih cjelina: poglavlje 2. daje teorijsku vezu statičkog tlaka i visine u odnosu na tlo. U trećem poglavlju opisani su plan pokusa i faze mjerenja. Rezultati su analizirani u četvrtom poglavlju. Zaključci i smjernice daljnjeg rada su u petom poglavlju.

2. BAROMETARSKO MJERENJE VISINE LETA

Zrakoplovni instrumenti omogućavaju prikupljanje podataka o stanju zrakoplova i okolne atmosfere, koji su važni za upravljanje i navigaciju tijekom leta. Značajnu skupinu zrakoplovnih instrumenata čini skupina barometarskih instrumenata. U tu skupinu ulaze npr. visinomjer, brzinomjer, variometar, statoskop, katanoskop i vertimetar. Njihov rad temelji se na mjerenju tlaka. Barometarski visinomjer je barometarski instrument koji podatak o statičkom tlaku atmosfere pretvara u visinu u odnosu na referentnu točku. Analiza veze tlaka i visine, $p(h)$, uobičajeno se izvodi uz pretpostavku da se mjerenje odvija u ICAO atmosferi [6].

Na temelju takvog modela atmosfere dobiva se sljedeća veza $p(h)$:

$$p(h) = p_0 \left(1 - \frac{h\tau}{T_0} \right)^{\frac{g}{R_M T_0}}, \quad (1)$$

pri čemu su p_0 i T_0 referentni tlak i statički tlak, odnosno termodinamička temperatura; $\tau = 6,8$ mK/m je temperaturni gradijent ICAO atmosfere na visinama do 11 km; g je ubrzanje sile teže, $R_M = R_M/M = (8,314/0,029)$ J/(kg K) je molarna plinska konstanta zraka.

U približenju malih visina, tj. onih za koje je $h \ll T_0/\tau$, koristeći $(1+x)^\alpha \approx 1+\alpha x$ pri $x = -h\tau/T_0 \ll 1$, slijedi

$$p(h) = p_0 \left(1 - \frac{g h}{R_M T_0} \right), \quad (2)$$

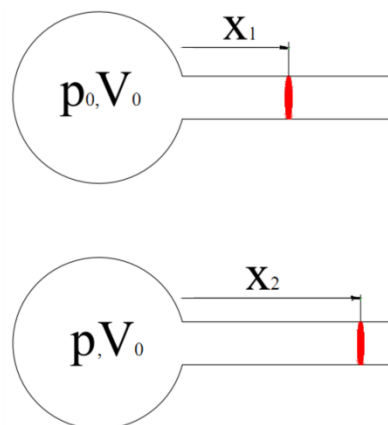
odnosno za relativnu promjenu tlaka vrijedi

$$\frac{p - p_0}{p_0} = - \frac{g h}{R_M T_0}. \quad (3)$$

Primijenimo (3) na opis sklopa prikazanog na slici 1. Na posudu volumena V_0 spojena je kapilara promjera d i površine poprečnog presjeka $S = d^2\pi/4$. U kapilari se nalazi kapljica tekućine na udaljenosti x_1 od kraja kapilare bliže posudi. Spojeni volumen posude i dijela kapilare uz posudu do kapljice je V_1 . Ako cijeli sklop podignemo s početne visine $h = 0$ na $h > 0$, kapljica će se pomaknuti na poziciju x_2 . U tom trenutku ukupni volumen posude i dijela kapilare uz posudu do kapljice je V_2 . Slijedi:

$$V_1 = V_0 + S \cdot x_1$$

$$V_2 = V_0 + S \cdot x_2 \quad (4)$$



Slika 1. Shema modela teorijski analiziranog sklopa

Promjenu volumena od V_1 do V_2 uzimamo kao izotermnu promjenu idealnog plina opisanu Boyle-Mariottovim zakonom

