

ტურბულენტობა

ავტორი [ნესტან მიქაძე](#)

ჰიდროდინამიკაში ტურბულენტობა ან ტურბულენტური დინება არის სითხის ან აირის მოძრაობის რეჟიმი, რომელიც ხასიათდება დინების ქაოსური ცვლილებით, რაც გულისხმობს დინების მახასიათებელი წნევისა და სიჩქარის სწრაფ და შემთხვევით ცვლილებას სივრცესა და დროში.

მასწავლებელი მოსწავლეებში კონკრეტული საგნისადმი ინტერესის გაღვივების მიზნით უნდა ცდილობდეს ბუნებაში მიმდინარე და ცხოვრებისეული მაგალითების მოყვანას, შესაბამისი მოვლენების განხილვას და შესაძლებლობის ფარგლებში შესწავლას. რამდენიმე თვის წინ ვიმგზავრე თვითმფრინავით, მოვყვით ტურბულენტურ ზონაში. არაკომფორტულია ასეთ დროს თვითმფრინავში ყოფნა და ერთგვარ შიშსაც იწვევს. გადავწყვიტე, ამ საკითხზე დამეწერა სტატია. ვფიქრობ, მოზარდებს და არამარტო მათ, დაინტერესებთ ინფორმაცია ტურბულენტობის შესახებ, ასევე, თუ რა საფრთხეებს შეიძლება შეიცავდეს მსგავსი შემთხვევები.

როდესაც თვითმფრინავით ვაპირებთ მოგზაურობას, ოდნავ ვნერვიულობთ. თვითმფრინავები ხანდახან განიცდიან ტურბულენტობას, მოულოდნელად იწყებენ რყევას. ეს მოძრაობები შეიძლება გამოწვეული იყოს ფრენის სიჩქარის, ჰაერის ნაკადის მიმართულების და ამინდის სხვადასხვა პირობების ცვლილებით; თუმცა ბევრმა არ იცის, რა არის ტურბულენტობა.

სიტყვა ტურბულენტობა ყველა ჩვენგანისთვის თვითმფრინავით მგზავრობასთან ასოცირდება, მაგრამ ტურბულენტობა უფრო ფართო ცნებაა, არის არა მარტო ჰაერში, ასევე წყალში და ხაღხის მასებშიც კი. საკმაოდ რთულია ტურბულენტობის და მასთან დაკავშირებული პრობლემების მეცნიერულ დონეზე შესწავლა.

მარტივი გაგებით, ტურბულენტობა შეიძლება შეფასდეს, როგორც ჰაერის და სითხის ნაკადის მდგომარეობა და მოძრაობა. ატმოსფეროში მიმდინარე შესაბამისი პროცესების გამო ხშირად არასასიამოვნოა თვითმფრინავით ფრენა. ტურბულენტობის მოვლენა კი აუცილებელია დედამიწაზე სიცოცხლის არსებობისთვის.

სიტყვა turbulence მომდინარეობს ლათინური turbulentia-დან, რომელიც აღნიშნავს ტურბულენტურ მდგომარეობას (არეულობა ან აგზნება). შეიძლება ითქვას, რომ თვითმფრინავი განიცდის ტურბულენტობას, როდესაც ის აჩქარებულად მოძრაობს ჰაერის ნაკადის სიჩქარისა და მიმართულების ცვლილების გამო. ტურბულენტობას ქმნის ამინდი. ყველაზე გავრცელებული მიზეზებია დრუბლების წარმოქმნა (უფრო ზუსტად: დრუბლები, რომლებიც გადაადგილდება ვერტიკალურად), ქარიშხალი და ჰაერის ჭავლური ნაკადები.

