



საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ნიკა ტაბატაძე

საჰაერო ხრახნების ეფექტურობის ამაღლება მათი
გეომეტრიული ოპტიმიზაციის გზით

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამის დასახელება და შიფრი
საჰაერო ტრანსპორტის ექსპლუატაცია და ტექნოლოგიები - 0716

სამეცნიერო ხელმძღვანელები: პროფესორი ანდრო მაისურაძე
პროფესორი დავით მაზანიშვილი

თბილისი 2023

საავტორო უფლება © 2023 წელი, ნიკა ტაბატაძე

საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

საინჟინრო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ნიკა ტაბატაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს, დასახელებით „საჰაერო ხრახნების ეფექტურობის ამალღება მათი გეომეტრიული ოპტიმიზაციის გზით“ და ვაძღვეთ რეკომენდაციას საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას, დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

14.07.2023 წელი

სამეცნიერო ხელმძღვანელები:

პროფესორი ანდრო მაისურაძე _____

პროფესორი დავით მაზანიშვილი _____

ოპონენტები:

პროფესორი სეით ბლიაძე _____

ასოც. პროფესორი ოთარ კემულარია _____

დისერტაციის დაცვის დრო და ადგილი:

2023 წლის 14 ივლისი, 16:00 საათი, საქართველოს საავიაციო

უნივერსიტეტის საკონფერენციო დარბაზი.

სწავლული მდივნი: ასოც. პროფესორი ბიძინა აბესაძე _____

საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი
2023 წელი

ავტორი: ნიკა ტაბატაძე

დასახელება: „საჰაერო ხრახნების ეფექტურობის ამაღლება მათი გეომეტრიული ოპტიმიზაციის გზით“

სადოქტორო საგანმანათლებლო პროგრამა: „საჰაერო ტრანსპორტის ექსპლუატაცია და ტექნოლოგიები“ - 0716

აკადემიური ხარისხი: საავიაციო ინჟინერიის აკადემიური დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: 14.07.2023 წ.

ინდივიდუალური პიროვნების ან ინსტიტუტის მიერ ზემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე. ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

კვლევა განხორციელდა შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით [PHDF-19-4077].

რეზიუმე

დღესდღეობით მსოფლიოში ძალზედ ფართოდაა გავრცელებული ელექტრონული ვერტიკალური აფრენა-დაფრენის უპილოტო საფრენი აპარატები, ეგრეთ წოდებული eVTOL დრონები. ისინი გამოიყენება თითქმის ყველა სფეროში, გარკვეულ შემთხვევებში საკმაოდ საპასუხისმგებლო სამუშაოების შესასრულებლად. მიუხედავად დრონების ასეთი პოპულარობისა მათ გააჩნიათ მნიშვნელოვანი პრობლემური საკითხები, რომლებიც დღესდღეობითაც გადაუჭრელი რჩება და აუარესებს მათ გამოყენებადობას. ეს საკითხებია დრონების დაბალი ენერგოეფექტურობა, რაც პირდაპირ აისახება აპარატის ფრენის ხანგრძლივობაზე, ასევე, გარემოს მაღალი ხმაურით დაბინძურების მახასიათებლები, რაც ზღუდავს მათი გამოყენების შესაძლებლობას ხალხმრავალ-დასახლებულ ადგილებში. ხსენებულ საკითხებს დიდი მნიშვნელობა აქვს როგორც სამოქალაქო ასევე სამხედრო დანიშნულების დრონებში.