$$p_0 V_1 = p V_2. \quad (5)$$

Uvrštavanjem (5) u (3) slijedi

$$\frac{p - p_0}{p_0} = \frac{V_1 - V_2}{V_2}. \quad (6)$$

Izjednačavanjem desnih strana izraza (3) i (6) slijedi

$$\frac{g h}{R_M T_0} = \frac{S \Delta x}{V}, \quad (7)$$

gdje je $\Delta x = x_2 - x_1$ pomak kapljice. Izraz (7) zapisujemo u obliku

$$h = \frac{R_M T_0 S}{g V} \Delta x = C \Delta x, \quad (8)$$

pri čemu konstanta osjetljivosti sklopa, C , obuhvaća značajke geometrije S/V i stanja lokalne atmosfere $R_M \cdot T_0/g$. Neka su referentne vrijednosti:

$$T_0 = 278 \text{ K}$$

$$V = N \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$d = n \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (9)$$

$$S = n^2 \cdot 10^{-6} \frac{\pi}{4} \text{ m}^2$$

Nakon uvrštavanja vrijednosti (9) u izraz (8) slijedi

$$h = 6,2 \cdot 10^{-3} \frac{n^2}{N} \Delta x \quad (10)$$

Za potrebe dizajniranja sklopa koristimo izraz

$$\Delta x = \frac{N}{6,2 \cdot n^2} \cdot h \quad (11)$$

Na temelju slike 1. za pokus je dizajniran jednostavan sklop načinjen od osjetilne posude i osjetnika (slika 2.), koja omogućuje nenapajano autonomno mjerenje relativno malih promjena visine primjenom izraza (10). Pod pojmom relativno male promjene visine misli se na promjene visine reda veličine 1 m.



Slika 2. Dizajnirani sklop

Za osjetilne posude odabrane su staklene boce. Analizom izraza (11), uz postavljene zahtjeve osjetljivosti, kao značajan raspon volumena osjetilne posude određen je raspon volumena od 0,5 l do 2 l. Kao značajni unutarnji promjer osjetnika nalazi se u rasponu od 1,2 mm do 2 mm. Kako proces opisan s (5) uključuje gibanje kapljevine, do izražaja dolazi trenje između kapljevine i stijenke osjetnika. Zato pratimo utjecaj dinamičke viskoznosti μ i to u rasponu između 0,0005 Pa s i 0,05 Pa s [7].

3. PLAN POKUSA

3.1. Konfiguriranje pokusa

Cilj eksperimentalnog dijela ovog rada je provjeriti osjetljivost opisanog sklopa na relativno male promjene visine. To je polazište za procjenu kapaciteta modificiranog mjernog sklopa za korištenje kod preciznog određivanja visine primjenom barometarskih formula u stvarnim bespilotnim letjelicama. Modifikacija uključuje minijaturizaciju sklopa.

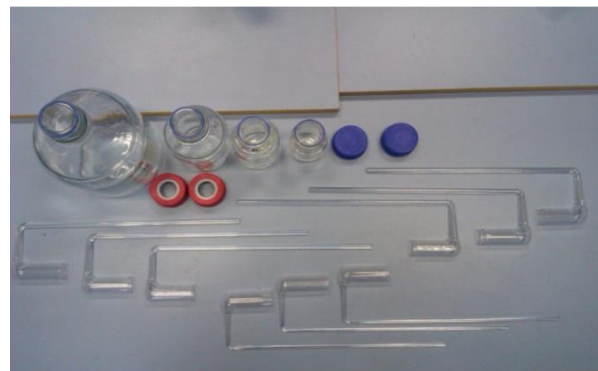
Prema modelu izvedenom u poglavlju 2. izdvojene varijable su volumen osjetilne posude, promjer osjetnika i viskoznost kapljevine koja predstavlja osjetnik.

Kako u ovom pokusu imamo 3 varijable čiji utjecaj ocjenjujemo, korišten je m^3 plan pokusa. Analizom izraza (8) uočeno je strogo monotono ponašanje krivulje, što upućuje na korištenje rubnih vrijednosti intervala. Stoga sve izdvojene varijable imaju dvije razine koje se kombiniraju na svih 8 načina. S obzirom na tri izdvojene varijable, za prikladan pokus odabran je pokus 2^3 [8], [9]. Ovim planom pokusa ispitan je utjecaj izdvojenih varijabli i njihovih interakcija na varijabilnost rezultata.