ტურბულენტობას აქვს მკვეთრი გამოხატულება ნაწილობრივ მოდრუბლული და მზიანი დღის პირობებში, რაც მაქსიმუმს აღწევს შუადღისას. როდესაც მზის გამოსხივება ათბობს ზედაპირს, მის ზემოთ ჰაერი ხდება უფრო თბილი და ელასტიკური, ხოლო ცივი, მკვრივი ჰაერი ჩამოდის დაბალ ფენებში. შედეგად ჰაერის ვერტიკალური მოძრაობა, ზედაპირული დაბრკოლებების გარშემო ნაკადის დარღვევასთან ერთად, დაბალი ფენის ქარებს უკიდურესად არარეგულარულს ხდის. ღამით მიწასთან ახლოს ჰაერი ცივდება, ჰაერის სიმკვრივე მატულობს, ვიდრე შედარებით ზედა

ფენებში, იქმნება ტემპერატურის არასტაბილურობა, რაც წარმოქმნის ქარს. დაბალ ფენებში ჰაერის ტემპერატურა დღე-ღამეში გაცილებით ნაკლებად იცვლება და ტურბულენტობა თითქმის მუდმივი რჩება.

შესაძლებელია ტურბულენტობა წარმოიქმნას იმ შემთხვევაშიც, თუ დიდი მოცულობის ჰაერი შეეჯახება თვითმფრინავის ფრთებს. ყველა შემთხვევაში, პილოტები იტარებენ ტესტებს და წვრთნებს, რათა გააკონტროლონ ნებისმიერი სიტუაცია, რომელიც შეიძლება წარმოიქმნას ფრენის დროს.

ტურბულენტობა, როგორც წესი, ხდება დაბალ სიმაღლეებზე ტიპური ხანმოკლე ფრენების დროს, მაგრამ არც შორ მანძილზე ფრენაა გამონაკლისი. დამის ფრენებზე ან დილით ადრე ფრენებზე ტურბულენტობა იშვიათად ხდება, რადგან ჰაერის ნაკადი ამ დროს უფრო ერთგვაროვანია.

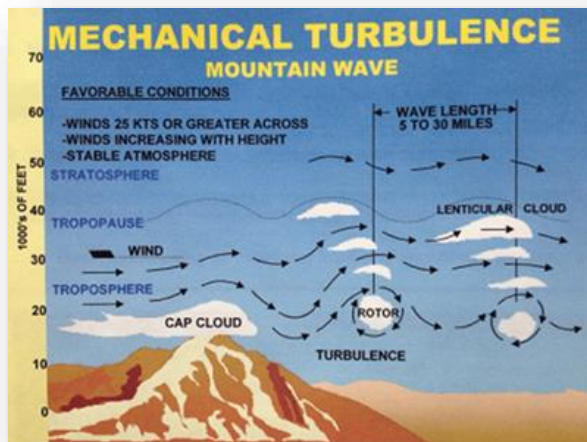
შეიძლება გამოიკვეთოს ტურბულენტობის რამდენიმე ტიპი :

მცირე ტურბულენტობა არის თვითმფრინავის მცირე, თითქმის არაპროგნოზირებადი მოძრაობა, ამ დროს შეიძლება არანაირი დისკომფორტი არ შევიგრძნოთ. ზომიერი ტურბულენტობის დროს შეიძლება თვითმფრინავში დავეცეთ. ძლიერი ტურბულენტობისას თვითმფრინავი ისეთ მოძრაობას იწყებს, რომ ღვედით დამაგრებულებს ჰგონიათ, სავარძლიდან „აფრინდებიან“.

ტურბულენტობის ინტენსივობის კლასიფიკაცია	
ინტენსივობა	ეფექტი
მსუბუქი	სიმაღლის და/ან დამოკიდებულების უმნიშვნელო არასტაბილური ცვლილებები.
ზომიერი	თვითმფრინავი ყოველთვის რჩება პოზიტიურ კონტროლში.
ძლიერი	სიმაღლის დიდი, მკვეთრი ცვლილებები. თვითმფრინავი შეიძლება მომენტალურად იყოს უკონტროლო.
ექსტრემალური	თვითმფრინავის კონტროლი პრაქტიკულად შეუძლებელია. შეიძლება გამოიწვიოს სტრუქტურული დაზიანება.

