

# Турбуленција у атмосфери

Жељко Цимбаљевић<sup>1</sup>, Марко Милошевић<sup>1</sup>, Ивана Васиљевић<sup>2</sup>, Владимир Марковић<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Природно-математички факултет, Универзитет у Крагујевцу*  
<sup>2</sup>*ОШ Живан Маричић, Краљево*

**Апстракт.** Турбуленција је хаотично и неправилно кретање флуида различитих врста. Ваздух који сачињава атмосферу је стишљив флуид и подложен турбуленцији. То значи да турбуленција игра кључну улогу у обликовању динамике и понашања Земљине атмосфере. У раду ће бити речи о томе како турбуленција утиче на атмосферу и климу и зашто компликује покушаје метеоролошких предвиђања. Како се ђаци у средњим школама сусрећу са динамиком флуида у физици, а са друге стране са метеорологијом у географији, овај рад ће дати једну од значајних веза између физике и географије. Такође, рад ће дати увид ђацима зашто је турбуленција један од главних фактора који утичу да временска прогноза погрешни у предвиђању. На крају рада биће приказан и оглед који сликовито приказује турбулентно кретање ваздуха.

Кључне речи: турбуленција, механика флуида, метеорологија, атмосфера.

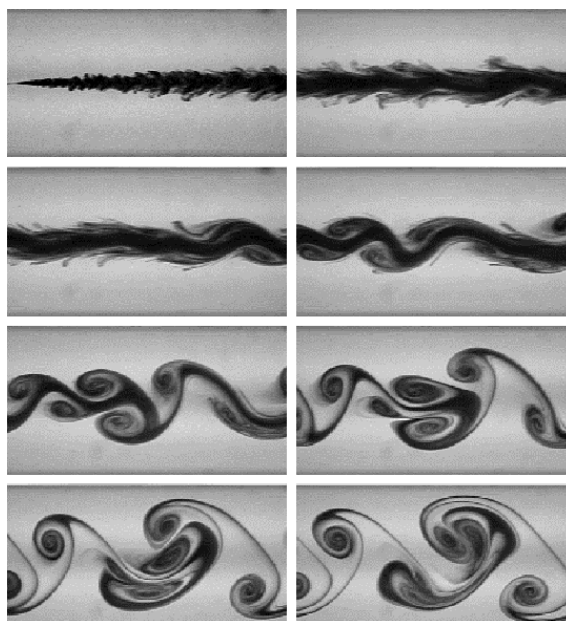
## УВОД

Још у другом разреду средње школе ђаци на часовима физике уче о динамици флуида, док на часовима географије уче о метеорологији и атмосфери. Међутим већином се градиво о флуидима заснива на ламинарном кретању нестишљивих флуида и турбуленција је само кратко споменута. Ово је са разлогом јер, турбуленција захтева знање напредне математике и притом још није потпуно решен проблем [1]. Ипак, турбуленција је саставни део многих процеса, и зато ће у овом раду бити дат њен кратак опис, као и њен утицај на временске прилике и временску прогнозу.

## ТУРБУЛЕНЦИЈА

Турбуленција се дефинише као хаотично и непредвидиво кретање флуида уз формирање димензионалних или тродимензионалних вртлога [2]. Ови вртлози се при кретању могу трансформисати у веће вртлоге и спајати са другим вртлозима или раздвојити на више мањих вртлога. Управо њихово непредвидиво понашање доводи до тога да се турбуленција тешко описује.

Жељко Цимбаљевић, Марко Милошевић, Ивана Васиљевић, Владимир Марковић



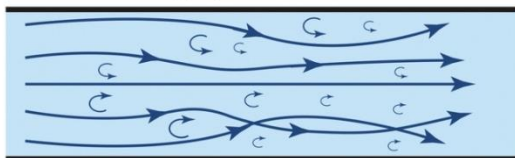
Слика 1. Формирање и развој вртлога у турбулентном току [2].

Турбуленција настаје када на флуид у миру делује спољашња сила која га избацује из равнотеже [3]. Турбуленција може да се јави у скоро било ком флуиду, као нпр. у ваздушним струјама, у брзим рекама, па чак и у протоку крви [4]. Људима је најпознатији ефекат турбуленције, када авион прође кроз део ваздуха који је турбулентан, и тада може осетити труцкање и љуљање авиона. Што је турбуленција више изражена, више је изражено труцкање авиона [1].