ზემოთ ხსენებული პრობლემური საკითხების გადაწყვეტა ძირითადად დაკავშირებულია eVTOL დრონებში გამოყენებულ საჰაერო ხრახნებთან. ვინაიდან ასეთ აპარატებში ფრენისა და მანევრირებისთვის ძირითად აგრეგატს წარმოადგენს საჰაერო ხრახნი და, შესაბამისად, აპარატის ბორტზე არსებული ენერგიაც ძირითადად მის მოქმედებაში მოყვანას ხმარდება. ამიტომ, რაც უფრო ეფექტურად იქნება გამოყენებული ეს ენერგია მით უფრო მეტ ხანს შეძლებს აპარატი ფრენას. ასევე ხმაურის პრობლემაც აღნიშნულ საფრენ აპარატებში უმეტესწილად დაკავშირებულია საჰაერო ხრახნთან, ვინაიდან იგი ბრუნავს დიდი სიჩქარით და წარმოქმნის მაღალი სიმძლავრის აკუსტიკურ ტალღებს. გამომდინარე აქედან საჰაერო ხრახნის კონსტრუქციის ოპტიმიზებით შესაძლებელია შევამციროთ თანამედროვე უპილოტო საფრენი აპარატების ორი ყველაზე მნიშვნელოვანი პრობლემური საკითხი.

სადოქტორო ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს საჰაერო ხრახნის ისეთი კონსტრუქციის შემუშავება, რომელსაც არსებულ საჰაერო ხრახნებთან შედარებით ექნება გაუმჯობესებული ენერგოეფექტურობის და აკუსტიკური მახასიათებლები. ამისთვის ნაშრომში დეტალურადაა განხილული საჰაერო ხრახნის პარამეტრები და

პრობლემური ზონები. მოყვანილია მათი ენერგო ეფექტურობის და ხმაურის პრობლემურ საკითხთა ანალიზი და გადაწყვეტის არსებული მეთოდები. ნაშრომში მოყვანილია კვლევის განმავლობაში შემუშავებული 20-მდე საჰაერო ხრახნის კონცეპტუალური კონსტრუქცია და მათზე კომპიუტერული სიმულაციების და ექსპერიმენტალური გამოცდების მეთოდებით მიღებული შედეგები. თითოეულ მათგანზე შეფასებულია ენერგოეფექტურობის და აკუსტიკური მახასიათებლები და შერჩეულია ამ მახასიათებლების მიხედვით გაუმჯობესებული საჰაერო ხრახნის მოდელი ტრადიციულ არსებულ კონსტრუქციასთან შედარებით.

Abstract

Nowadays, electronic vertical take-off and landing unmanned aerial vehicles, commonly known as eVTOL drones, have become highly prevalent worldwide. They are being utilized across various fields, often for undertaking significant and responsible tasks. Despite the widespread popularity of drones, there are significant unresolved issues that hinder their usability and pose challenges in their application. Two prominent issues that persist in the drone industry are their low energy efficiency, leading to shorter flight durations, and their high noise pollution, which restricts their usage in densely populated areas. The mentioned issues hold great importance in both civilian and military drones, as they affect the performance and applicability of these unmanned aerial vehicles in various contexts.

The solutions to the aforementioned problematic issues primarily revolve around the propellers employed in eVTOL drones. The propeller serves as the primary component for flight and maneuvering in such machines, thus consuming a significant portion of the onboard energy. Therefore, the more efficiently this energy is used, the longer the machine will be able to fly. Furthermore, the issue of noise in these aircraft is predominantly associated with the propeller, as its high-speed rotation generates powerful acoustic waves. Hence, by optimizing the design of the propeller, it becomes feasible to mitigate the two key challenges faced by modern UAVs, thereby addressing their energy efficiency and noise-related issues.

The objective of the doctoral thesis is to develop an innovative propeller design that surpasses existing models in terms of enhanced energy efficiency and improved acoustic characteristics. To accomplish this, the paper provides a comprehensive discussion on the parameters and areas of concern related to the propeller. It thoroughly analyzes the energy efficiency and noise-related problems associated with existing designs. Additionally, the paper explores and evaluates existing methods and solutions aimed at addressing these issues. The paper presents the conceptual designs of up to 20 propellers that have been developed as part of the research. It showcases the outcomes of computer simulations and experimental tests conducted on these designs, providing empirical evidence and data to support the findings. Each of the air screw designs is thoroughly evaluated in terms of their energy efficiency and acoustic characteristics. Through a meticulous assessment process, an improved air screw model is selected, demonstrating superior performance compared to traditional existing constructions. The chosen model showcases advancements in both energy efficiency and acoustic properties, thus offering a promising solution to the identified issues.