არსებობს ტურბულენტობის რამდენიმე მიზეზი –

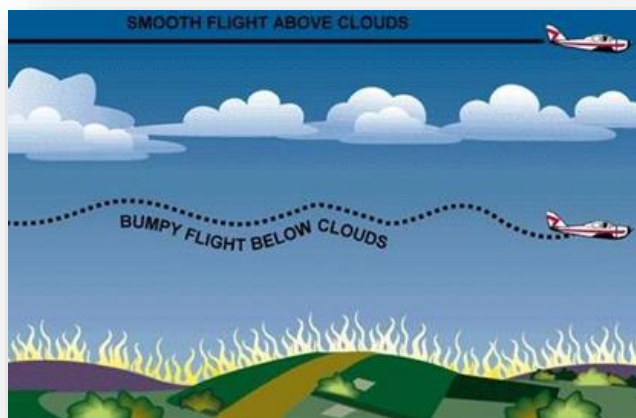
მექანიკური ტურბულენტობა – ჰაერსა და მიწას შორის ხახუნი, განსაკუთრებით არარეგულარული რელიეფი და ადამიანის მიერ შექმნილი ხელოვნური დაბრკოლებები, იწვევს ტურბულენტობას ქვედა დონეზე. ამ სიტუაციის ინტენსივობა დამოკიდებულია ქარის სიძლიერეზე, ზედაპირის ბუნებასა და ჰაერის სტაბილურობაზე. რაც უფრო ძლიერია ქარის სიჩქარე, უხეშია რელიეფი და არასტაბილურია ჰაერი, მით მეტი იქნება ტურბულენტობა. თუ ჰაერი თბება ქვემოდან, ვერტიკალური მოძრაობა იქნება უფრო ენერგიული და სწრაფი.



სიჩქარის უეცარი მატება, რომელიც გრძელდება რამდენიმე წუთს, იწვევს ჭექა-ქუხილს, რაც აძლიერებს ტურბულენტობის წარმოქმნას.

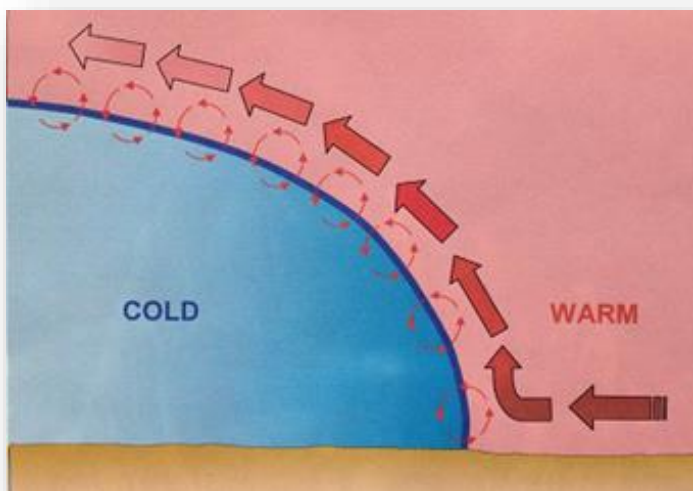
თერმული (კონვექციური) ტურბულენტობა— აღინიშნება ზაფხულის თბილ დღეებში, როცა მზე დედამიწის ზედაპირს არათანაბრად ათბობს. ზოგიერთი ზედაპირი, როგორიცაა უნაყოფო მიწა, კლდოვანი და ქვიშიანი ადგილები, თბება უფრო სწრაფად, ვიდრე ბალახით დაფარული მინდვრები და ბევრად უფრო სწრაფად, ვიდრე წყალი. ძლიერდება კონვექცია – თბილი ჰაერი ინტენსიურად ადის ზედა ფენებში და უფრო გრილი ჰაერი ეშვება დაბლა, რაც ქმნის არაკომფორტულ პირობებს თვითმფრინავისთვის. ტურბულენტობის ინტენსივობა იზრდება კონვექციური აღმავალი ნაკადის ინტენსივობის მატებასთან ერთად.

კონვექციური დინებები ხშირად იწვევს ჭექა-ქუხილს, რომელთანაც დაკავშირებულია ძლიერი ტურბულენტობა. ტურბულენტობა ასევე მოსალოდნელია, თუ ცივი ჰაერის მასები მოძრაობენ თბილ ზედაპირებზე. ქვემოდან სითბო ქმნის არასტაბილურ პირობებს, მძვინვარე ქარებს და აძლიერებს ტურბულენტობას.



