



Универзитет у Београду Машински факултет

Катедра за хидрауличне машине и енергетске системе
Лабораторија за турбуленцију и мерење брзине струјања флуида

С В Е Т С К И Д А Н М Е Т Р О Л О Г И Ј Е

**Савремене мерне технике у Лабораторији за турбуленцију и
мерење брзине струјања флуида**

Ђорђе С. Чантрак, Новица З. Јанковић и Дејан Б. Илић

Београд, 20. мај 2022. год.



Савремене мерне технике у Лабораторији:

1. Laser Doppler anemometry/velocimetry (LDA/LDV)
- Ласер Доплер анемометрија/велосиметрија (ЛДА)
2. Particle image velocimetry (PIV) – Мерење брзине струјања флуида снимањем просејаних честица, Честична велосиметрија (ПИБ)
3. Микро ПИБ
4. Hot-wire anemometry (HWA) – Сонде са загрејаним влакнима
5. Multihole probes – Сонде са више рупица (са интегрисаним трансмитерима притиска)



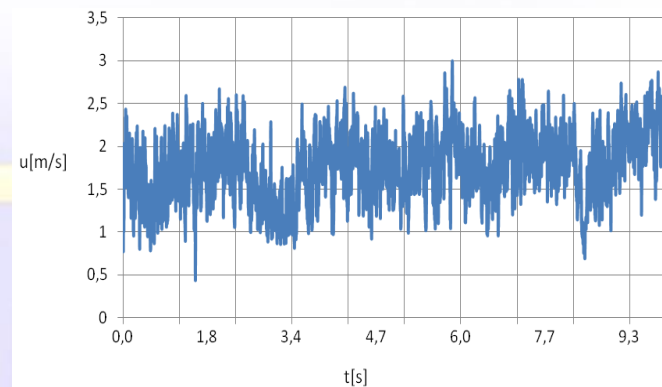
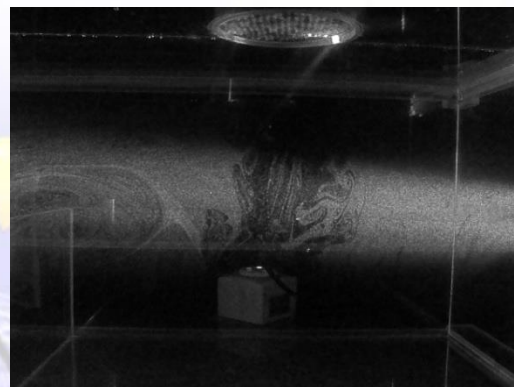
Ласери и мерни системи у Лабораторији

- Једнокомпонентни ЛДА систем са диодним ласером снаге 35 mW, таласне дужине светлости 660 nm, фокусом: 300 mm, пречника зрака: 2,5 mm, мерна запремина [mm³]: 0,1013 x 0,1008 x 1,013, мерна несигурност: 0,1%. Напомена: У току је надоградња система.
- Трокомпонентни ЛДА систем са континуалним Аргон-јонским ласером снаге 5W, произвођача Coherent, таласне дужине: 514,5 nm, 488 nm и 476,5 nm, мерна несигурност за једну компоненту: 0,1%;
- Стерео ПИВ систем – ласер Nd:Yag (neodymium-doped yttrium aluminium garnet), Laser Pulse Solo Mini Dual Nd:YAG, модел YAG30-15, произвођача New Wave, енергије 30mJ/пулсу, таласне дужине 532 nm, максималне радне фрекв. 15 Hz; 2 камере са CCD сензорима, модел Power View Pulse 2MP, са резолуцијом 1660x1200 пиксела, 12-битни излаз, 32 снимка у секунди, објективом 50mm/F1,8 и 64-битним интерфејсом.
- Брзи стерео ПИВ систем (time-resolved PIV): ласер Nd:YLF (Neodymium-doped yttrium lithium fluoride), снага од 100 W при учестаности рада од 3 kHz, 60mJ/пулсу, таласне дужине 527 nm, максималне радне фреквенције 10 kHz, модел Darwin Duo-527-100-M, произвођача Quantronix; 2 камере FASTCAM SA1.1, произвођача Photron, високе учестаности рада (675000 снимака у секунди) са резолуцијом од 1MP (1024 x 1024 x 12-bits) за 5400 снимака у секунди, интерна меморија 8GB.

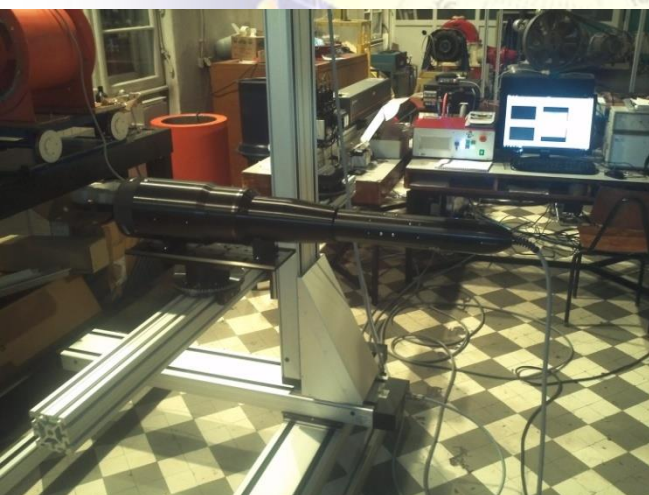
Примери примене мерних техника у Лабораторији



Трокомпонентна ЛДА мерења у млазу реверзибилног аксијалног вентилатора

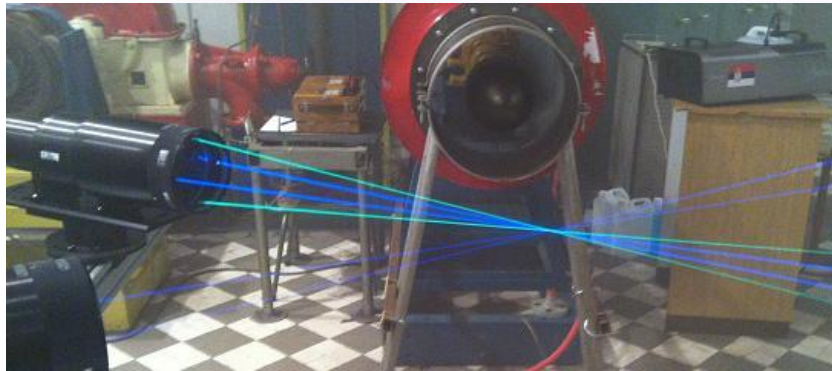


Визуализација струјања и потом мерења брзине у млазу аксијалног вентилатора

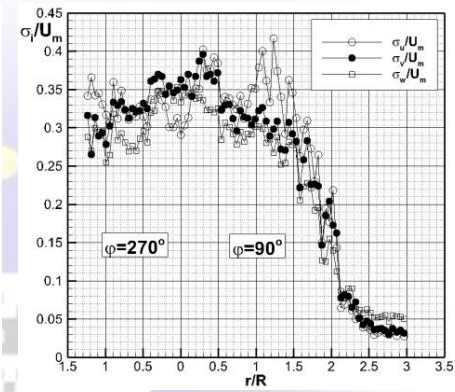
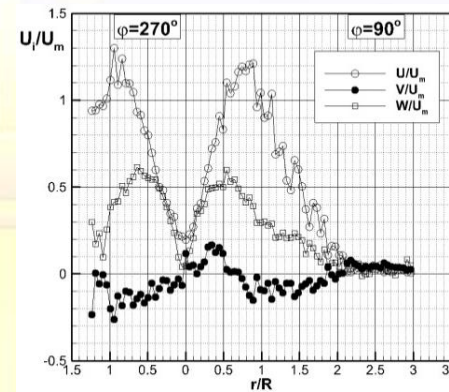
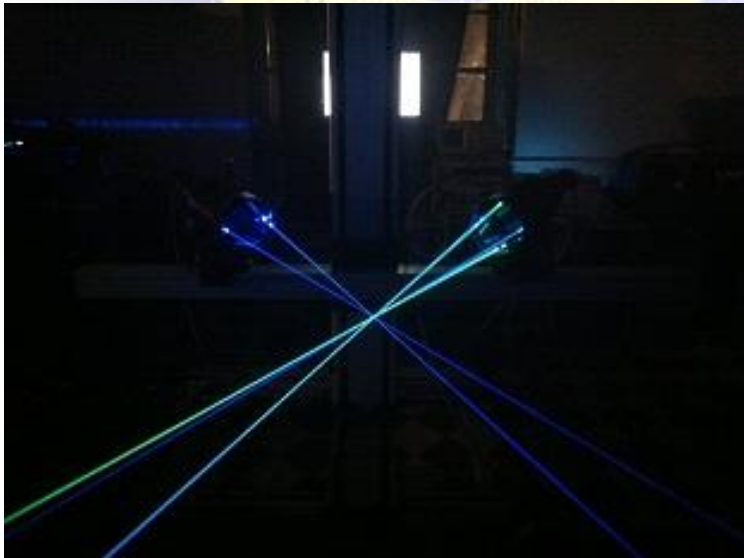


Мерења брзине помоћу ЛДА у дифузору

Примери примене оптичких метода у Лабораторији



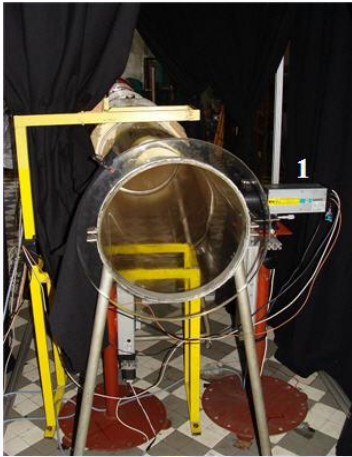
Трокомпонентна ЛДА мерења у
млазу аксијалног вентилатора



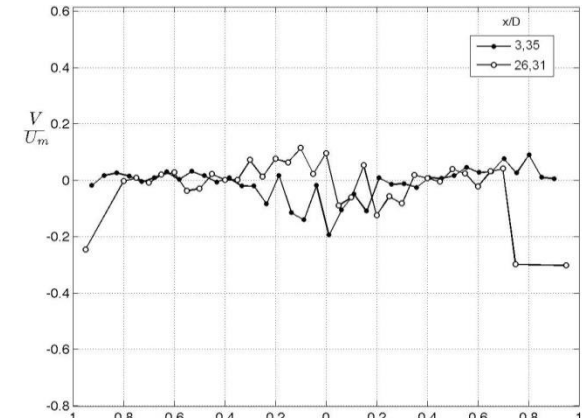
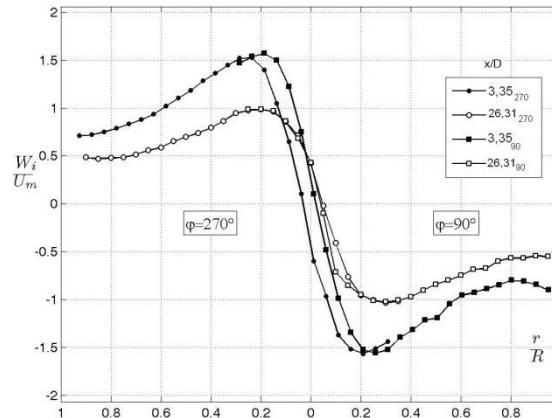
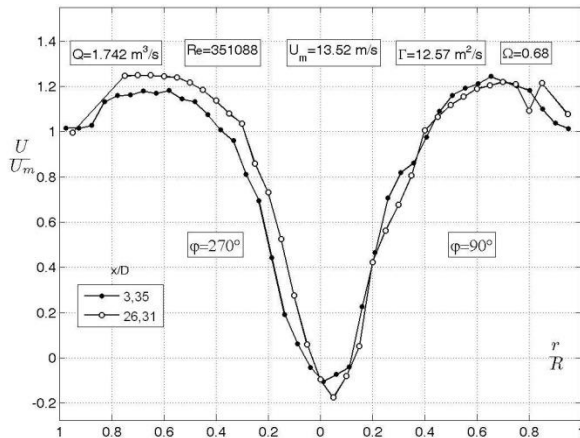
Расподела измерених временски
осредњених брзина и нивоа турбуленције



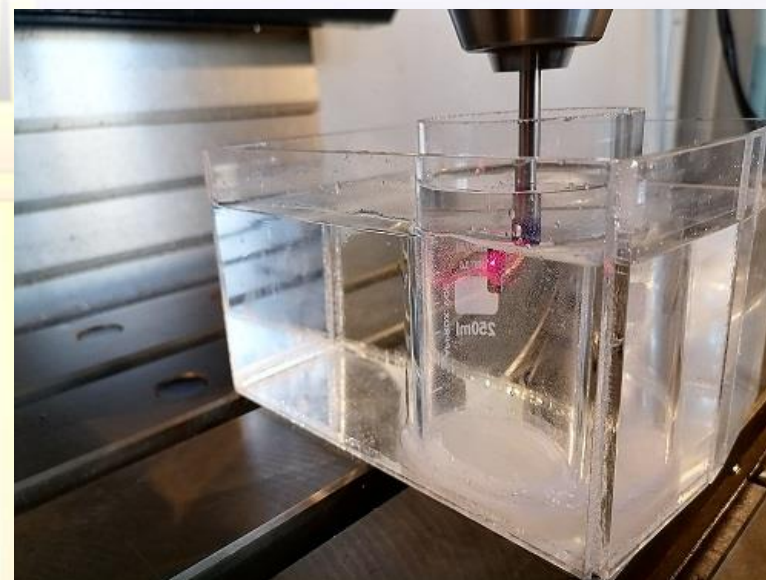
Примери примене оптичких метода у Лабораторији