#### Ламинарни ток



#### Турбулентни ток



Слика 2. Разлика између ламинарног и турбулентног кретања флуида [5].

Степен турбулентности флуида је у физици најчешће дефинисан Рејнолдсовим бројем [1,3]

$$Re = \frac{\rho * v * L}{\mu}, \quad (1)$$

Где је  $\rho$  густина флуида,  $v$  карактеристична брзина флуида,  $L$  карактеристична димензија флуида (нпр. у случају протока флуида кроз цев, пречник цеви), а  $\mu$  је вискозност флуида. За Рејнолдсов број реда величине  $\sim 1$  ток флуида се сматра ламинарним, док за  $\sim 1000$  ток флуида се сматра турбулентним (најчешће се узима преко 4000 као граница турбуленције) [6]. Између се налази прелазна фаза коју карактерише мешавина турбулентног и ламинарног тока.

## ТУРБУЛЕНЦИЈА У АТМОСФЕРИ

Турбуленција, као што је већ речено се јавља и у атмосфери. Међутим кретање ваздуха је у неким деловима и неким тренуцима у атмосфери приближно ламинарно, некада турбулентно, а некада у прелазној фази што додатно отежава предвиђања.

Атмосферска турбуленција у доњем слоју атмосфере разликује се од оне на већим висинама. На ниским надморским висинама (на неколико стотина метара од површине тла), турбуленција има изражену дневну варијацију под делимично облачним и сунчаним небом, достижући максимум око поднева. То се дешава јер, Сунчево зрачење загрева површину земље, а услед загрејане површине и ваздух изнад тла постаје топлији и лакши, са друге стране хладнији и гушћи ваздух покушава да се спусти испод топлог. Резултирајуће вертикално кретање ваздуха, заједно са поремећајима у протоку око површинских препрека, чини ветрове на ниским висинама изузетно неправилним [3,7]. Ноћу се површина брзо хлади, и услед тога се ваздух близу земље такође хлади; када тај ваздух постане хладнији од ваздуха изнад њега, формира се стабилна температурна расподела. Тада брзина ветра опада и нагле промене јачине ветра се ређе дешавају. Када је небо облачно, ниске температуре ваздуха варирају много мање између дана и ноћи, тад турбуленција остаје готово константна. На висинама од неколико хиљада метара или више, утицај трења површине земље на ветар је знатно смањено, и карактеристична турбулентност нижег слоја атмосфере је одсутна. Иако су ветрови на вишим нивоима обично релативно правилни, управо они понекад постану довољно турбулентни да утичу на авио-саобраћај [3,7]. Вртлози који настају на мањим висинама услед турбуленције су тродимензионалне природе и малих димензија, док на великим висинама вртлози су дводимензионалне природе и великих димензија [1,3].

Метеоролози узимају информације прикупљене са метеоролошких станица, затим користе нумеричке моделе који дају предвиђања временских прилика у будућем тренутку. Ови модели међутим нису савршено прецизни и имају ограничену количину података, због тога они не могу увек да предвиде тачно време, јер не могу увек да узму у обзир мање вртлоге и флукуације, а у природи турбуленције је да и мале флукуације могу да утичу на макроскопске појаве [4]. Тако мали вртлог који је занемарен у почетку не мења много слику времена, али како време пролази он постаје већи и те промене модел не обухвата, јер га није урачунао у старту. На тај начин, чак и ако у првих пар дана предвиђања буду