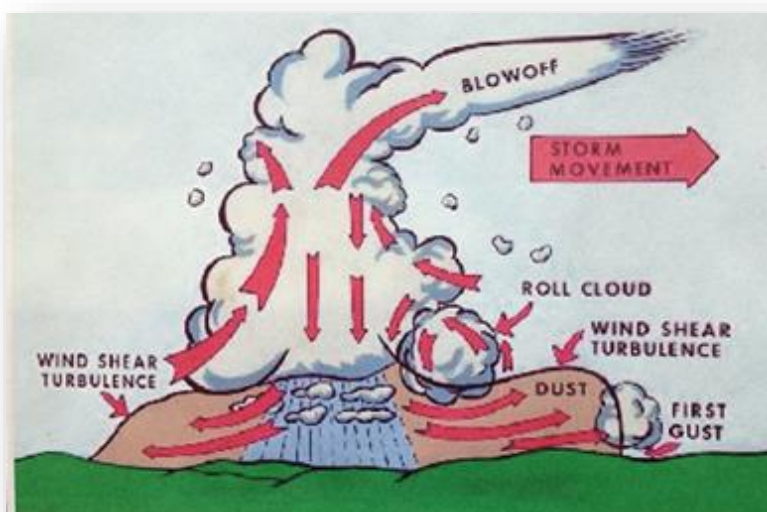
თერმული ტურბულენტობა მკვეთრად მოქმედებს თვითმფრინავის ფრენის მარშრუტზე, თერმულმა ფაქტორებმა შეიძლება ააცდინოს თვითმფრინავი დაგეგმილი საფრენი ბილიკიდან.

ფრონტალური ტურბულენტობა ყველაზე მეტად შეინიშნება, როდესაც თბილი ჰაერი ტენიანი და არასტაბილურია და ძალიან ძლიერდება ჭექა-ქუხილის შემთხვევაში.



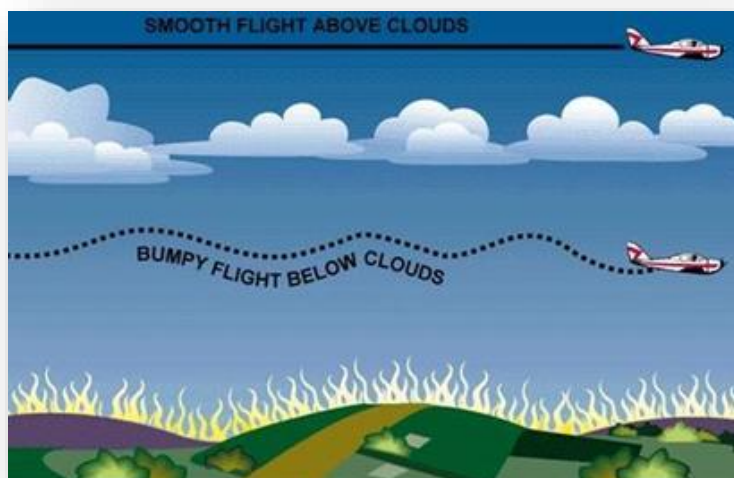
როდესაც გამოსატულია ქარის სიჩქარისა და მიმართულების ცვლილება, მოსალოდნელია საკმაოდ ძლიერი ტურბულენტობა. ტურბულენტობა, როგორც წესი, გვხვდება ნებისმიერ სიმაღლეზე.

ტურბულენტობა, რომელიც დაკავშირებულია ჭექა-ქუხილთან, შეიძლება იყოს უკიდურესად საშიფათო, რომელსაც შეუძლია გამოიწვიოს თვითმფრინავის გადაჭარბებული დატვირთვა ან კონტროლის დაკარგვა.