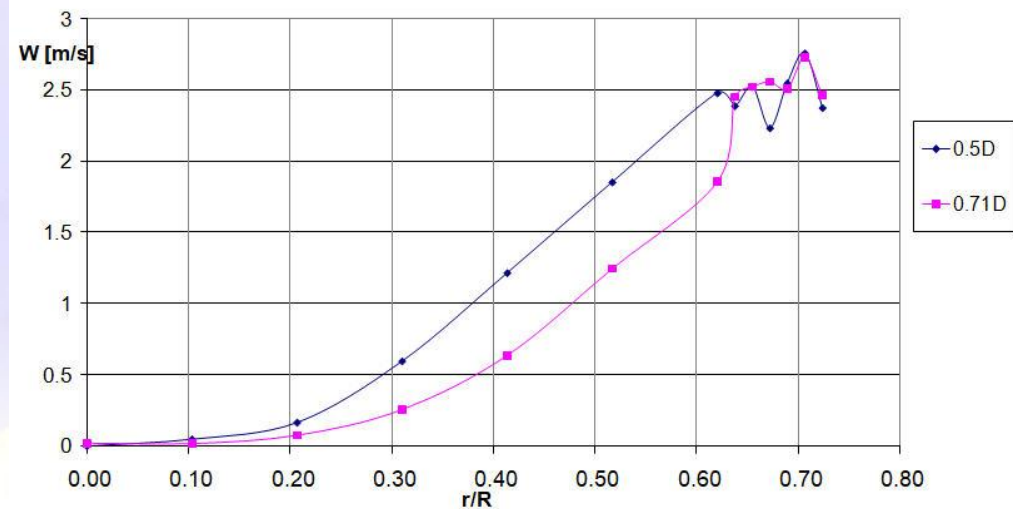
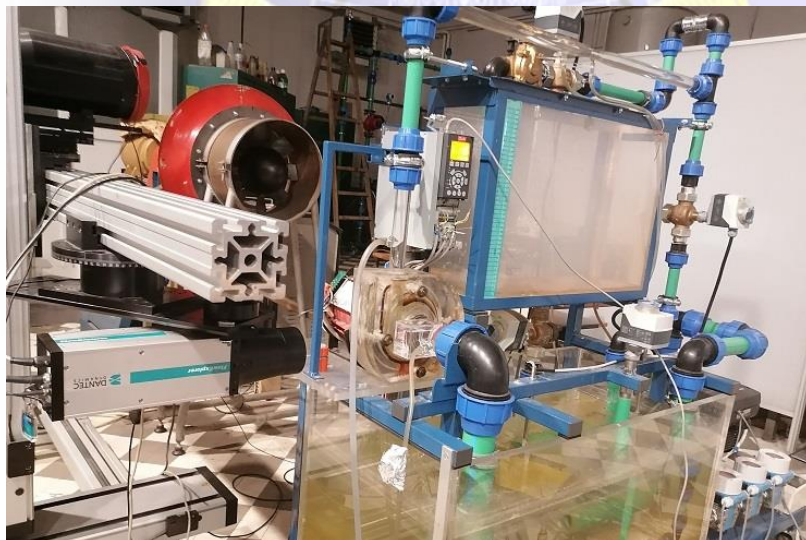
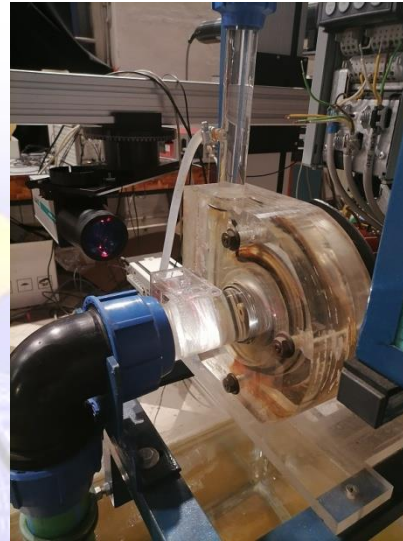
Једнокомпонентна
ЛДА мерења –
изучавање
турбулентног
вихорног струјања
у цевима.



Упоређивање профила брзине у два попречна пресека, редом за аксијалну (U), обимску (W) и радијалну (V) брзину.



Одређивање дислокације мерне запремине и корекције мерења брзине
на радном столу CNC машине

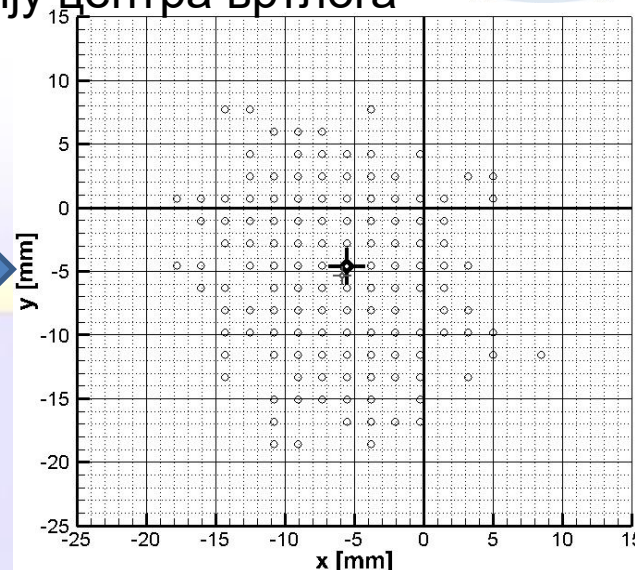
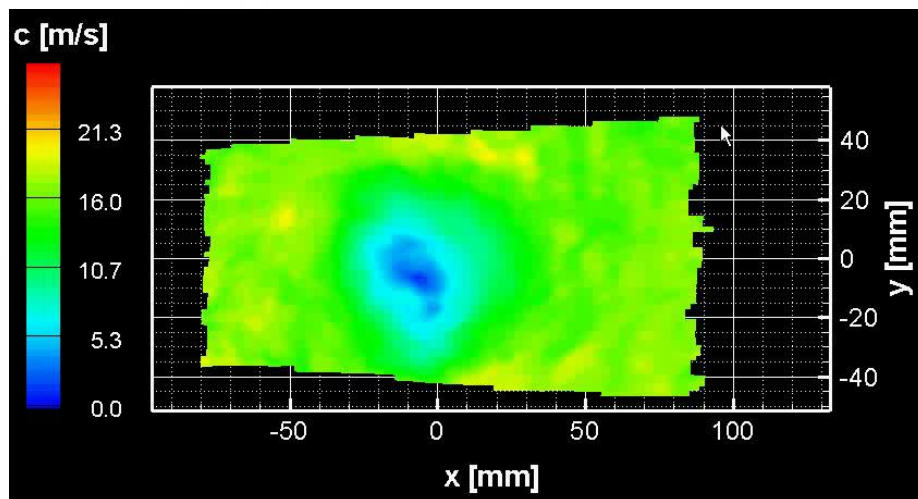


ЛДА мерења обимске брзине на пумпној инсталацији на усису пумпе

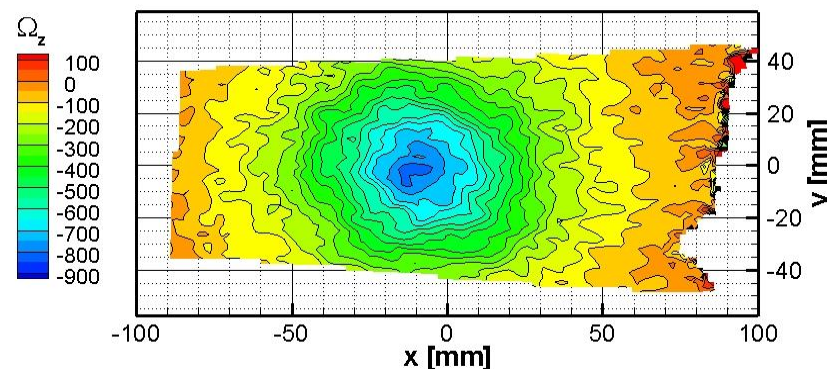
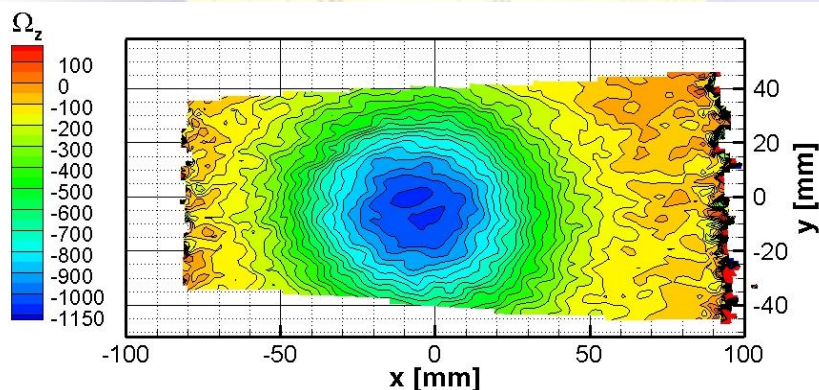


ПИВ

Развијен софтвер за детекцију центра вртлога

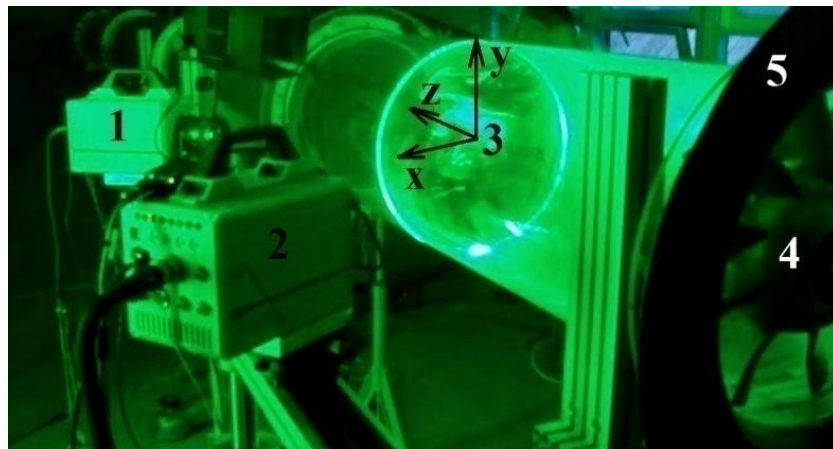


Брзинско поље - 400 снимака, ласер ради са 2Hz (ПИВ резултати).

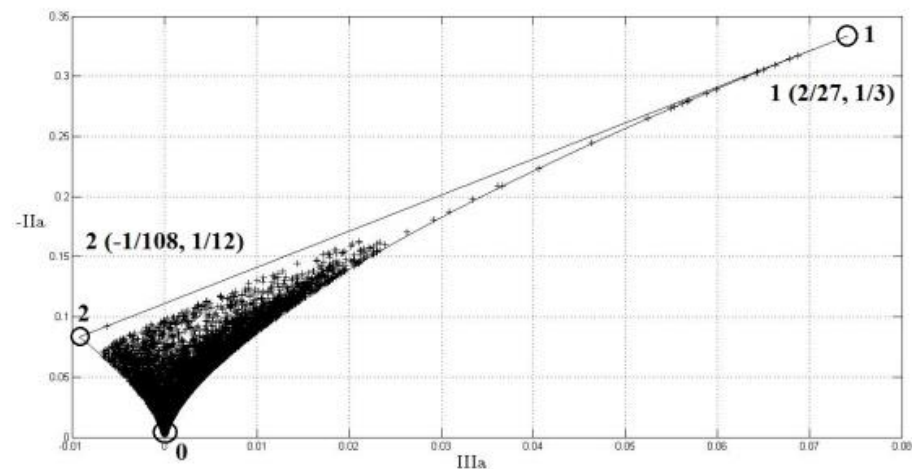


Поље осредњен вртложности у два мерна пресека.

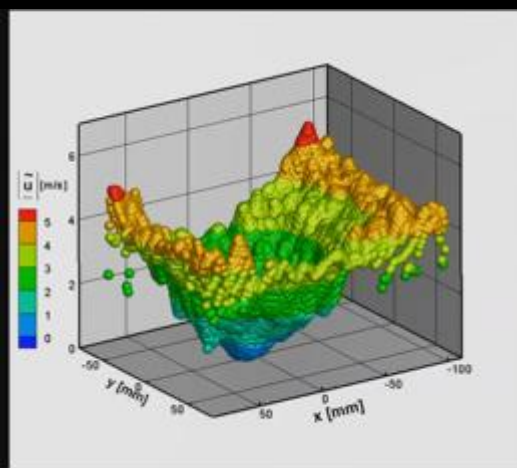
ПІВ систем са високом учестаношћу рада



Стерео ПІВ мерења помоћу брзих камера (1 и 2),
3-координатни систем, 4-турбомашина и 5-уводник