სარჩევი

აბრევიატირების ნუსხა	10
ნაშრომის სტრუქტურა და შემადგენლობა.....	11
ცხრილების ნუსხა	11
ნახაზების ნუსხა	11
შესავალი	15
ნაშრომის აპრობაცია.....	17
თავი I. საჰაერო ხრახნის მოქმედების პრინციპი, ძირითადი პარამეტრები, ტიპები და პრობლემური საკითხები. ბიბლიოგრაფიული მასალის ანალიზი.....	18
1.1. საჰაერო ხრახნების განვითარების ანალიზი.....	18
1.2. საჰაერო ხრახნების ძირითადი პარამეტრები, კონსტრუქცია და მოქმედების პრინციპი.....	23
1.2.1. საჰაერო ხრახნის ფრთოვანების რიცხვი.....	23
1.2.2. საჰაერო ხრახნის ფრთოვანების ფორმა	24
1.2.3. საჰაერო ხრახნები ფრთოვანების დაყენების კუთხის მიხედვით.....	25
1.2.4. საჰაერო ხრახნის გეომეტრიული პარამეტრები	27
1.2.5. საჰაერო ხრახნის მიერ წარმოქმნილი ძალები და მომენტები	32
1.3. თანამედროვე საჰაერო ხრახნების კლასიფიკაცია და ანალიზი.....	44
1.3.1. მუდმივი სიჩქარის საჰაერო ხრახნი.....	45
1.3.2. სქიმიტარული საჰაერო ხრახნი	46
1.3.3. საჰაერო ხრახნი უკუისრისებურობით.....	47
1.3.4. ბიონიკური საჰაერო ხრახნი.....	47
1.3.5. არხში მოთავსებული საჰაერო ხრახნი	48
1.3.6. სარტყელიანი საჰაერო ხრახნი.....	50
1.3.7. Q-tip საჰაერო ხრახნი.....	50
1.4. საჰაერო ხრახნის ენერგოეფექტურობა და ხმაური.....	53
1.4.1. ინდუქციური წინაღობა და ფრთის ბოლოში წარმოქმნილი ჰაერის დაგრიგალება.....	53
1.4.2. საჰაერო ხრახნის კონცეპტუალური მოდელი ინდუქციური წინაღობის შესამცირებლად.....	56

1.4.3. საჰაერო ხრახნების მიერ გამოწვეული ხმაური და მისი შემცირების შესაძლებლობების ანალიზი.....	59
1.4.4. ხმაურის პრობლემის გადაწყვეტისთვის არსებული ნეთოდები და მათი ანალიზი.....	61
1.4.5. ხმაურის აქტიური კონტროლის სისტემა საჰაერო ხრახნებისთვის.	65
1.5 პირველი თავის დასკვნები.....	68
თავი II. საჰაერო ხრახნების პროექტირება და გამოთვლითი სიმულაციური მეთოდების ანალიზი	69
2.1. სითხეთა დინამიკის მათემატიკური მოდელების ანალიზი	69
2.1.1. ნავიე – სტოქს – დიუგემის განტოლება.....	70
2.2. კვლევისას გამოყენებული კომპიუტერული პროგრამების ანალიზი.....	71
2.2.1. Dasault Systems Catia V5 R21	71
2.2.2. XFLR5	72
2.2.3. ANSYS Workbench 19.2	73
2.3. კომპიუტერული სიმულაციები.....	82
2.3.1. სიმულაციის მომზადება და მიმდინარეობა.....	86
2.3.2. საჰაერო ხრახნის სიმულაციური კვლევის ალგორითმი	94
2.4. საჰაერო ხრახნის პარამეტრების შერჩევა	96
2.5. საჰაერო ხრახნის კონსტრუქციის შემუშავება.....	99
2.6. საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას მნიშვნელოვანი ზონები და მათი ანალიზი	102
2.7. კონცეპტუალური საჰაერო ხრახნები ფრთოვანების ბოლოებში პროპლეტებით.....	106
2.8. კონცეპტუალური საჰაერო ხრახნების კონსტრუქციები.....	111
2.9. კვლევისას მიღებული საჰაერო ხრახნების პერსპექტიული კონცეფციები	120
2.9.1. რევერსულ თოლიასებრი საჰაერო ხრახნი	121
2.9.2. რევერსულ თოლიასებრი საჰაერო ხრახნი პროპლეტებით	123
2.9.3. საჰაერო ხრახნი ფრთოვანას ოპტიმიზებული დაბოლოებით.....	124
2.9.4. საჰაერო ხრახნი ტურბულიზატორებით ფრთოვანას წინა ნაწილში .	125