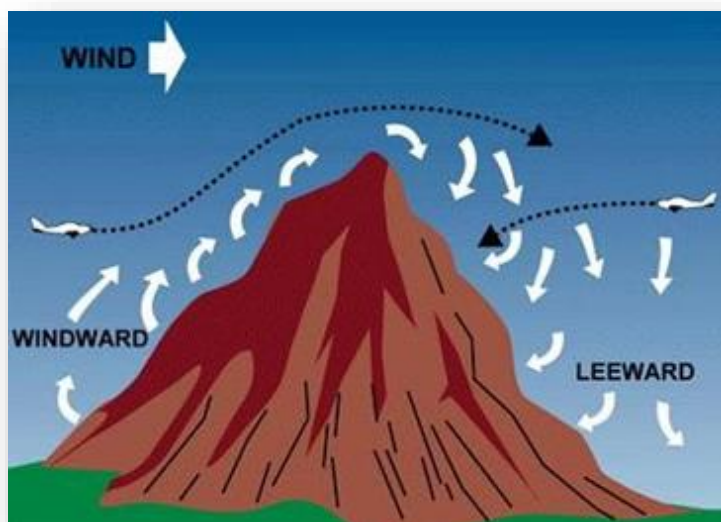


ჭექა-ქუხილთან ერთად შესაძლოა განვითარდეს ძლიერი ტურბულენტობა. მიკროაფეთქებები შეიძლება იყოს განსაკუთრებით საშიში მათთან დაკავშირებული ძლიერი ქარის წარმოქმნის გამო.

ტურბულენტობა შესაძლებელია გამოიწვიოს კონვექციურმა დინებამ. ასეთი შემთხვევა შესაძლებელია თბილ ამინდში დაბალ სიმაღლეზე ფრენისას. ამ სიტუაციის თავიდან აცილება შესაძლებელია მაღალ სიმაღლეებზე ფრენით, სადაც პილოტი უცვლელად იპოვის გლუვ ჰაერს ღრუბლის დონის ზემოთ.



გორაკთან ან მთასთან მიახლოებისას პილოტმა წინასწარ უნდა გამოთვალოს საკმარისი სიმაღლე. საჭიროების შემთხვევაში უნდა აიღოს გეზი ბორცვებსა და მთებს შორის, სადაც კანიონი ან ვიწრო ხეობაა.



მიწის სხვადასხვა ზედაპირი შთანთქავს, ირეკლავს და ასხივებს სხვადასხვა რაოდენობით სითბოს. თბილი ჰაერი ამოდის და ერევა რელიეფზე მოძრავ სხვა ჰაერს. ეს შერევა განსხვავებულ გავლენას ახდენს ზედაპირულ ქარებზე და ხშირად ხდის მათ მკვეთრს და არასტაბილურს.



თვითმფრინავის უსაფრთხოების თვალსაზრისით ტურბულენტობა არ არის დიდი პრობლემა, მაგრამ მგზავრებისთვის ნორმალურია შიშის გრძნობა და თავბრუსხვევაც კი. არ უნდა გვეშინოდეს ტურბულენტობის, თვითმფრინავების კონსტრუქციას შეუძლია გაუძლოს ყველაზე ძლიერ ტურბულენტობასაც კი. ასევე, პილოტებს ფრენის სიჩქარის შენელების და სიმაღლის შეცვლით შეუძლიათ გაუმკლავდნენ ამ პრობლემას.

ტურბულენტობის და მისი ინტენსივობის აღმოსაჩენად, ზოგიერთ სალონში დამონტაჟებულია პროგნოზის სენსორები. თვითმფრინავის შიგნით ადგილები მეტ-ნაკლებად ტურბულენტურია. მაგალითად, სიმძიმის ცენტრში მდებარე სავარძლები და თვითმფრინავის ფრთები ნაკლებად გრძნობენ ამ ცვლილებებს, ხოლო თვითმფრინავის კუდში მდებარე სავარძლებზე ყველაზე მეტად შეიგრძნობა იგი. ისიც უნდა გავითვალისწინოთ, რომ რაც უფრო დიდია თვითმფრინავი და სივრცე, მით ნაკლებად ვამჩნევთ ტურბულენტობას.