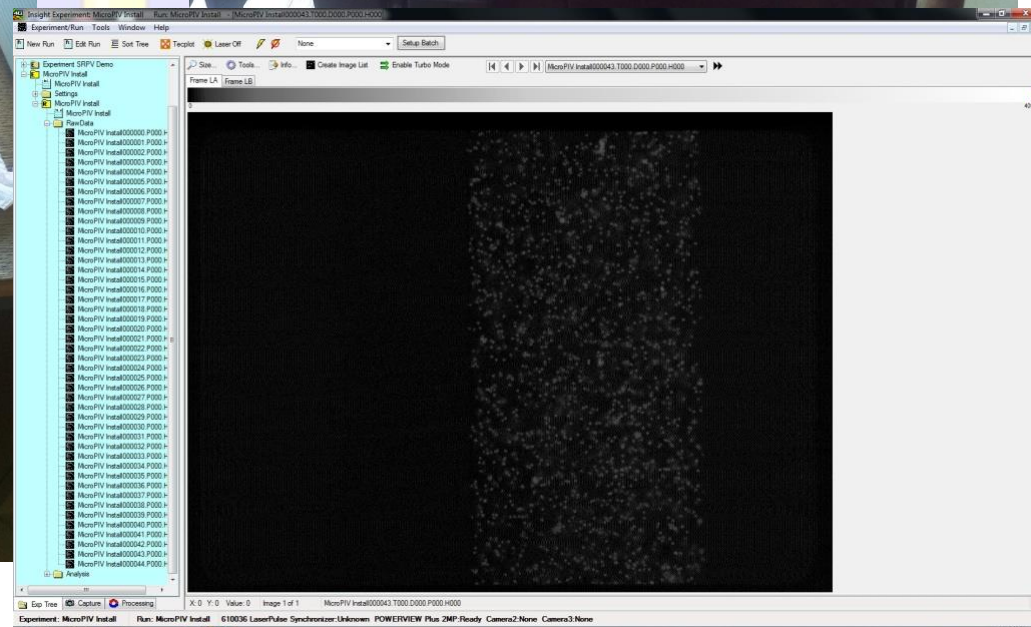
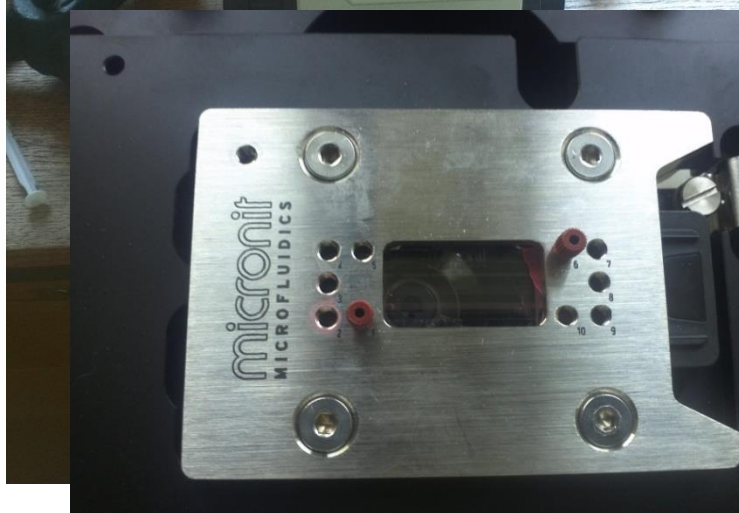
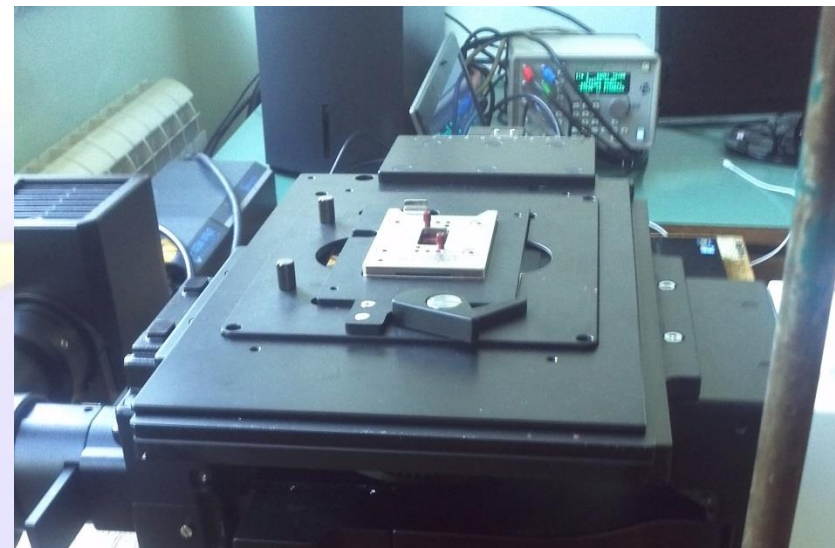


Инваријантне мапе – по први пут коришћење у ПІВ
Истраживањима на основу измерене све три компоненте





Микро ПИВ

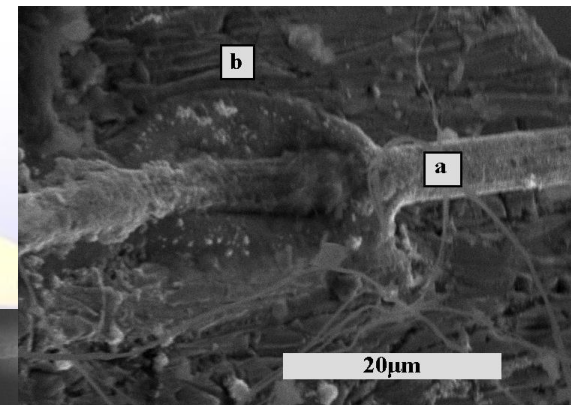
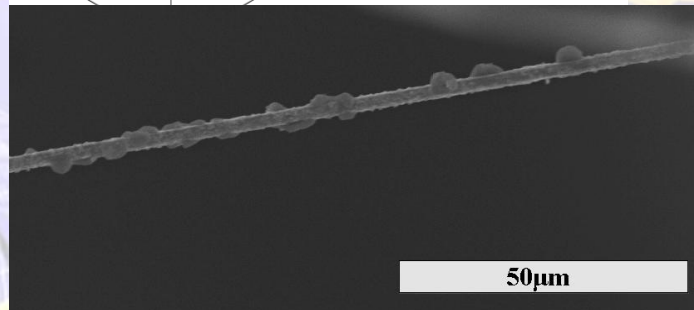
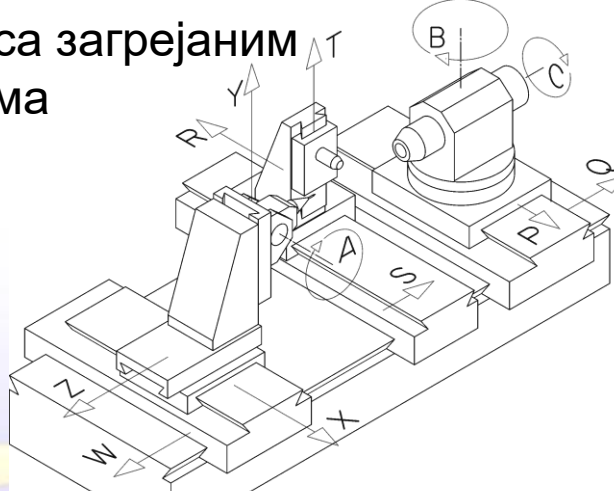




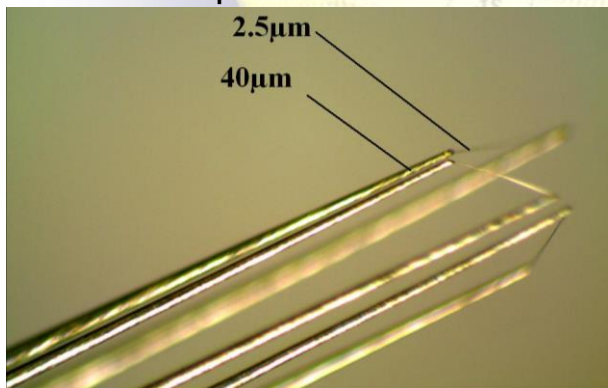
Сонде са загрејаним vlakнима



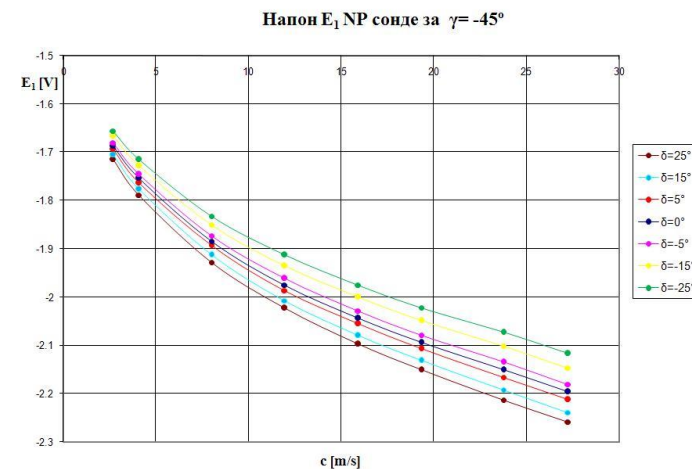
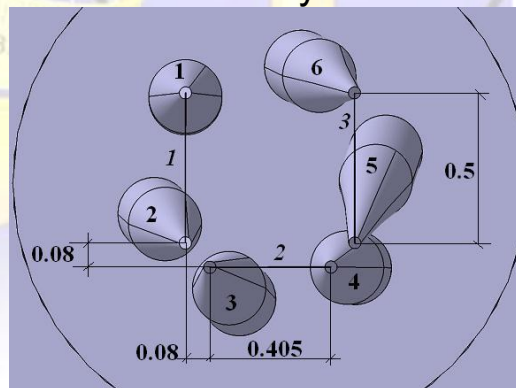
Уређај за репарацију мерних сонди са стерео микроскопом

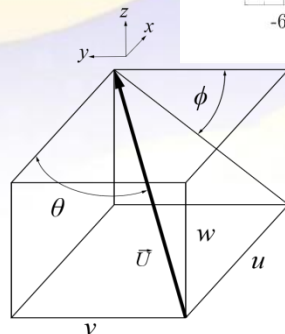
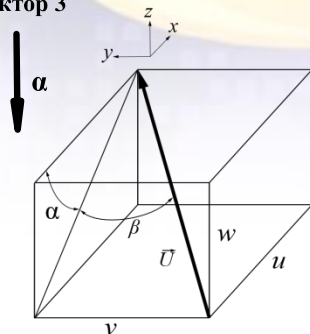
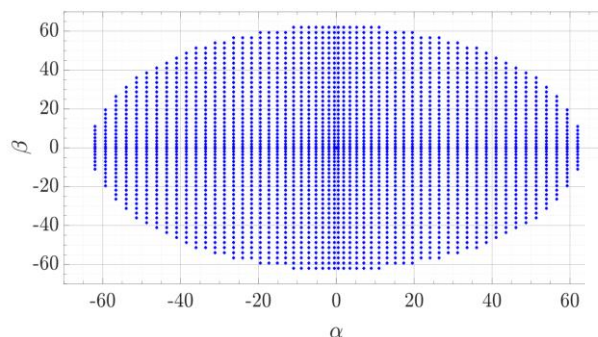
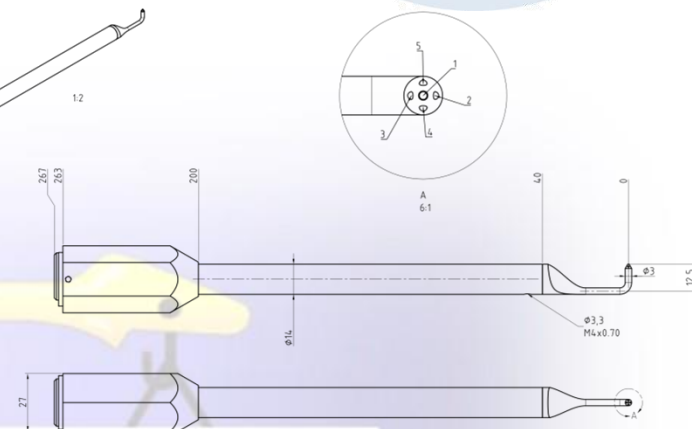
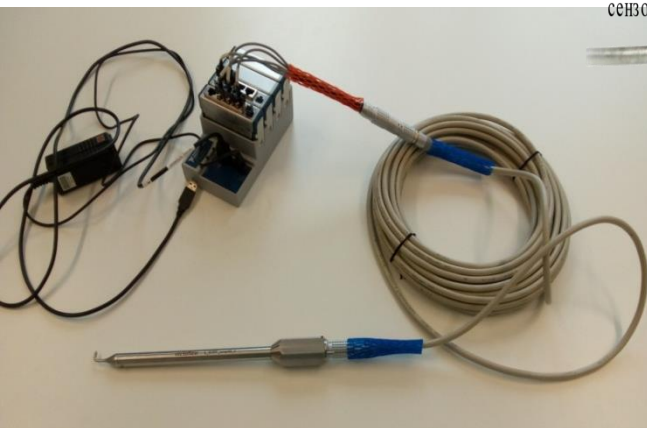
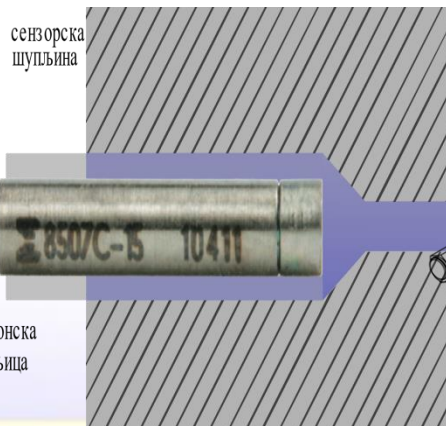


Изглед завареног споја:
а-сензор и б-носач.



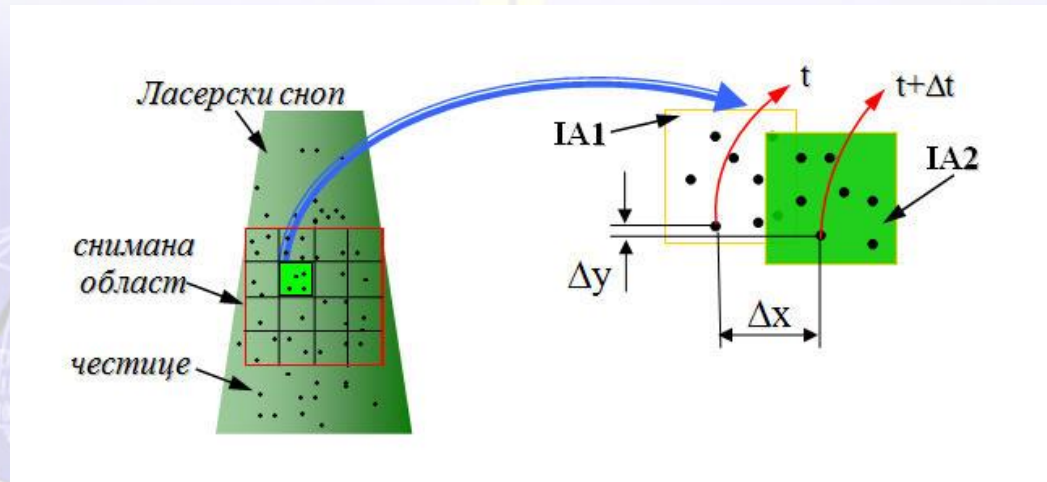
Геометрија сонде VP-NP: а) снимак сонде испод стерео микроскопа и б) распоред носача сензора.