2.9.5. საჰაერო ხრახნი ფრთოვანას ისრისებურობით.....	127
2.10. მეორე თავის დასკვნები	128
თავი III საჰაერო ხრახნების სიმულაციური და ექსპერიმენტული კვლევა და მიღებული შედეგების ანალიზი	129
3.1. კომპიუტერული სიმულაციები შერჩეულ პერსპექტიულ კონსტრუქციებზე.....	129
3.2. კვლევის ექსპერიმენტული მეთოდი	135
3.2.1. გამოყენებული დანადგარი და აპარატურა	135
3.3. საჰაერო ხრახნების დამზადების მეთოდები	139
3.3.1 კვლევისთვის შერჩეული საჰაერო ხრახნების დამზადების მეთოდი	144
3.4. კვლევის შედეგად მიღებული პერსპექტიული საჰაერო ხრახნების ექსპერიმენტები სტენდზე.....	149
3.5. მიღებული შედეგების უტყუარობა და რეალიზაცია.....	158
3.6. მესამე თავის დასკვნები	160
ძირითადი დასკვნა	161
გამოყენებული ლიტერატურა:.....	162

აბრევიატირების ნუსხა

აბრევიატურა	განმარტება ინგლისურად	განმარტება ქართულად
CAD	Computer-Aided Design	კომპიუტერის დახმარებით პროექტირება
CAM	Computer-Aided Manufacturing	კომპიუტერის დახმარებით წარმოება
CAE	Computer-Aided Engineering	კომპიუტერის დახმარებით ინჟინერია
PLM	Product Lifecycle Management	პროდუქტის სასიცოცხლო ციკლის მართვა
CFD	Computational Fluid Dynamics	გამოთვლითი სითხეთა დინამიკა
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations	ნახევრად იმპლიციტური მეთოდი, წნევასთან დაკავშირებული განტოლებებისათვის
STEP	Standard for the Exchange of Product Data	პროდუქტის მონაცემების გაცვლის სტანდარტი
ASCII	American Standard Code for Information Interchange	ამერიკული სტანდარტის კოდი საერთაშორისო ურთიერთგაცვლისთვის
ISO	International Organization for Standardization	სტანდარტიზაციის საერთაშორისო ორგანიზაცია
SPL	Sound Pressure Level	ხმის დაწნევის დონე
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics	ნაციონალური მრჩეველთა კომიტეტი აერონავტიკისთვის
NASA	National Aeronautics and Space Administration	ნაციონალური აერონავტიკის და კოსმოსის ადმინისტრაცია

ნაშრომის სტრუქტურა და შემადგენლობა

სადოქტორო ნაშრომი შედგება შესავლისგან და 3 თავისგან. შეიცავს 87 ნახაზს და 4 ცხრილს. გამოყენებული გვერდების ჯამური რაოდენობა შეადგენს 164, გამოყენებული ლიტერატურული წყარო 49.