რამდენიმე რჩევა ტურბულენტობასთან გამკლავებისთვის

თუ იმ ადამიანთა რიცხვს მიეკუთვნებით, ვისაც თვითმფრინავით მგზავრობის ან მით უმეტეს, ტურბულენტობის ეშინია, ეცადეთ, არ ინერვიულოთ, თუ შესაძლებელია, აირჩიეთ სასურველი ადგილი, აჯობებს ფანჯარასთან და მოკალათდით.

რეკომენდებულია, თვითმფრინავში ასვლამდე იცოდეთ, რა არის ტურბულენტობა. თქვენ დარწმუნდებით, რომ ის არ არის ისეთი საშიში, როგორც ერთი შეხედვით ჩანს.

გაიკეთეთ უსაფრთხოების ღვედი და შეინახეთ თქვენი პირადი ნივთები, რათა ისინი არ “გაფრინდნენ”, თუ თვითმფრინავი მოულოდნელად შეიცვლის განსაზღვრულ მიმართულებას.

მოგზაურობის განმავლობაში არ შეზღუდოთ სითხის მიღება და შეეცადეთ, გადაიტანოთ ყურადღება გარკვეული აქტივობებზე (შეგიძლიათ წაიკითხოთ, უყუროთ ფილმებს და მოუსმინოთ მუსიკას).

ტურბულენტობა დედამიწის ზედაპირის სიახლოვეს აერთიანებს სითბოს, ტენიანობას, ნახშირორჟანგს, დამაბინძურებლებს და ამით ინარჩუნებს ჩვენს ბიოსფეროს სიცოცხლისთვის საჭირო მდგომარეობაში. ტურბულენტობის გარეშე, მიწასთან ახლოს ჰაერი ბევრად უფრო ცხელი იქნებოდა, რასაც ადამიანი საკუთარ სხეულზეც კი შეიგრძნობდა.



დედამიწის მოსახლეობის დიდი ნაწილი ცხოვრობს დიდ ქალაქებში, რაც ქმნის ტურბულენტობის რთულ ფორმებს. მჭიდროდ დასახლებული რეგიონები შემცირებული მცენარეული საფარით შთანთქავს მზის სითბოს და იწვევს ჰაერის ფენების გადახურებას. ამ პროცესს შეუძლია შექმნას რთული მიკროკლიმატი ჰაერის ხარისხის მნიშვნელოვანი პრობლემებით. ტურბულენტობის ნაკადის დონის შემცირება იწვევს სმოგს, რაც უარყოფითად მოქმედებს ჩვენს გარემოზე.

ყოველწლიურად გამომუშავებული ელექტროენერგიის დაახლოებით 10% ამჟამად იხარჯება ტურბულენტობის შედეგების დაძლევის პროცესებზე. ტურბულენტობის უკეთ გაგება და გააზრებამ შეიძლება შეამციროს საწვავის და ზოგადად, ენერგიის მოხმარება და შექმნას უკეთესი პირობები გარემოს დაცვისთვის.

ლეონარდო და ვინჩის თეორია ტურბულენტობასთან დაკავშირებით და ტურბულენტობა, როგორც მხატვრების შთაგონების წყარო-ჰუმანიტარულ დისციპლინებში ტურბულენტობის ცნება ფართოდ გამოიყენება მხატვრულ წარმოდგენებში და ლიტერატურულ გამონათქვამებში, ფილოსოფიურ თეორიებში, ეკონომიკურ მოდელებში და პოლიტიკური რევოლუციების აღწერებშიც კი. ზუსტი მეცნიერების წარმომადგენლებისგან განსხვავებით, ჰუმანიტარული მიმართულების სპეციალისტები ტურბულენტობის ცნებას იყენებენ თითქმის ნეგატიური გაგებით, როგორ არეულობის, შეფერხების და აჟიოტაჟის გამოხატულება. ხშირია ტურბულენტობის თემით

დაინტერესება მხატვრობაში, განსაკუთრებით ამ თემაზე ნახატები ხშირად გვხვდება იმპრესიონისტების შემოქმედებაში.

კაცობრიობის დღევანდელი პრობლემები – ტექნოლოგიური, კულტურული, სოციალური თუ პოლიტიკური, პირდაპირ თუ ირიბად, უკავშირდება ტურბულენტობის მოვლენას. ომების დროსაც, აფეთქებების, ქიმიური იარაღის გამოყენება ასევე უარყოფითად აისახება ატმოსფერულ ტურბულენტობასა და ადამიანთა შორის ურთიერთობებზე.