Сонда са више рупица
и интегрисаном давачима притиска

Принципи стерео ПИВ мерења

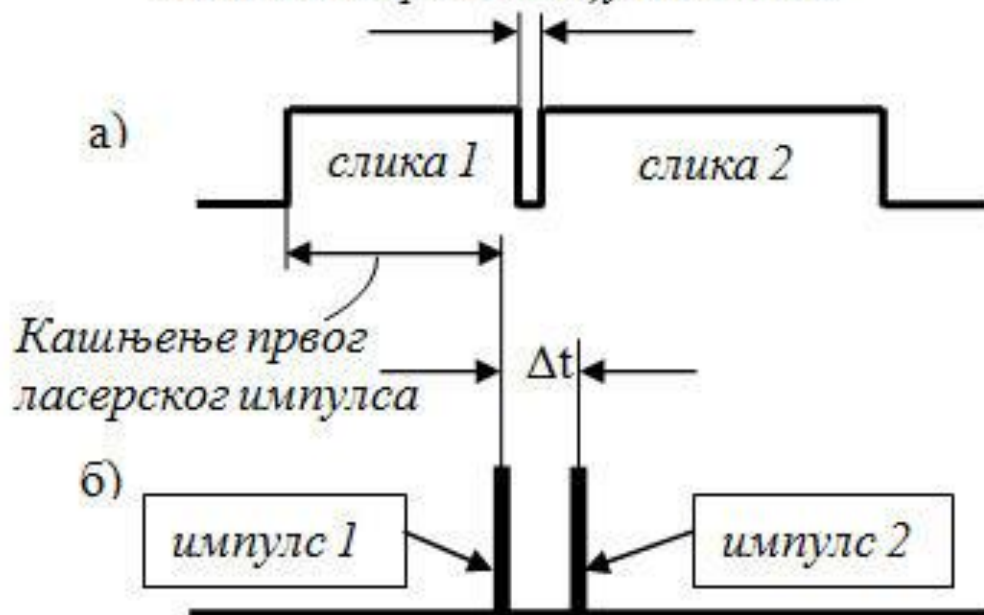


Приказ основних појмова за рад ПИВ система, где су: IA1, IA2 – елементарна прорачунска област (interrogation area) после првог, односно другог импулса ласера и Δt – време између два ласерска импулса.

За извођење успешног ПИВ експеримента од значаја су:

- адекватно просејавање флуидне струје (величина честица: 3 до 5 пиксела; број честица: 5-15 честица у IA),
- осветљавање жељеног простора,
- калибрација,
- фокусирање просејаних маркера,
- снимање довољно брзим камерама (максимално померање честица 25% од величине IA) и
- адекватна анализа снимка.

Минимално време између два снимка

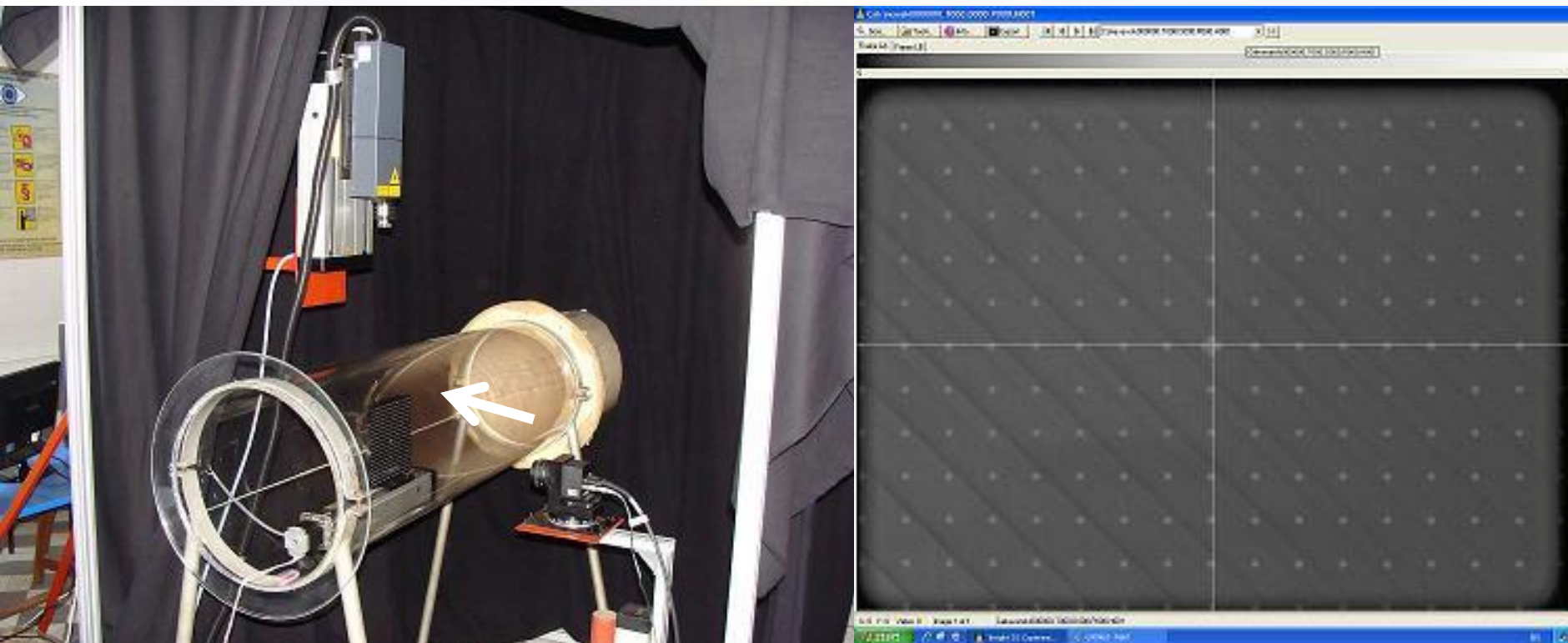


Режим	Δt [μs]	
	СПИВ	ТР ПИВ
n ₁	~75	~40
n ₂	~60	~60/50
n ₃	~40	~50/60
n ₄	~30	~40/30
n ₅	~15	~20/15

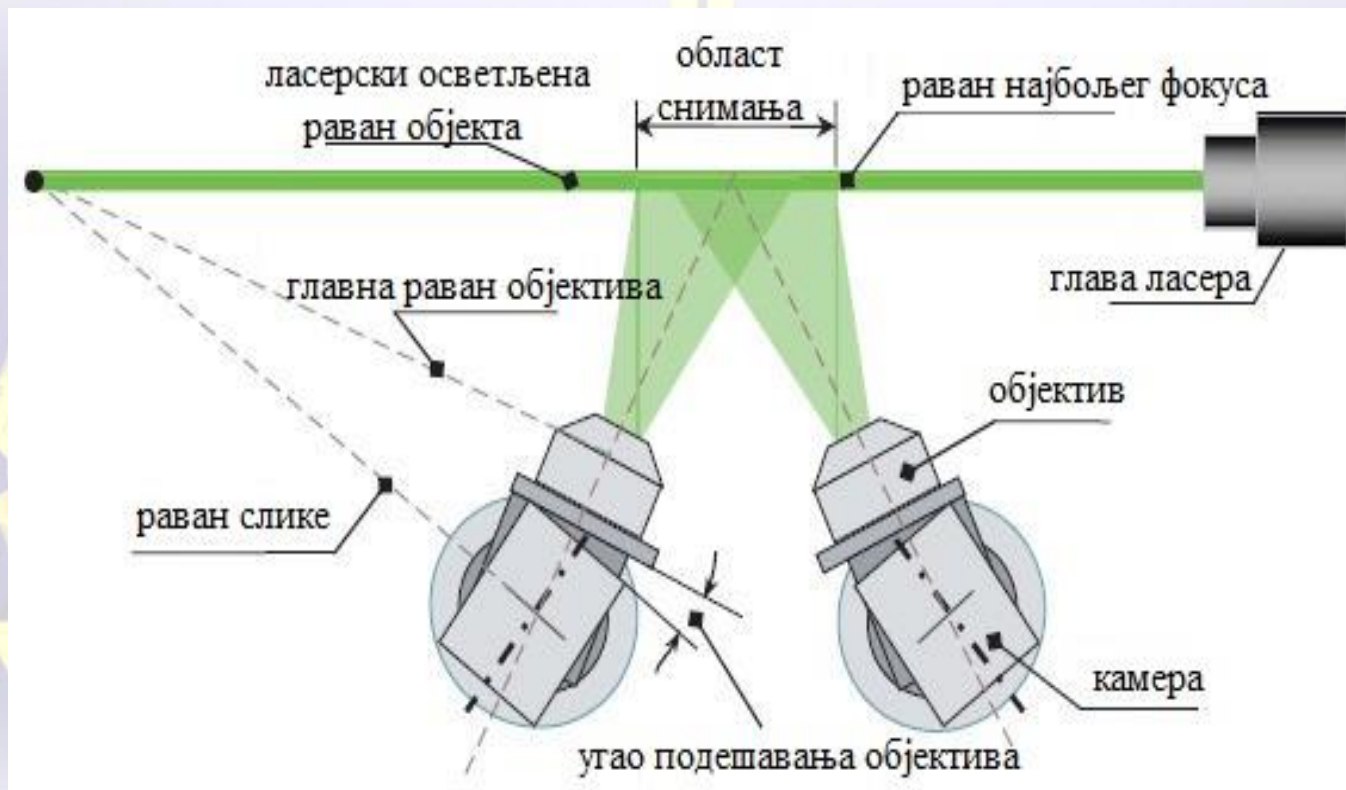
Метод снимања “frame-straddling”. Приказ дуж временске осе: а) експозиција камера и б) ласерски импулси.



Раванска ПИВ калибрација

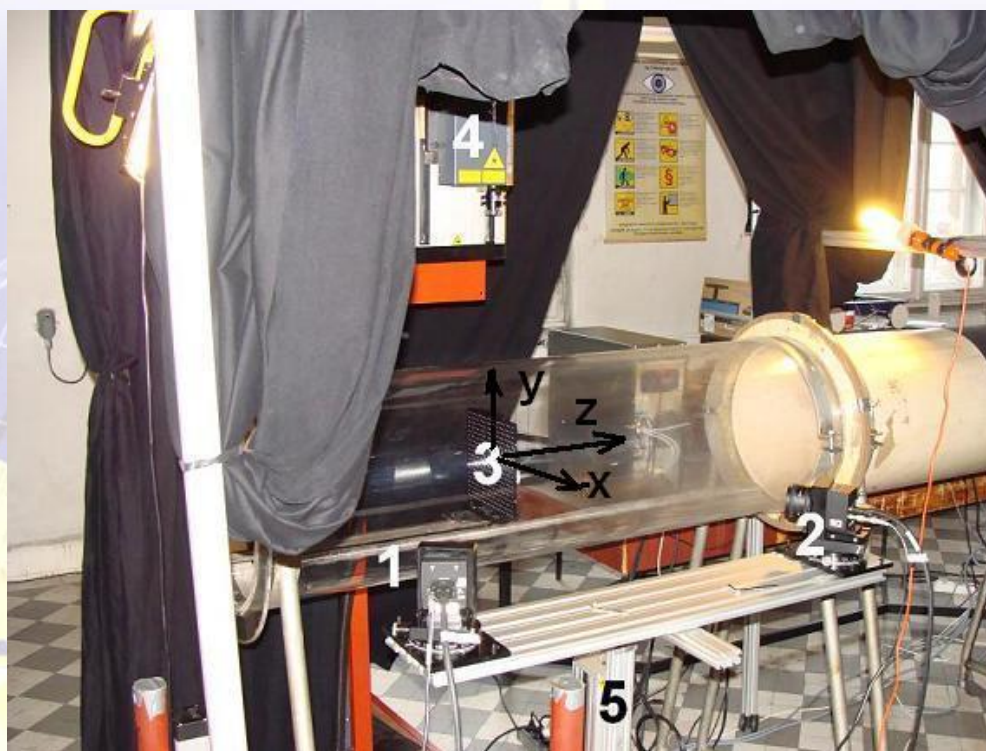


Сtereo ПИВ калибрација и мерења

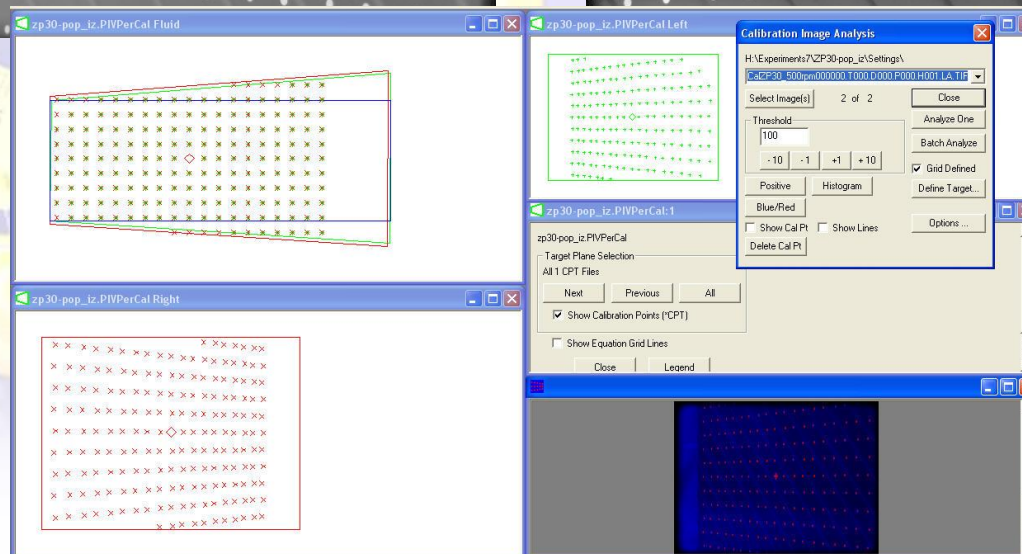
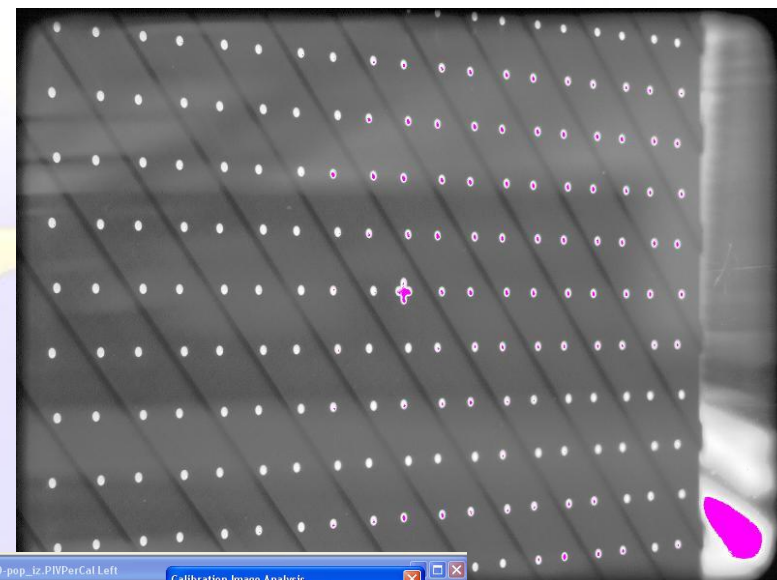
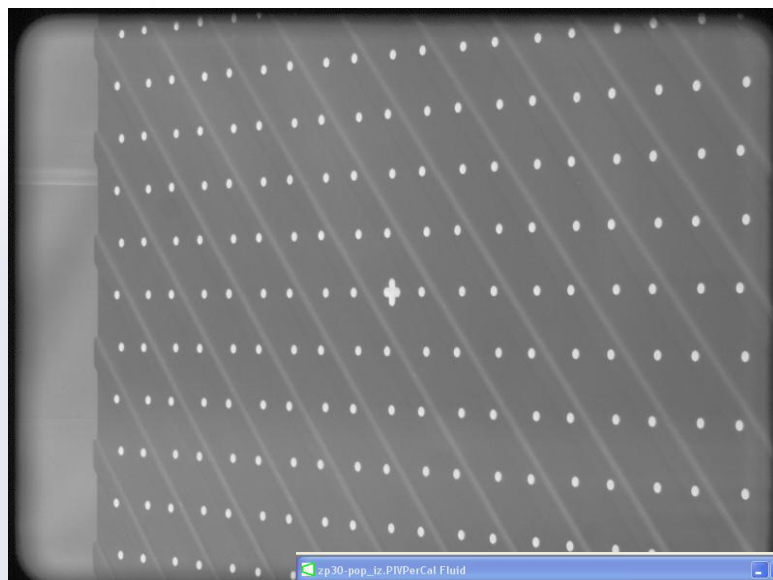