ცხრილების ნუსხა

- ცხრ.2.1. $a_{i,j}=a_{i+1,j}+a_{i-1,j}+a_{i,j+1}+a_{i,j-1}$ და კოეფიციენტები;
- ცხრ.3.1. სიმულაციებით მიღებული შედეგები;
- ცხრ.3.2. სასტენდო გამოცდების შედეგები 6 ტიპის საჰაერო ხრახნისთვის;
- ცხრ.3.3. საჰაერო ხრახნების წარმოებული ენერგოეფექტურობის მახასიათებლები;

ნახაზების ნუსხა

- ნახ.1.1: ბამბუკის საფრენი სათამაშო
- ნახ.1.2: მიხეილ ლომონოსოვის მოდელი საჰაერო ხრახნებით
- ნახ.1.3: ძმები რაიტების მიერ შექმნილი საჰაერო ხრახნი, რომელსაც გააჩნდა აეროდინამიკური პროფილი და ფრთოვანას ფორმის გრეხა სიგრძის გასწვრივ;
- ნახ.1.4: ალბერტო სანტოს დუმონტის საფრენი აპარატი 14-bis 1906 წლის ნოემბერი;
- ნახ.1.5: ორი; სამი; ოთხი და ხუთ ნიჩბიანი საჰაერო ხრახნები;
- ნახ.1.6: ხრახნის ფორმები ზედ ხედში: სწორი მუდმივი ქორდით; სწორი ცვალებადი ქორდით და ხმლისებრი;
- ნახ.1.7: საჰაერო ხრახნების ფრთოვანების/ნიჩბების დაყენების კუთხის მუდმივი, ხელით ცვალებადი და ავტომატურად ცვალებადი კონსტრუქციები;
- ნახ.1.8: საჰაერო ხრახნის ძირითადი პარამეტრები: i -ფრთების რიცხვი; D -ხრახნის დიამეტრი; ...;
- ნახ.1.9: გრაფიკი. საჰაერო ხრახნის პროფილის ხარისხის დამოკიდებულება ფარდობით სისქეზე და შეტევის კუთხეზე;
- ნახ.1.10: საჰაერო ხრახნის პარამეტრები პროფილში: W -ნაკადის ფარდობითი სიჩქარეა ფრთოვანას მიმართ; ...;
- ნახ.1.11: საჰაერო ხრახნის ბიჯის ვიზუალური წარმოდგენა;
- ნახ.1.12: W -მიმწყდომი ნაკადის სიჩქარე; θ -სპირალური კუთხე ჰაერის მიმწყდომ ნაკადსა და ბრუნვის ღერძს შორის; ...;
- ნახ.1.13: საჰაერო ხრახნზე მოსული დატვირთვების ვიზუალური წარმოდგენა;
- ნახ.1.14: ხრახნის ზემოქმედება თვითმფრინავზე: A -კუთხე ხრახნის ბრუნვის ღერძსა და გადაადგილების მიმართულებას ...;
- ნახ.1.15: ორი ან მეტ ძრავიანი თვითმფრინავებისთვის საპირისპიროდ მბრუნავი ხრახნები და თანაღერძული კონტრ-მბრუნავი საჰაერო ხრახნები;
- ნახ.1.16: გრაფიკი. N , P და η_b -ის ცვლილების ხასიათი ფრენის სიჩქარის მიხედვით, თუ ფრთის დაყენების კუთხე φ და ხრახნის ბრუნვათა სიხშირე n არ იცვლება;