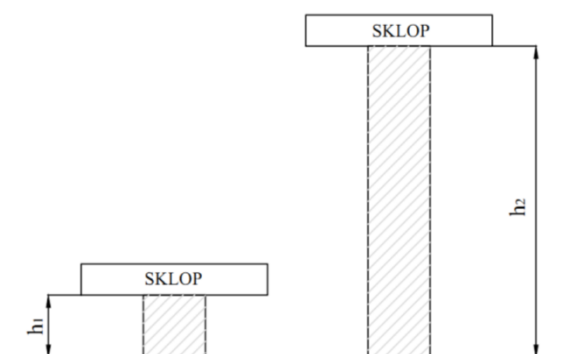
3.2. Mjerenje

Prilikom mjerenja su kombinacije razina varijabli, uz ponavljanje, odabrane nasumičnim redoslijedom. Mjerenja su provedena u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja pri Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Osjetilne posude učvršćene su na postolje. Za osjetnike su odabrane kapilare (slika 3.) u koje je stavljena kapljica tekućine. Uzimajući u obzir definirane granice dinamičke viskoznosti, za vrstu medija odabrane su voda i ulje. Kapilare su brtvama spojene na posude i postavljene u horizontalni položaj. Radi očitavanja pomaka, mjerna skala je postavljena ispod osjetnika. Početno je sklop postavljen na postolje na visini h_1 (slika 4.). Nakon što se stupac tekućine ustabilio, sklop je podignut na visinu h_2 . Nakon toga očitana je pomak Δx .



Slika 3. Prikaz mjerne opreme prije sklapanja



Slika 4. Položaj sklopa na visinama h_1 , odnosno h_2

Nakon toga je postavljena sljedeća kombinacija razina varijabli za koju su očitane vrijednosti pomaka, te je postupak nastavljen dok nije očitano planiranih 24 podatka.

4. ANALIZA REZULTATA

Rezultati mjerenja statistički su obrađeni u programskom paketu *Design-Expert 7.1.6*. Utjecaj izdvojenih varijabli određen je analizom varijance (ANOVA) odabranog modela 2^3 [10].

U skladu s izdvojenim varijablama (poglavlje 3.1.) uvedene su sljedeće oznake:

A (*volumen*), B (*promjer*) i C (*medij*).

Analizom varijance određeno je koja od spomenutih varijabli i njihovih interakcija značajno utječe na varijaciju rezultata uz pretpostavku ovisnosti pomaka oblika

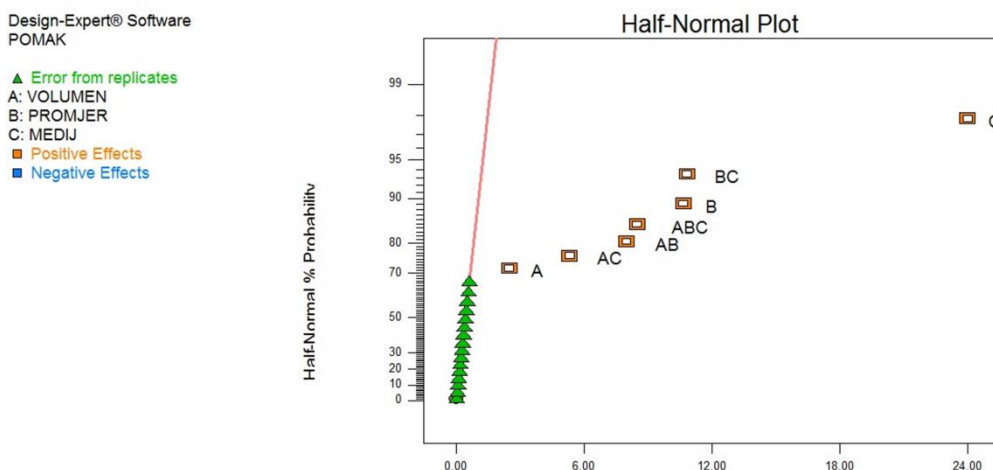
$$\Delta x = A + B + C + AB + AC + BC + ABC + \varepsilon, \quad (12)$$

gdje ε označava nasumični doprinos. Varijable modela čiji utjecaj na varijabilnost pomaka iznosi više od 0,05 značajno utječu na rezultat.