Жељко Цимбаљевић, Марко Милошевић, Ивана Васиљевић, Владимир Марковић

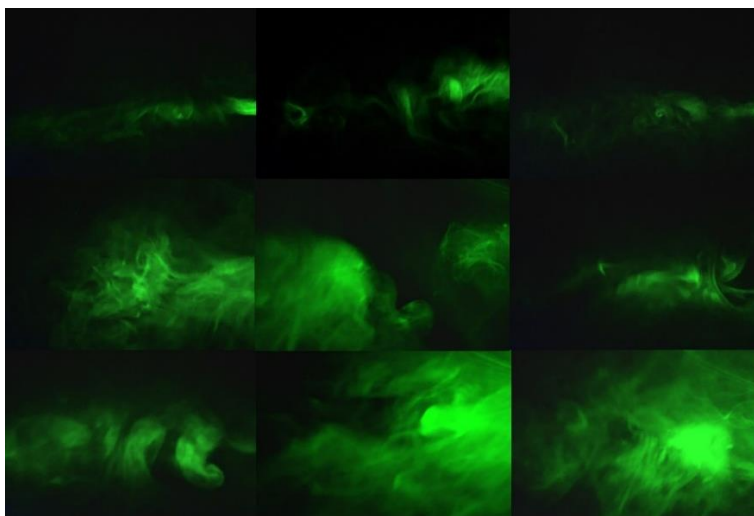
прецизна, касније може да се деси веће одступање које ремети успешно предвиђање. Једно од решења је константно ажурирање података, али тако, опет се дешава да на пример за један удаљен датум прво стоји једно предвиђање, а после неколико дана друго, што опет значи да је прогноза погрешила.



Слика 3. Турбуленција у атмосфери [8].

### **ВИЗУЕЛНА РЕПРЕЗЕНТАЦИЈА ТУРБУЛЕНЦИЈЕ**

На крају овог рада биће приказан један једноставан оглед који омогућава да се турбуленција види голим оком. За овај оглед је потребан јак ласер, пластика која би проширила сноп ласера, извор дима или паре и мрачна просторија.



Слика 4. Усликани различити тренуци при кретању дима осветљеног ласером. Овде се јасно може видет карактер турбулентног кретања ваздуха уз формирање вртлога и разних неправилних облика.

На овај начин се јасно може видети турбулентно кретање ваздуха, које изазива вртлоге који се простиру на јако непредвидив начин. Сличан пример се може видети када се посматра дим од цигарете или водена пара изнад лонца са кључајућом водом, ово хаотично кретање проузроковано је турбулентним кретањем ваздуха у простору кроз који тај дим или пара пролазе.

### ЗАКЉУЧАК

Дакле, ко је крив што метеоролози некад погреше у прогнози? Као што је то често одговор, физика. Конкретно природа турбулентног кретања која знатно отежава способност предвиђања, јер још није потпуно објашњена од стране физике. Турбуленција је као и разне друге појаве у физици, присутна у нашем свакодневном животу, али се услед своје комплексности ретко спомиње на часовима физике. У овом раду је било речи о турбуленцији у атмосфери на нивоу који није превише захтеван за ђаке, а опет може да пробуди њихово интересовање и мотивацију за истраживање света око њих.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Fedorovich E, Rotunno R, Stevens B. 2004, Atmospheric Turbulence and Mesoscale Meteorology, Cambridge University Press
2. Leung P T, Gibson C H. 2004, Turbulence and fossil turbulence in oceans and lakes, Chin. J. Ocean. Limnol. 22, 1–23. <https://doi.org/10.1007/BF02842796>
3. Wyngaard J C, 1992, Atmospheric Turbulence, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol 24, 205-234, <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.24.010192.001225>
4. Hoque M, Joshi J, Evans G and Mitra S, 2023, A critical analysis of turbulence modulation in particulate flow systems: a review of the experimental studies, Reviews in Chemical Engineering, <https://doi.org/10.1515/revce-2022-0068>
5. Ameri A, 2019, Improving the Numerical Stability of Higher Order Methods with Applications to Fluid Dynamics, Massachusetts Institute of Technology, page 8, 10.13140/RG.2.2.25335.78247.
6. Schultz M P and Flack K A, Reynolds-number scaling of turbulent channel flow, 2013, Physics of Fluids, 25 (2), 025104, <https://doi.org/10.1063/1.4791606>
7. Folz A and Wallace M J, Near-surface turbulence in the atmospheric boundary layer, 2010, Physica D: Nonlinear Phenomena, Vol 239, Issue 14, 1305-1317, <https://doi.org/10.1016/j.physd.2009.06.014>.
8. Kevin Stacey, 2019, Tackling turbulence: Researchers to take new look at an old problem in physics. Скинуто 21.04.2024. са сајта <https://www.brown.edu/news/2019-11-07/turbulence>