- ნახ.1.17: ხრახნის გარსშემოდენა შეწოვის არეში ჰაერს გააჩნია მაღალი წნევა +P და დაბალი სიჩქარე -V∞; ...;
- ნახ.1.18: გრაფიკი საჰაერო ხრახნის მკვ-ის ηხ ცვლილება სიჩქარეზე დამოკიდებულებით ფრთოვანების დაყენების სხვადასხვა კუთხეების დროს (φ);
- ნახ.1.19: აეროდინამიკური პროფილზე სრული აეროდინამიკური ძალის გეგმილები: y-ამწევი ძალა; x-წინაღობის ძალა; ...;
- ნახ.1.20: ხრახნის ნიჩბის გრეხილი ფორმა: α-შეტევის კუთხე α1>α2>α3>α4;
- ნახ.1.21: მუდმივი სიჩქარის საჰაერო ხრახნი: როდესაც სახელური გადაადგილდება წინ საჰაერო ხრახნი ავტომატურად ...;
- ნახ.1.22: სქიმიტარული ხმლისებრი საჰაერო ხრახნი;
- ნახ.1.23: ექსპერიმენტული საჰაერო ხრახნის მოდელი;
- ნახ.1.24: ბიონიკური საჰაერო ხრახნი;
- ნახ.1.25: A აგრიგალება თავისუფალი ხრახნის ფრთოვანას ბოლოში B აეროდინამიკური არხით მიღებული ეფექტი
- ნახ.1.26: სარტყელიანი საჰაერო ხრახნი (ხრახნი რგოლში);
- ნახ.1.27: Q-tip საჰაერო ხრახნი;
- ნახ.1.28: ფრთის ბოლოებზე წარმოქმნილი გრიგალების შედარება ნორმალურ ფრთაზე წარმოქმნება შედარებით დიდი დიამეტრის ...;
- ნახ.1.29: Q-tip ხრახნის მიერ წარმოქმნილი ეფექტი ნორმალურ ხრახნთან შედარებით;
- ნახ.1.30: NASA-ში შემუშავებული საჰაერო ხრახნის კონცეპტი დაბალი სიჩქარეებისთვის;
- ნახ.1.31: აგრიგალებით გამოწვეული ჰაერის ნაკადის ტრაექტორიის ცვლილება ფრთის უკან;
- ნახ.1.32: ძალათა განაწილება, აეროდინამიკურ პროფილზე ჰაერის ნაკადის აგრიგალებით გამოწვეული, გარსშემოდენი ...;
- ნახ.1.33: საჰაერო ხრახნი ფრთოვანების T-სებრი დაბოლოებებით (პროპლეტებით);
- ნახ.1.34: ფრთის ბოლოებში წარმოქმნილი დაგრიგალების ვირტუალური ანალიზი; ორმხრივი winglet-ის უპირატესობა;
- ნახ.1.35: T-სებრი და ნორმალური საჰაერო ხრახნების შედარება;
- ნახ.1.36: 2 ფრთოვანიანი და მრავალ ფრთოვანიანი საჰაერო ხრახნები;
- ნახ.1.37: „ზიპლაინის“ დრონებში სექციური საჰაერო ხრახნი კონცეფცია;
- ნახ.1.38: საჰაერო ხრახნი ფრთოვანას უკანა კიდეზე ხერხისებური ტურბულიზატორებით; Q-tip პროპლეტის მქონე ხრახნი;
- ნახ.1.39: ხმის აქტიური კონტროლის ANC სისტემის მოქმედების პრინციპული სქემა;
- ნახ.1.40: მეთოდისთვის შემუშავებული საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას ზედაპირის ნიმუში. ...;
- ნახ.1.41: ფროვანი მასალით დაფარული საჰაერო ხრახნების ხმის დაწნევის დონის სინშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკები...;
- ნახ.1.42: ხმის აქტიური კონტროლი ANC სისტემა;