Tabela 1. prikazuje rezultate analize. Iz tabele 1. slijedi da je najutjecajnija varijabla C. Druga po utjecajnosti je interakcija BC, a potom varijabla B. Ovo govori da na rezultate mjerenja najviše utječe vrsta kapljevine, ovdje parametrizirana dinamičkom viskoznošću μ .

Tabela 1. Analiza varijance (ANOVA)

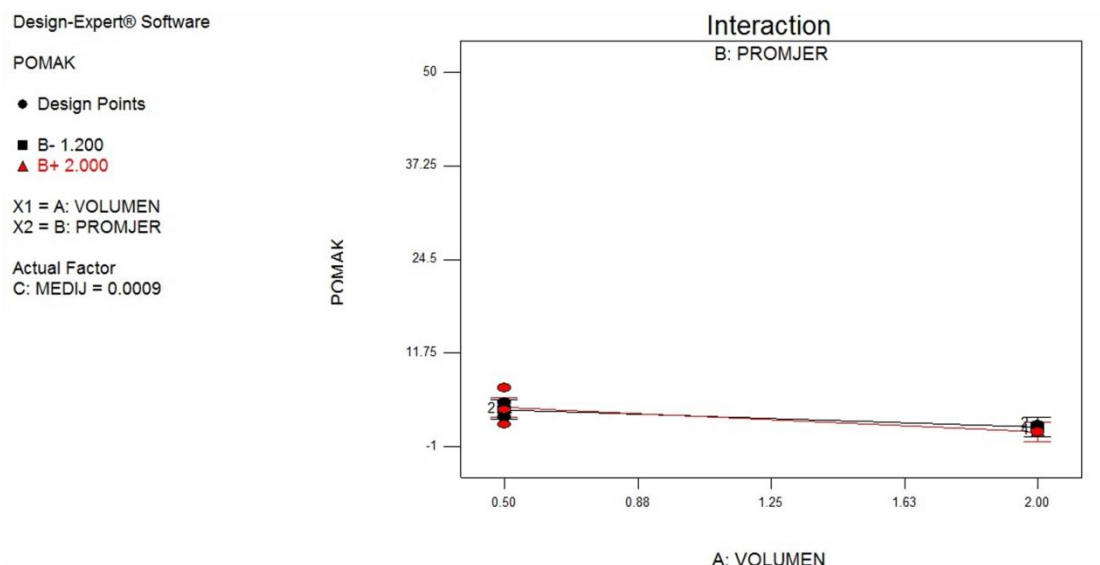
Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	14,75	1	0,32	14,08	15,42	
A	1,25	1	0,315	0,58	1,92	1
B	5,33	1	0,31	4,67	6,00	1
C	12	1	0,31	11,33	12,67	1
AB	4	1	0,32	3,33	4,67	1
AC	2,67	1	0,32	1,99	3,33	1
BC	5,42	1	0,315	4,75	6,08	1
ABC	4,25	1	0,315	3,58	4,92	1