Sheimflug стерео поставка камера [1-3]

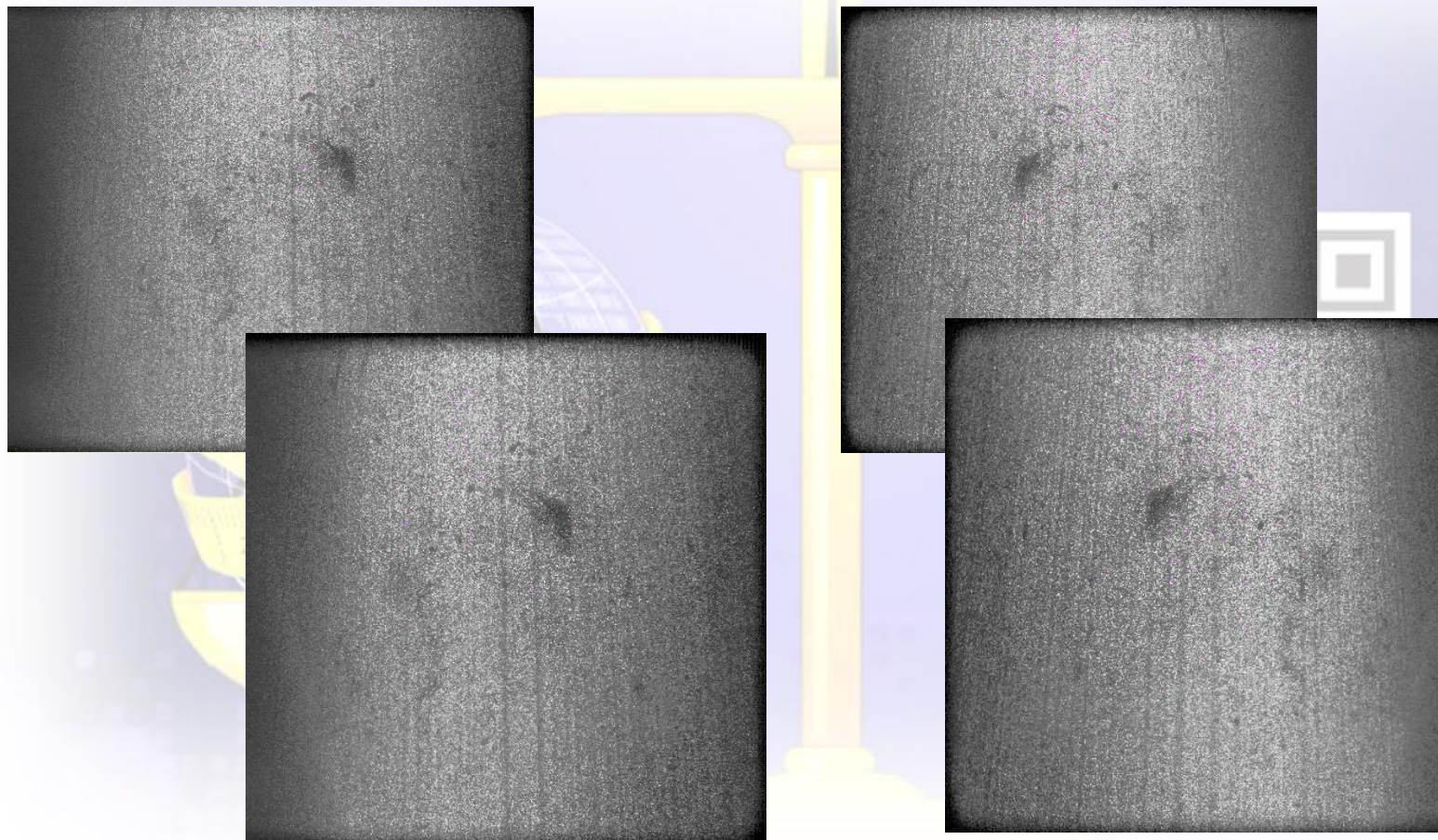
Стерео ПИВ калибрација



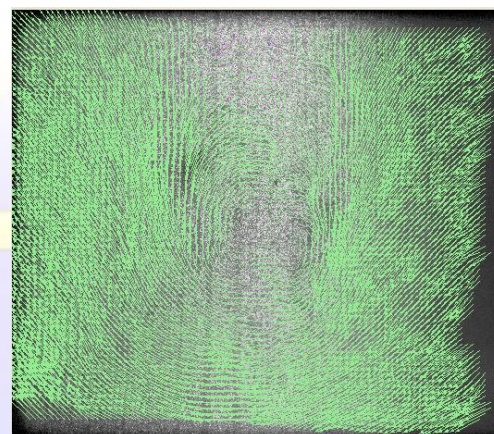
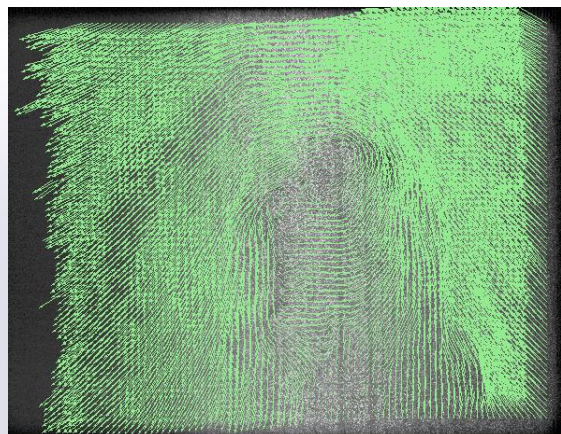
Поставка стерео ПИВ система у мерном пресеку 3: 1- лева CCD камера, 2- десна CCD камера, 3- мета, 4- Nd:YAG ласер, 5- “П”-носач за камере на компјутерски вођеној линеарној вођици.



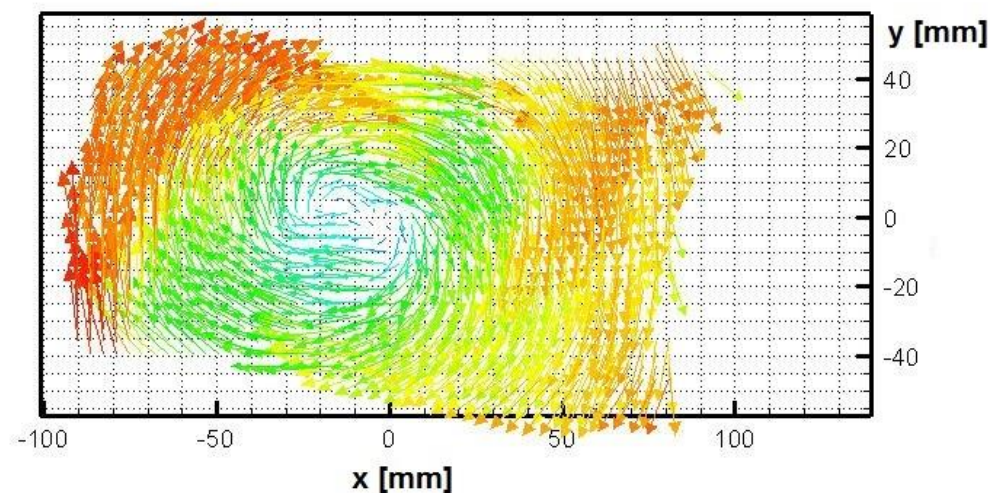
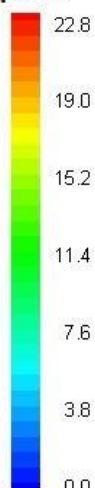
Снимак калибрационе мете са левом и десном камером, редом. Преклапање снимака.



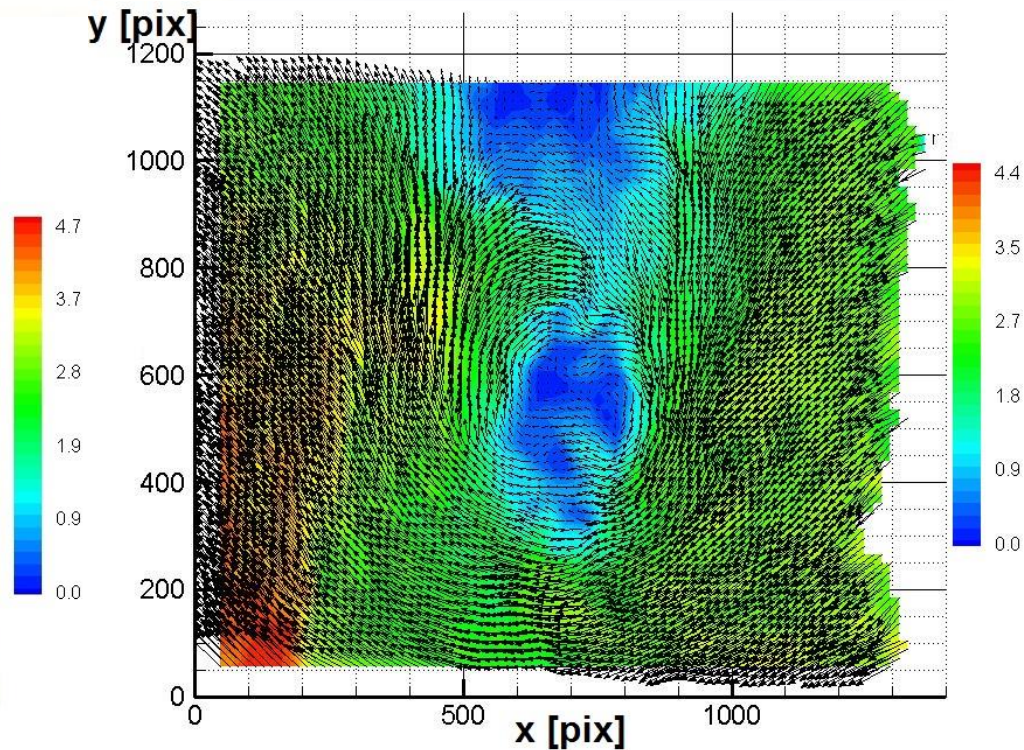
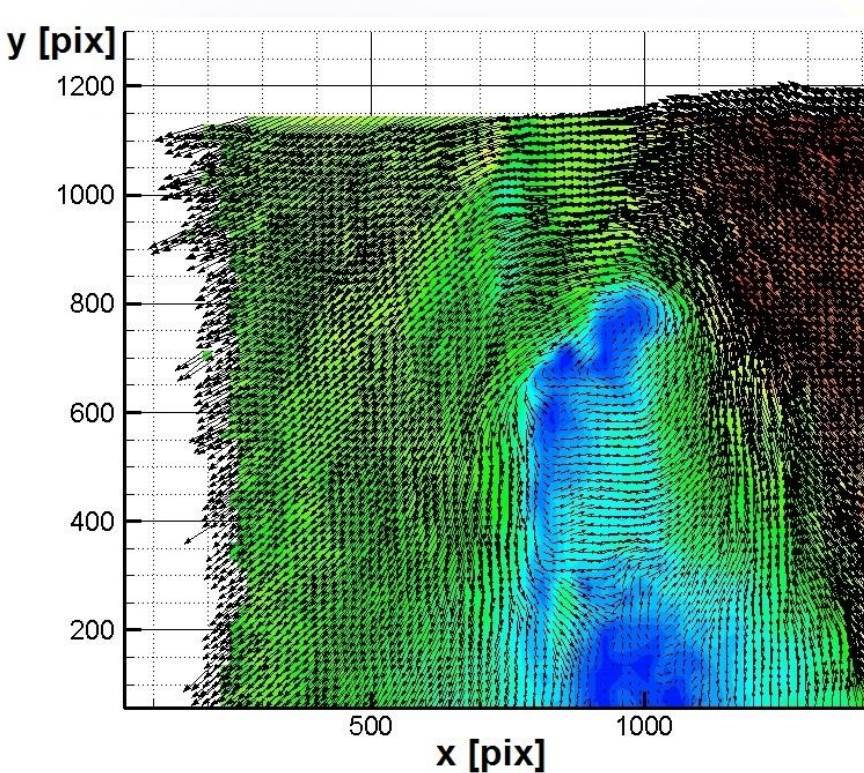
Корелациони снимци за леву и десну камеру.