ლეონარდო და ვინჩის შემოქმედება და ნაშრომები ადასტურებენ, რომ ტურბულენტობის კვლევებს დიდი ისტორია აქვს. ამ ისტორიის ცოდნა ფუნდამენტურია იმის გასაგებად, თუ როგორი იყო ტურბულენტობის კონცეფცია წარსულში, რომლის გააზრებით გვესმის იგი ახლა და როგორ მოვიაზრებთ მას მომავალში.

ლეონარდო და ვინჩიმ დეტალურად შეისწავლა ჰიდრავლიკა. მას ეკუთვნის უამრავი დაკვირვება წყლის მოძრაობაზე და დატოვა რთული მოძრაობების დახვეწილი ანალიზი წრფივი და წრიული კომპონენტების თვალსაზრისით.

ლეონარდო და ვინჩიმ დაბრკოლების ირგვლივ წყლის მორევის ტრიალი დაახასიათა, როგორც აჟიოტაჟი და არეულობა-როგორც „turbolenza“.



და ვინჩის ხელოვნება და მეცნიერება არ წარმოქმნილა ვაკუუმში, მისი ზოგიერთი ნაშრომი ჰაერისა და წყლის ნაკადის შესახებ, ასევე გამოგონებები, რომლებიც ახასიათებენ ფრინველთა ფრენას, უშუალოდ უკავშირდება ტურბულენტობის აბსტრაქტულ გაგებას. ტურბულენტობა და ვინჩისთვის არა მხოლოდ აბსტრაქტული კვლევის საგანი, არამედ ცხოვრებისეული გამოცდილებაც იყო.

ვინსენტ ვან გოგი ცნობილია თავისი ქაოსური ნახატებით. მისი ნამუშევრების მათემატიკური ანალიზი ცხადყოფს, რომ ბევრ ნახატში ქარიშხლიანი სიუჟეტები ძალიან ჰგავს ნამდვილ

ტურბულენტობას. გვხვდება ნახატები, რომლებიც უკავშირდება ტურბულენტობას როგორც წყალში, ასევე ჰაერში.

მკვლევრების მიერ ვინსენტ ვან გოგის „ვარსკვლავური ღამის“ ანალიზი აჩვენებს, რომ მის მბრუნავ სტრუქტურებს აქვთ ტურბულენტური თვისებები, რომლებიც ემთხვევა მოლეკულურ დრუბლებს, რომლებიც შობენ ვარსკვლავებს.



ხელოვნება შთააგონებს მეცნიერებას და მეცნიერება შთააგონებს ხელოვნებას, ამიტომ გასაკვირი არ არის, რომ მხატვრები აკვირდებიან ბუნების სირთულეებს და ცდილობდნენ დააფიქსირონ საკუთარ ნამუშევრებში.

ტურბულენტობა მასწავლებელმა შეიძლება დაუკავშიროს ფიზიკაში სითბური მოვლენების თემატიკას, კონკრეტულად, სითბოგადაცემის სახეებს, თბოგამტარობას, კონვექციასა და გამოსხივებას; წნევას, მოძრაობას და სხვ. ასევე, ტურბულენტობაზე ინტეგრირებული გაკვეთილების და პროექტების დაგეგმვა შესაძლებელია ლიტერატურის, გეოგრაფიის, ისტორიის, ხელოვნების, მუსიკის, სამოქალაქო განათლების, ქიმიის საკითხებთან მიმართებაში.

გამოყენებული ლიტერატურა:

<https://theconversation.com/turbulence-isnt-just-a-science-problem-97171>

<https://www.meteorologiaenred.com/ka/que-son-las-turbulencias.html>

<https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/5.0070984>

<https://physics.aps.org/articles/v12/45>

https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/turbulence_stuff/turbulence/turbulence.htm

<https://www.britannica.com/science/atmospheric-turbulence>

<https://www.britannica.com/science/clear-air-turbulence>