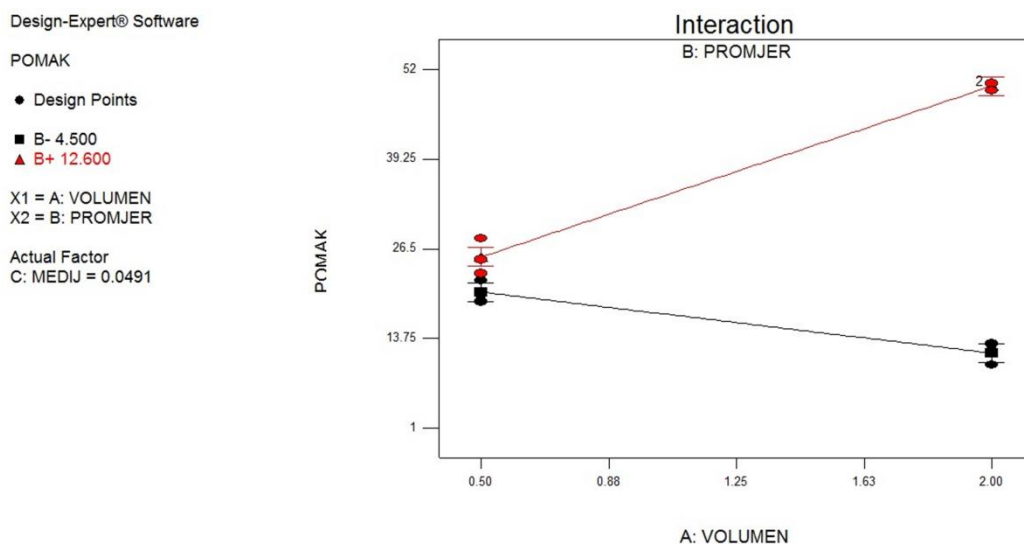
Slika 5. Grafički prikaz parcijalno-normalne razdiobe

Slika 5. prikazuje graf parcijalno-normalne razdiobe u ovisnosti o izdvojenim varijablama i njihovim interakcijama. Za sve varijable i njihove

interakcije koje odstupaju od pravca uzima se da značajno utječu na rezultat ispitivanja.



Slika 6. Grafički prikaz interakcije varijabli A i B za C = 0,0009Pa s



Slika 7. Grafički prikaz interakcije varijabli A i B za $C = 0,0491 \text{ Pa s}$

Slika 6. prikazuje relativno malu osjetljivost pomaka uslijed promjene volumena u razmatranom rasponu. Razlog tome je što su apsolutni pomaci kod korištenja odgovarajuće kapljevine (voda) relativno mali te su sličnog reda veličine kao i nesigurnost u očitavanju. Kod promjene kapljevine (slika 7.) rezultat pomaka znatno je porastao te ujedno pokazao relativno veliku osjetljivost na promjenu volumena posude zatvorenog dijela plina. To je u skladu s teorijskim izrazom (8). Zbog praktičnosti cilj je koristiti minimalni volumen, što dodatno ističe prikladnost kapljevine veće viskoznosti budući da se u tom slučaju postiže zamjetni pomak (znatno veći od nesigurnosti očitavanja) i za manji volumen zatvorenog dijela plina. Spomenuta veza viskoznosti kapljevine i volumena nije apsolutna jer se karakter utjecaja viskoznosti na

ovisnost pomaka o promjeni volumena mijenja ovisno o promjeru kapilare u kojoj se giba kapljevine.

Dakle, ako se traži konstrukcija koja je osjetljivija na male promjene visine, potrebno je izabrati veći volumen, širu kapilaru i viskoznu kapljevinu. Naprotiv, ako želimo konstrukciju koja je ogromna s obzirom na fluktuacije u korištenim parametrima, onda je potrebno koristiti manje viskoznu kapljevinu.

Kod malih viskoznosti, reda veličine 10^{-4} Pa s , promjer kapilare ne pokazuje važniji utjecaj na izmjereni pomak kapljice u korištenom rasponu promjera kapilara, odnosno u korištenom rasponu volumena zatvorenih dijelova plina.

Odzivna ravnina za opisani pokus prikazana je na slici 8. za iznos varijable $C = 0,0009 \text{ Pa s}$, a na slici 9. za iznos varijable $C = 0,0491 \text{ Pa s}$.