$|\vec{u}| [m/s]$



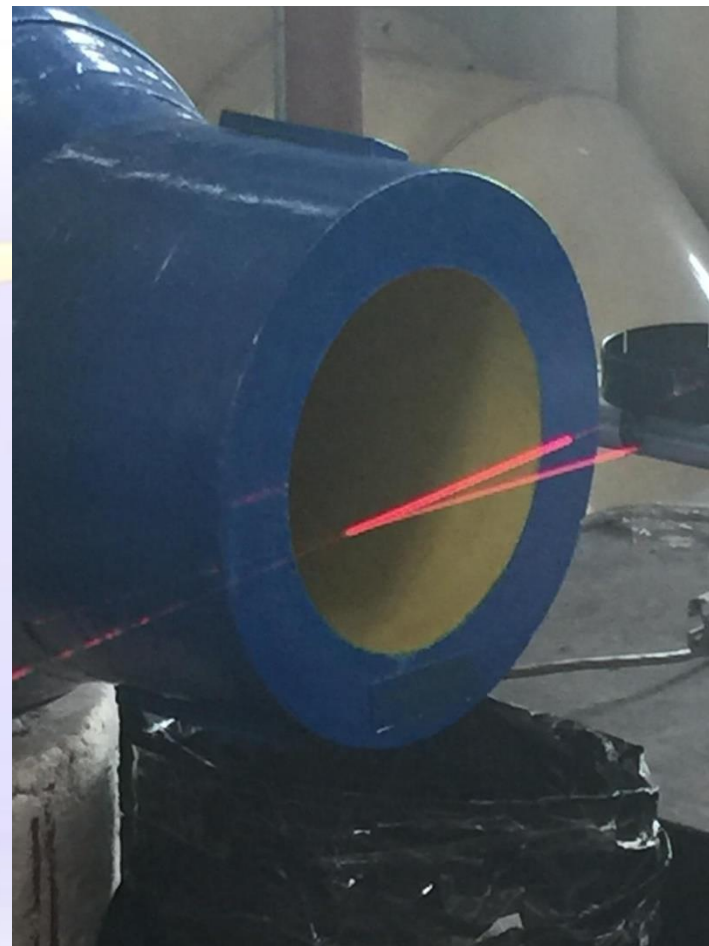
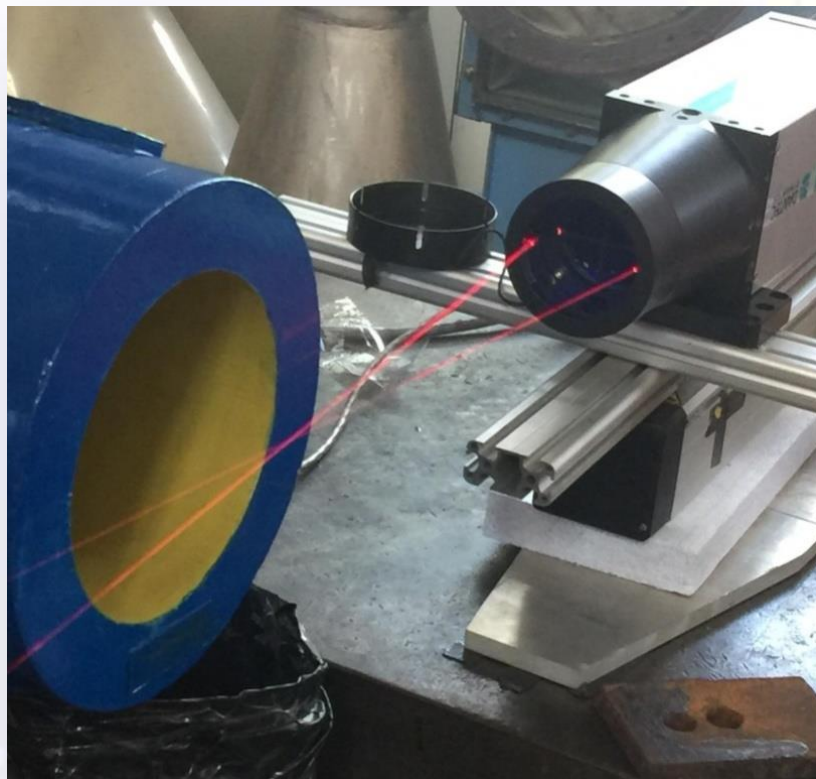
Приказ укупног поља брзине за, мерења у попречном пресеку.

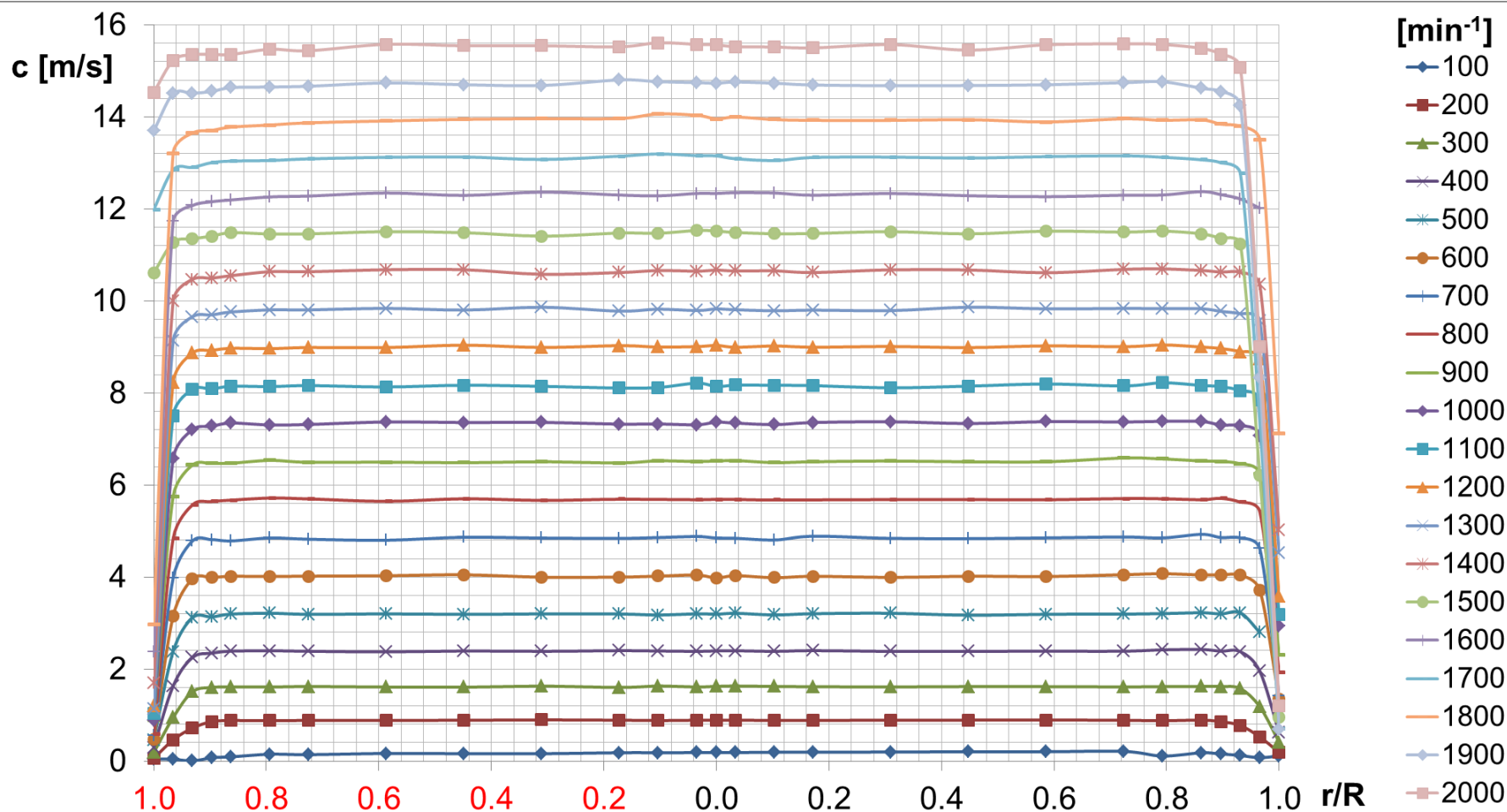


Вектори брзине у пикселима за леву и десну камеру, редом.