Design-Expert® Software

POMAK

● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

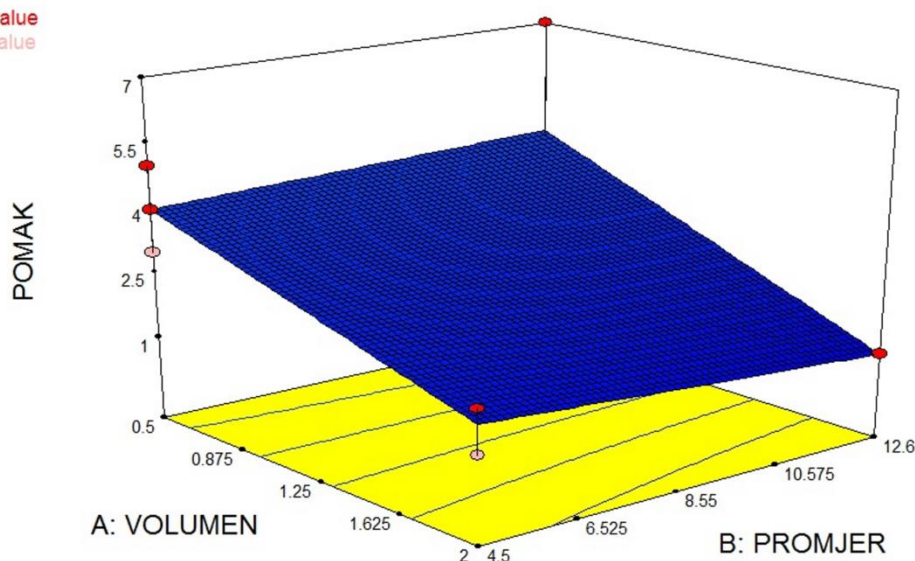


X1 = A: VOLUMEN

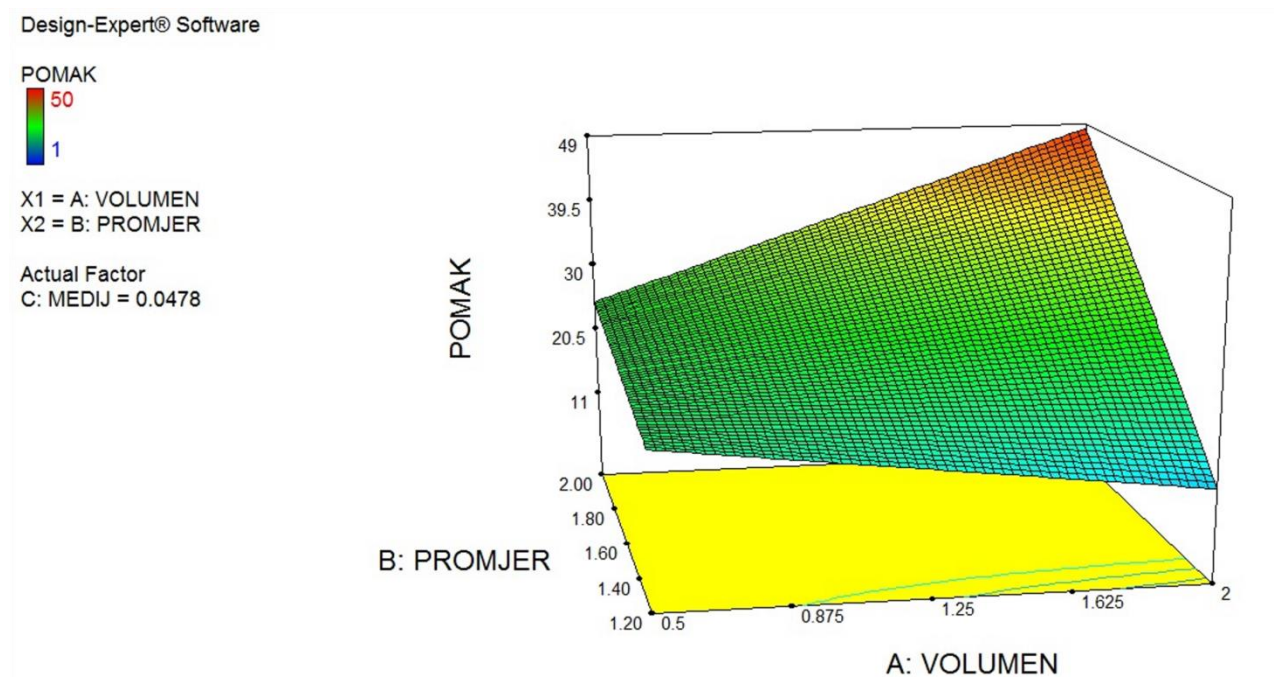
X2 = B: PROMJER

Actual Factor

C: MEDIJ = 0.0009



Slika 8. Odzivna ravnina za $C = 0,0009 \text{ Pa s}$



Slika 9. Odzivna ravnina za $C = 0,0491 \text{ Pa s}$

5. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenog pokusa i analize rezultata, uzimajući u obzir uvjete za pokus, slijedi da ovakav način preciznog mjerenja promjene tlaka s promjenom visine zadovoljava neke od uvjeta pretpostavljene primjene za rad bespilotnih letjelica. Konkretno, ako se traži konstrukcija osjetljiva na male promjene visine, treba izabrati veći volumen, širu kapilaru i viskoziju kapljevinu. Međutim, robusnost odabrane konstrukcije nije dovoljna za primjenu na malim bespilotnim letjelicama.

U sljedećem koraku istraživanja treba dizajniranu konstrukciju izložiti vanjskim atmosferskim utjecajima. Potrebno je za iste varijable ponoviti mjerenja uz utjecaj vlažnosti, temperature, tlaka okoliša, kapilarnih efekata, adhezivnih svojstava medija, materijala kapilare, vjetra, magle, vibracija i utjecaja direktnog sunčevog zračenja.

6. LITERATURA

- [1] Galović, B.; Franjković, D.; Stepanić, J.: Automated Aircraft Control Systems, Međunarodno savjetovanje Intelligent Transport Systems and Their Interfaces/Zbornik savjetovanja: Promet-Traffic-Traffico **11**(4), Dubrovnik, listopad 1999., 133-136
- [2] Čosić, J.: Software Development for Embedded Systems: Case Study of Unmanned Aerial Vehicles, 1st International conference on Internet & Business, Rovinj, lipanj 2012., 162-167