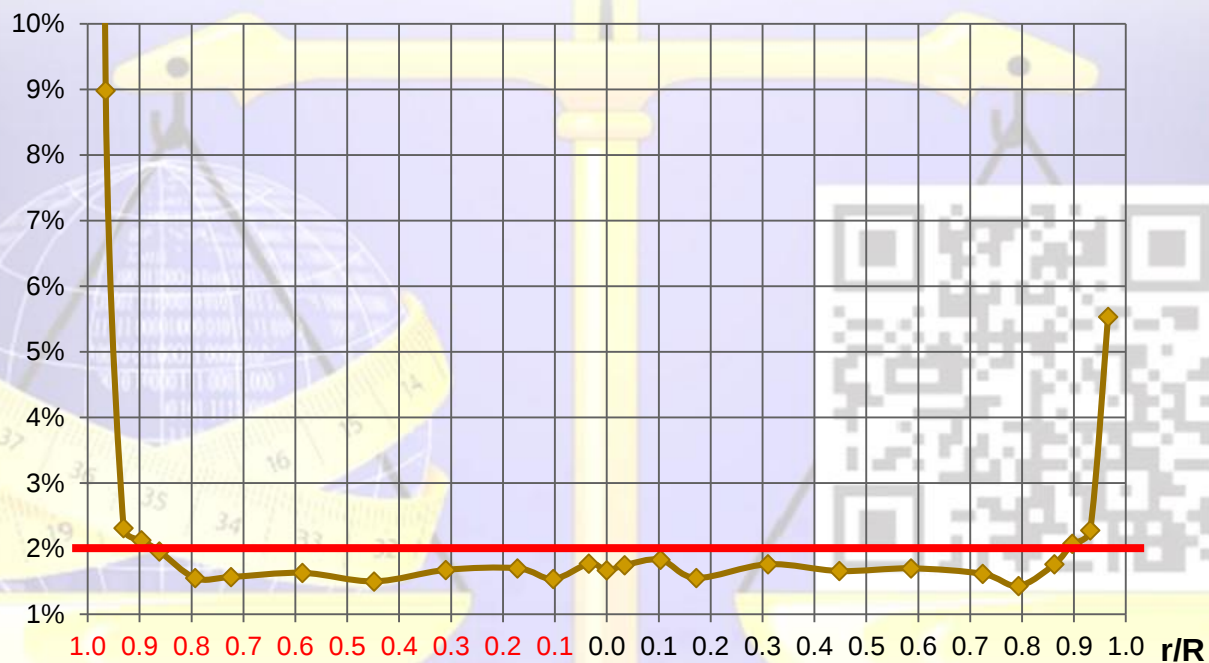
Мерење у млазу аеротунела помоћу ЛДА

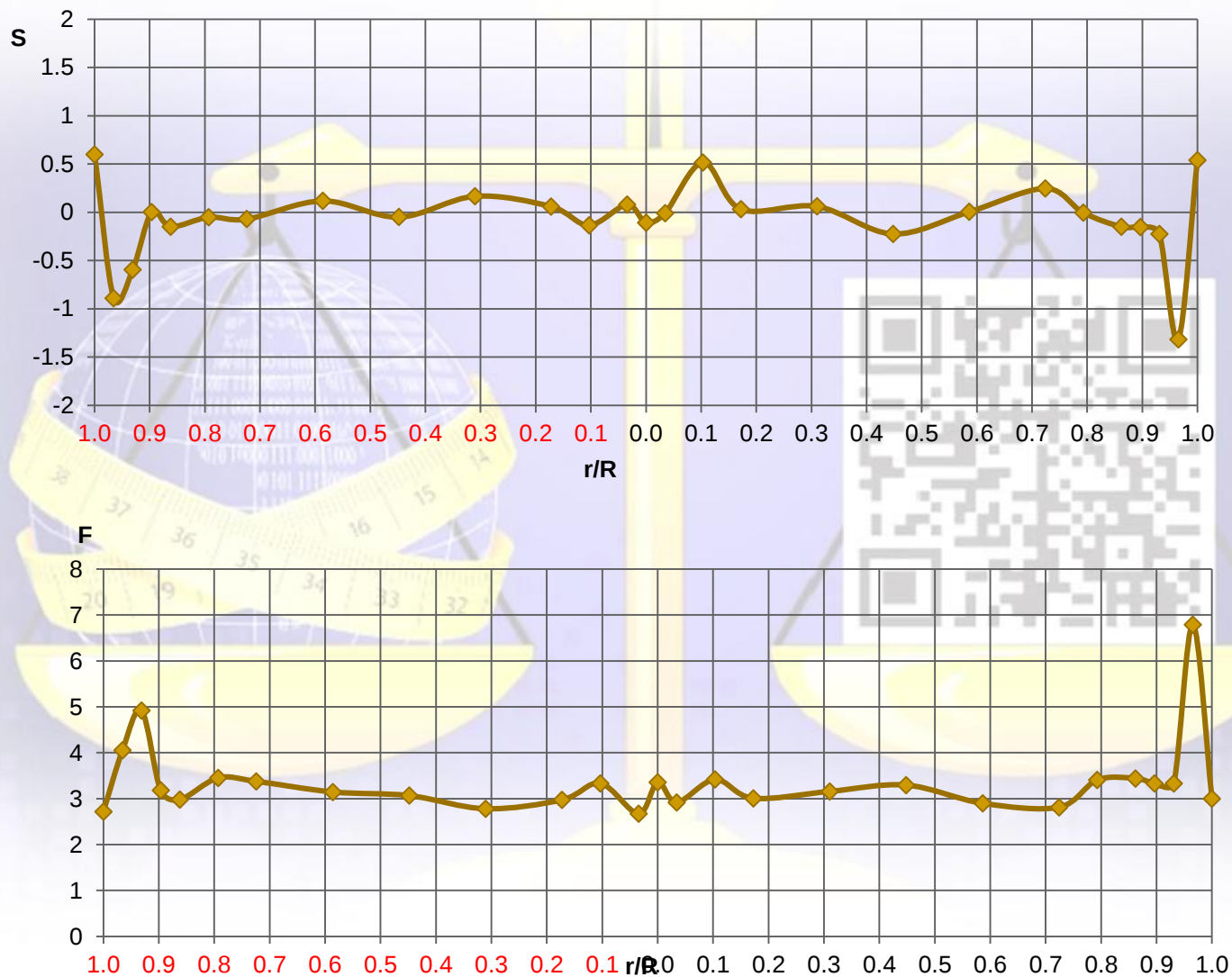






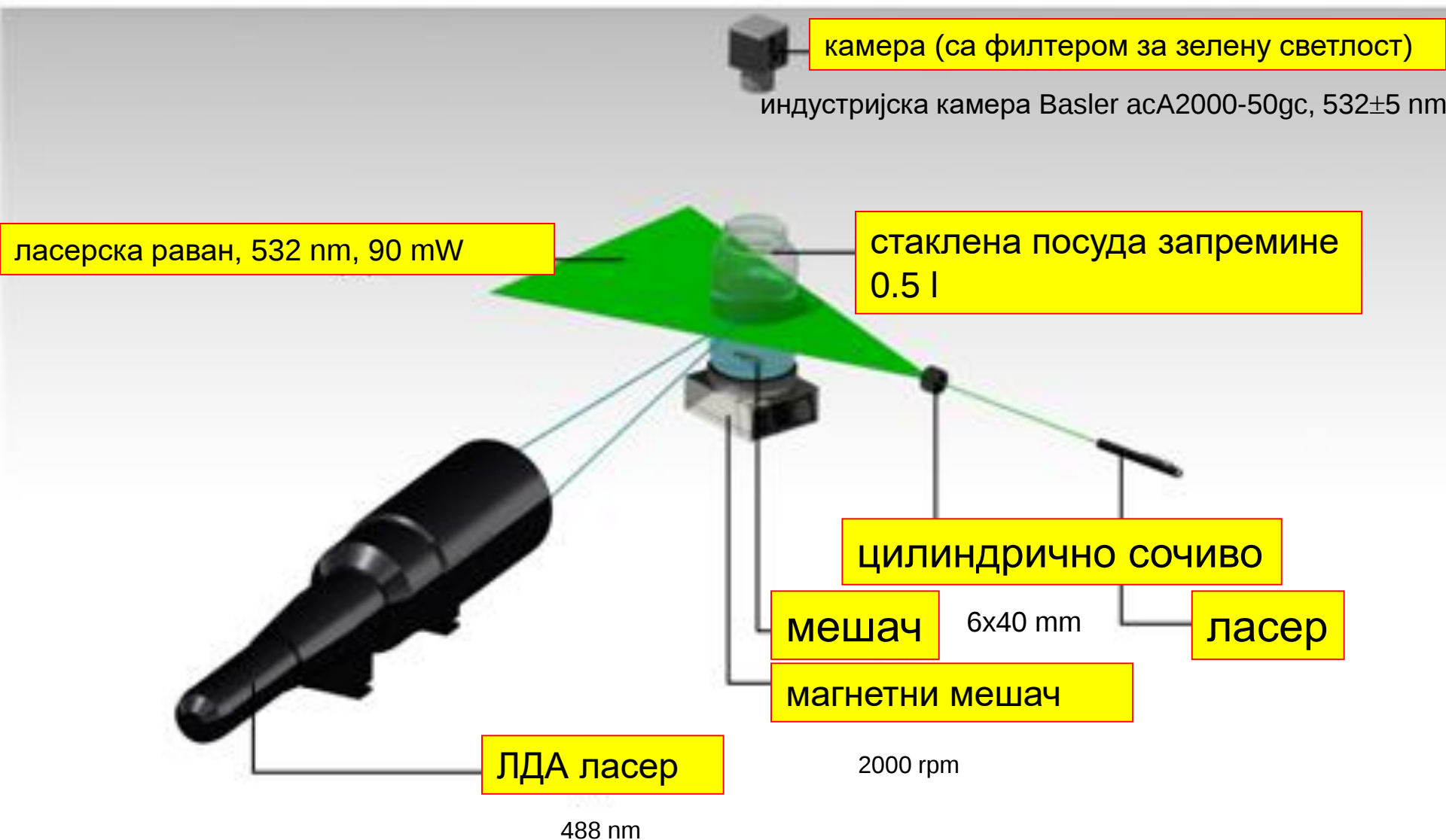
Ниво турбуленције [%]

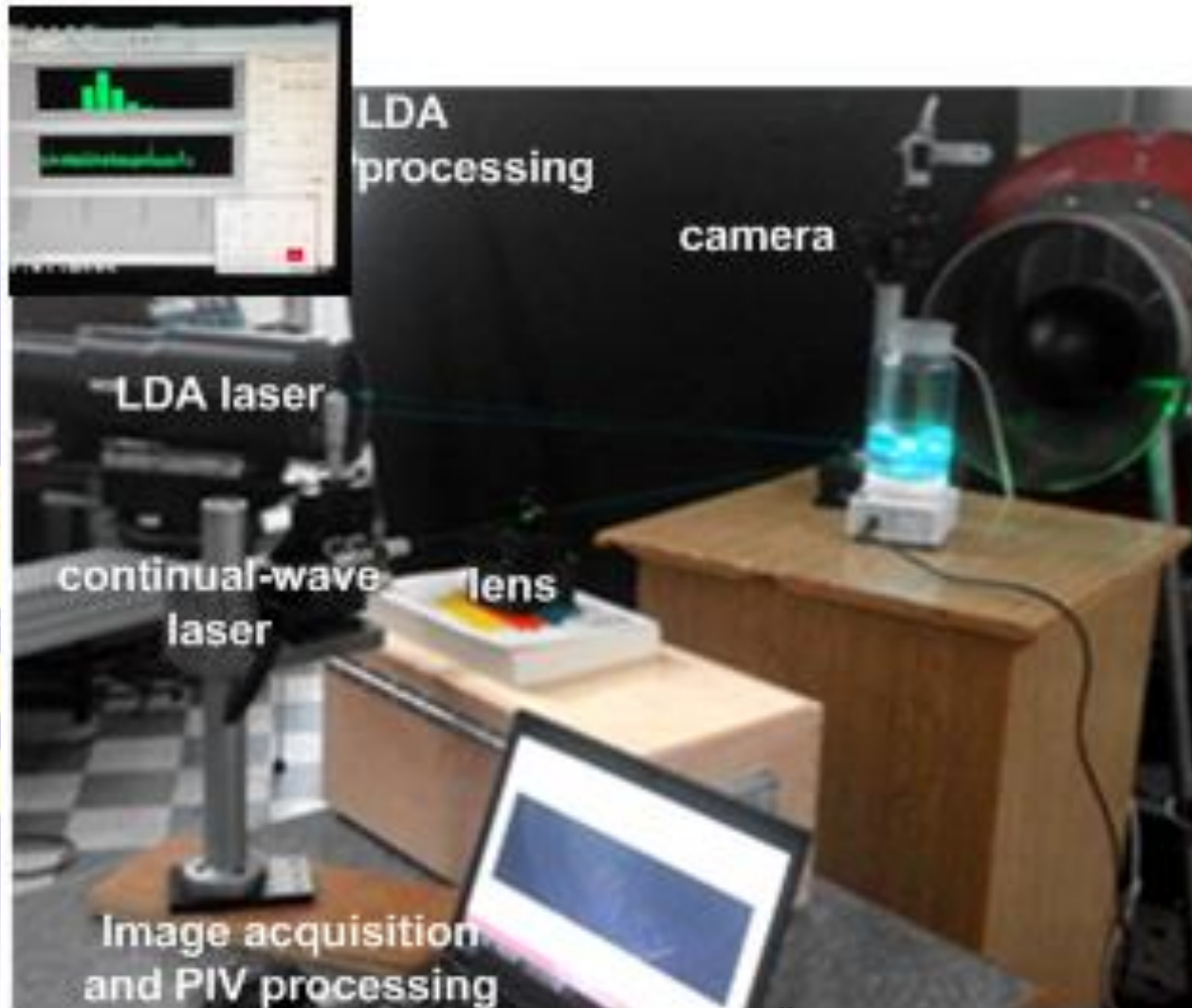




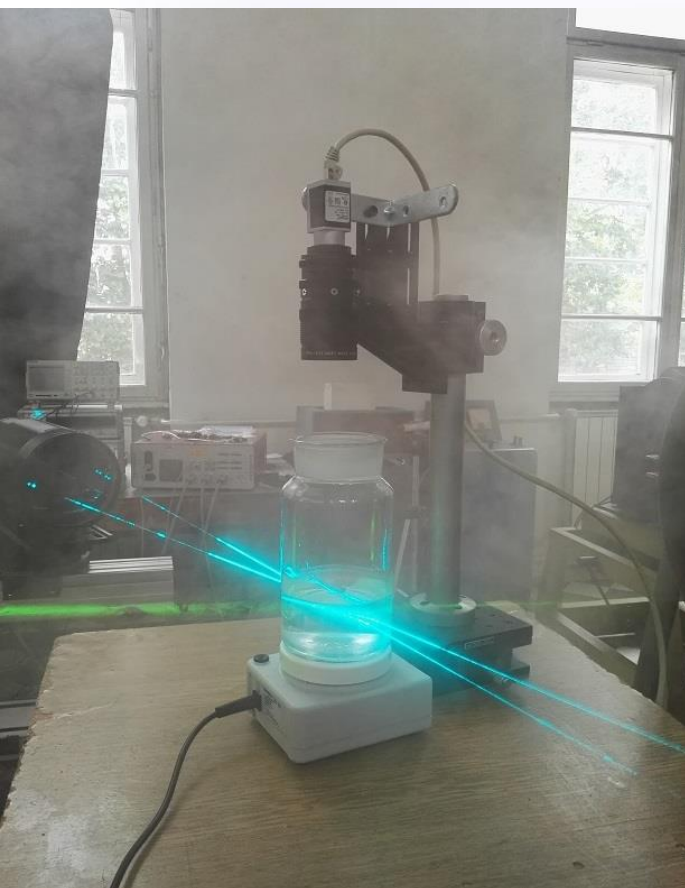


Пример поређења нискобуџетног ПИВ-а са ЛДА





Janković N.Z., Barjaktarović M.C., Janković M.M, Čantrak Dj.S. (2016): First Steps in New Affordable PIV Measurements, Proceedings of the 24th Telecommunications forum TELFOR 2016, Belgrade, 22-23, November, 2016 [4]



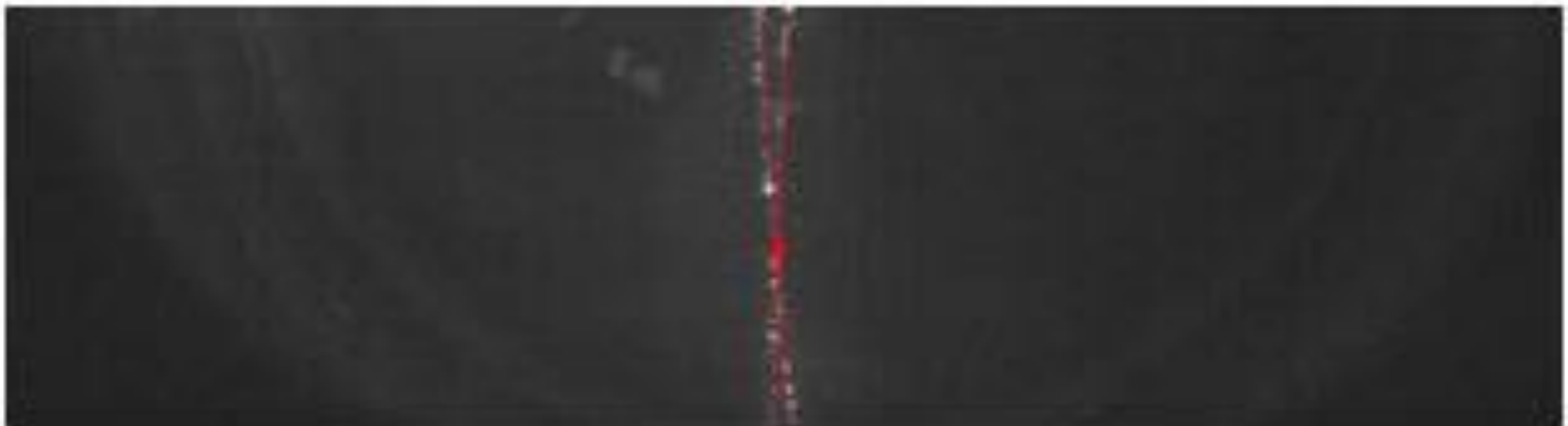


Калибрација

- Просторна калибрација – одређивање релације пиксели-дужина.