- [3] Stepanić, J.; Medić, S.; Kondić, Ž.: Parallax in a dynamic, non-contact & non-destructive, precise length measurement, Tehnički vjesnik **19**(2), 2012., 317-320

- [4] Stepanić, J.; Bucak, T.; Popović, B.: Research on directions of design optimisation of aircraft vertical speed indicator, Transportation and Communications 2000., Association of Traffic Engineers of the Republic of Macedonia, 2000., 342-346
- [5] Gavranović, B.; Stepanić, J.: Dinamičke karakteristike avionskog variometra, Zbornik radova – International Conference MATRIB 2010, Vela Luka, lipanj 2010.
- [6] http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=7472 (Dostupno: 04.10.2012.)
- [7] http://www.engineeringtoolbox.com/absolute-viscosity-liquids-d_1259.html (Dostupno: 30.8.2012.)
- [8] Winer, B. J.: Statistical Principles in Experimental Design, McGraw-Hill Book Company, Inc., 61-13174, New York, San Francisco, Toronto, London 1991.
- [9] Montgomery, D. C.; Runger, G. C.: Applied Statistics and Probability for Engineers (Third Edition), John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [10] <http://statease.info/dx70files/manual/DX7-03A-TwoLevel-P1.pdf> (Dostupno: kolovoz 2012.)

Kontakt autora:

Josipa Vukelić

Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu
Ivana Lučića 5
10002 Zagreb
zimovka2811@gmail.com

Jelena Ćosić, asistent

Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u
Zagrebu
Ivana Lučića 5
10002 Zagreb
jelena.cosic@fsb.hr

dr.sc. Josip Stepanić, izv.prof.

Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u
Zagrebu
Ivana Lučića 5
10002 Zagreb
josip.j.stepanic@fsb.hr