- Одређивање координате тачке где се брзина мери са две мерне методе (ПИБ и ЛДА)





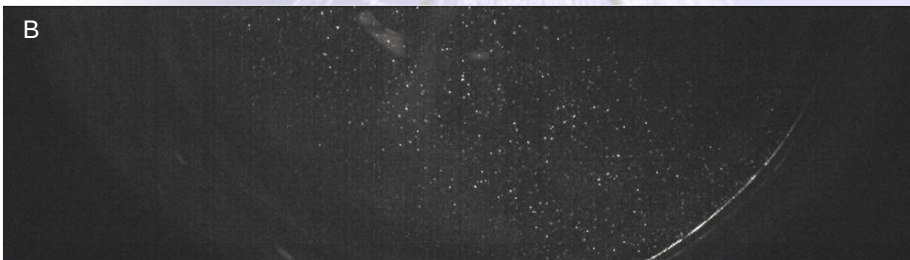
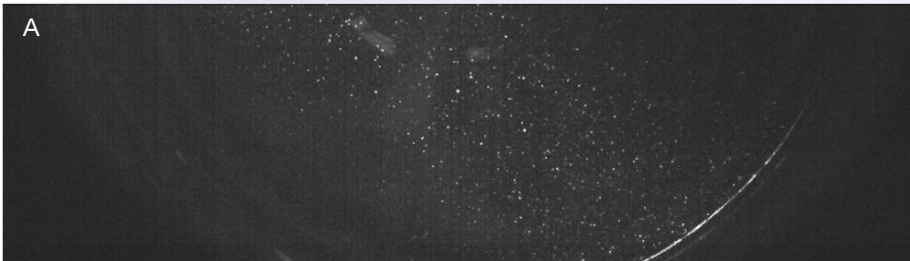
Коришћени софтвери

- Аквизиција слика
 - LabVIEW 15.0 (National Instruments, Texas)
 - NI Vision Acquisition Software
 - 1000x280, 200 fps
- Анализа слика
 - OpenPIV library for MATLAB

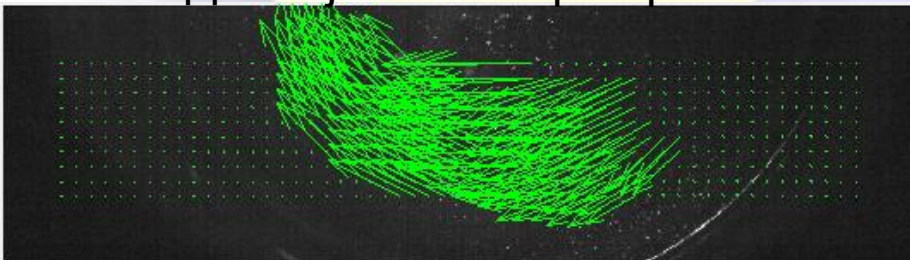




Два узастопна снимка



Добнијени вектори брзине



1. Препроцесирање слике:

- histogram equalization
- high-pass filtering
- intensity capping

2. Крос-корелација

$$C(m, n) = \sum_i \sum_j A(i, j) B(i - m, j - n)$$

A , B – две одговарајуће испитне области
из сукцесивно добијених слика



вектор максималног помераја



вектор брзине

3. Постпроцесирање

- интерполација и др.



Резултати

- Средње вредности брзине:

$$\bar{v}_{PIV} = 20.38 \text{ cm/s} \quad \bar{v}_{LDA} = 20.996 \text{ cm/s}$$

- Мерна несигурност типа А:

$$U_{A,PIV} = 0.25 \text{ cm/s} \quad U_{A,LDA} = 0.04 \text{ cm/s}$$

- Мерна несигурност типа В:

$$U_{B,PIV} = 0.08 \text{ cm/s} \quad U_{B,LDA} = 0.02 \text{ cm/s}$$

- Укупна мерна несигурност:

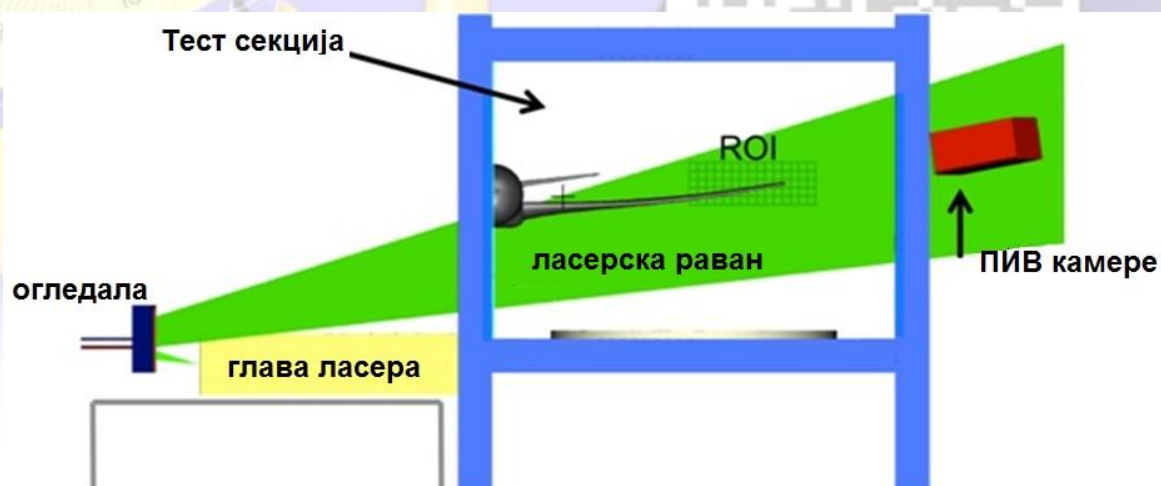
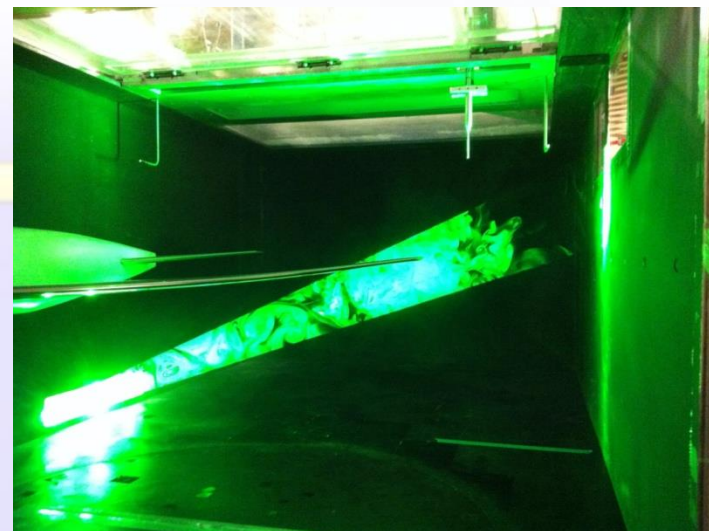
$$U_{PIV} = 0.26 \text{ cm/s} \quad U_{LDA} = 0.05 \text{ cm/s}$$

- Исказивање резултата брзине:

$$U_{PIV} = 20.4 \pm 0.3 \text{ cm/s}$$

$$U_{LDA} = 21.0 \pm 0.05 \text{ cm/s}$$

Истраживање вртлога иза крила авиона – модел CRM



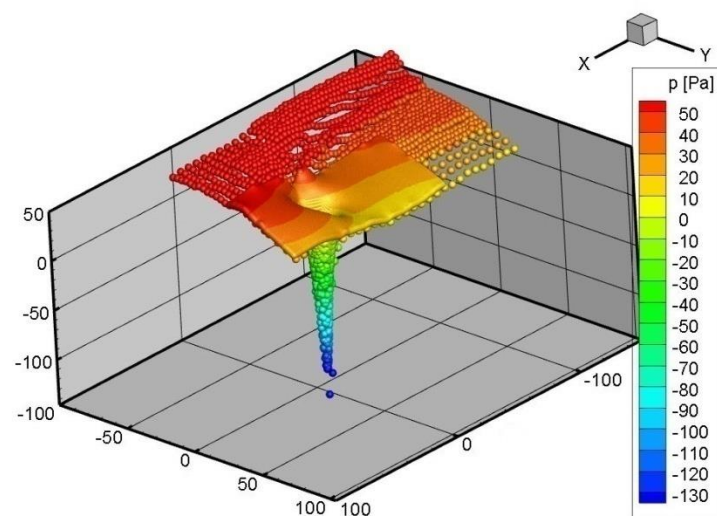
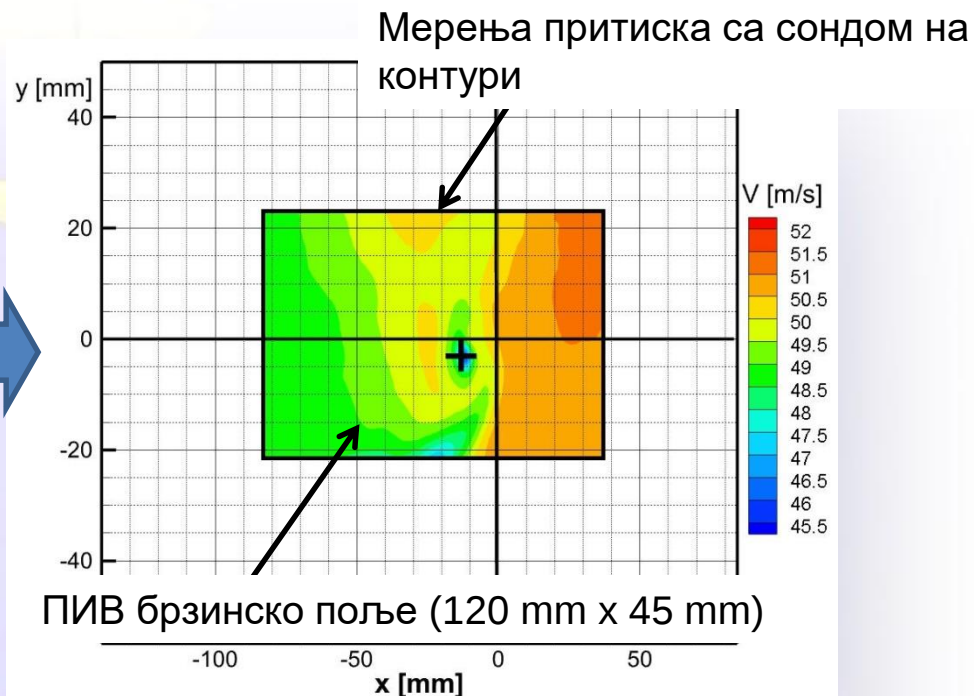
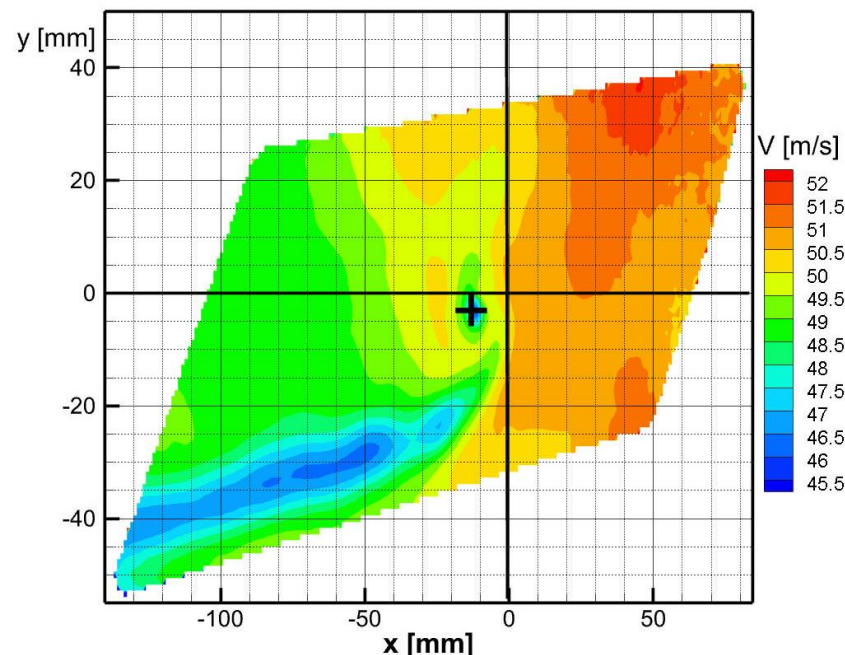


Једначина количине кретања за нестишљиво струјање [5]:

$$\nabla p = -\rho \left\{ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \nu \nabla^2 \mathbf{u} \right\} \quad (1)$$

$$\nabla_{xy} \cdot \nabla p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = -\rho f_{xy} \quad (2)$$

$$f_{xy} = f_{2D} + f_{3D} = \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} + \left\{ \frac{\partial (\nabla_{xy} \cdot \mathbf{u})}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) (\nabla_{xy} \cdot \mathbf{u}) + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \quad (3)$$



Резултат примене модификоване ј-не (3) због коришћења осредњеног поља притиска, брзине и Рејнолдсових напона.



САРАДЊА СА ДРУГИМ ИНСТИТУЦИЈАМА У ОБЛАСТИ АНЕМОМЕТРИЈЕ:

1. ФАКУЛТЕТИ И НАУЧНИ ИНСТИТУТИ У РЕПУБЛИЦИ СРБИЈИ и ЦРНОЈ ГОРИ
2. ВОЈНОТЕХНИЧКИ ИНСТИТУТ, БЕОГРАД
3. ПРИВРЕДНИ СУБЈЕКТИ У РЕПУБЛИЦИ СРБИЈИ И ХОЛАНДИЈИ
4. KARLSRUHE INSTITUTE OF TECHNOLOGY
5. NASA AMES, FLUID MECHANICS LABORATORY
6. STANFORD UNIVERSITY, CENTER FOR TURBULENCE RESEARCH
7. TECHNICAL UNIVERSITY, CLAUSTHAL
8. DLR, GÖTTINGEN
9. UNIVERSITY OF GRANADA
10. UNIVERSITY CARLOS III DE MADRID
11. CZECH METROLOGY INSTITUTE





ЛИТЕРАТУРА

- [1] Liu, Z., Zheng, Y., Jia, L., Jiao, J., Zhang, Q. STEREO SCOPIC PIV STUDIES ON THE SWIRLING FLOW STRUCTURE IN GAS CYCLONE, Chemical Engineering Science, Vol. 61, pp. 4252-4261, 2006.
- [2] Чантрак Ђ. Анализа вртложног језгра и структуре турбуленције у правој цеви кружног попречног пресека иза кола аксијалних вентилатора применом PIV, LDA и HWA метода, Докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 2012.
- [3] Чантрак Ђ. С. Истраживање турбулентног Ранкиновог вртлога у цеви иза кола аксијалног вентилатора применом оптичких (ПИБ и ЛДА) мерних метода и визуализације, Научнотехничке информације: монографска серија, Вол. 59, бр. 1, Војнотехнички институт, Београд, ISSN 1820-3418, ISBN 978-86-81123-84-3, 2022.
- [4] Janković N.Z., Barjaktarović M.C., Janković M.M, Čantrak Dj.S. (2016): First Steps in New Affordable PIV Measurements, Proceedings of the 24th Telecommunications forum TELFOR 2016, Belgrade, 22-23, November, 2016 <http://ieeexplore.ieee.org/document/7818896/>.
- [5] de Kat R., van Oudheusden B.W. Instantaneous planar pressure determination from PIV in turbulent flow. *Exp Fluids* 2012; 52: 1089–1106.