- ნახ.2.1: სასრულ მოცულობათა ბადე, 2 განზომილებიანი დინების u სიჩქარის კომპონენტისათვის;
- ნახ.2.2: სკალარული მოცულობა, უწყვეტობის განტოლების დისკრეტიზაციისთვის;
- ნახ.2.3: SIMPLE ალგორითმის მუშაობის ბლოკ-სქემა;
- ნახ.2.4: Ansys Workbench 19.2 საწყისი გვერდი Project Schematic განყოფილებაში მოცემულია (fluid flow) fluent მოდულები ...;
- ნახ.2.5: Ansys design modeler-ში გეომეტრიის მომზადება სიმულაციისთვის სურათზე ვხედავთ: 1) გარემოს; 2) როტაციული ზონა; ...;
- ნახ.2.6: სასრულ ელემენტთა ბადის მომზადება Mesh editor-ით: 1. სასრულ ელემენტთა ბადე გარემოსთვის შედარებით მსხვილი; ...;
- ნახ.2.7: Fluent-ის მოდულში სიმულაციის მომზადების სქემა: გამოთვლითი მოდელების არჩევა; ...;
- ნახ.2.8: მოდულში სიმულაციის მომზადების მეორე ეტაპი: სიმულაციის სქემის შერჩევა; საკონტროლო პარამეტრები არჩევა; გადაფარვის პირობების არჩევა;
- ნახ.2.9: Fluent-ში პარამეტრების ინიციალიზაცია და სიმულაციის დაწყება;
- ნახ.2.10: სიმულაციის მიმდინარეობის მონიტორინგი ნარჩენების-residuals და ამწევი ძალის მნიშვნელობის ამსახველი გრაფიკი იტერაციების მიხედვით;
- ნახ.2.11: სიმულაციის შედეგების ვიზუალიზაცია პოსტ პროცესორში;
- ნახ.2.12: სადოქტორო კვლევის სიმულაციური ნაწილის დამახასიათებელი ბლოკ სქემა;
- ნახ.2.13: ფრთოვანას კიდურა $R=12$ სმ ($V_{\infty}=452.4$ კმ/ს) მონაკვეთის თვის დათვლილი აეროდინამიკური პროფილების გრაფიკები;
- ნახ.2.14: ფრთოვანას შუა $R=7$ სმ ($V_{\infty}=264$ კმ/ს) მონაკვეთის თვის დათვლილი აეროდინამიკური პროფილების გრაფიკები;
- ნახ.2.15: ფრთოვანას ვენტრალური $R=2$ სმ ($V_{\infty}=75.4$ კმ/ს) მონაკვეთის თვის დათვლილი აეროდინამიკური პროფილების გრაფიკები;
- ნახ.2.16: ფართოდ გავრცელებული საჰაერო ხრახნის მოდელი ფრთოვანას რომბისებრ ფორმით;
- ნახ.2.17: generative shape designe მოდული: 1) ზედაპირი; 2) multy-section surface-ის ხელსაწყოები; 3) multi-section surface;
- ნახ.2.18: საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას მოდელის ასაგებად საჭირო სტრუქტურები: 1. ცენტრალური პროფილი; ...;
- ნახ.2.19: საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას მნიშვნელოვანი ზონები 1-ფრთოვანას ბოლო; 2-ფრთოვანას ქიმი/წინა კიდე(leading edge); ...;
- ნახ.2.20: ფრთოვანას ბოლოებში დაგრიგალების შემცირებისთვის შემუშავებული საჰაერო ხრახნები: ...;
- ნახ.2.21: ეტალონური ტრადიციული საჰაერო ხრახნი;
- ნახ.2.22: კონცეპტუალური საჰაერო ხრახნები
- ნახ.2.23: კომპიუტერული სიმულაციების შედეგად მიღებული საჰაერო ხრახნების პარამეტრების გრაფიკი;
- ნახ.2.24: ყველაზე პერსპექტიული კონცეფციები...;
- ნახ.2.25: საჰაერო ხრახნი ფრთოვანების რევერსულ თოლიასებრი განლაგებით;

- ნახ.2.26: საჰაერო ხრახნი თოლიასებრი ფრთოვანებით და Q-tip პროპლეტებით;
- ნახ.2.27: საჰაერო ხრახნი ფრთოვანას ოპტიმიზებული დაბოლოებით;
- ნახ.2.29: საჰაერო ხრახნი ფრთოვანას წინა ნაწილში ტურბულიზატორებით;
- ნახ.2.29: საჰაერო ხრახნი ფრთოვანას ისრისებურობით;
- ნახ.3.1: 1) კვლევის წინა საფეხურებზე სიმულაციებისთვის გამოყენებული სასრულ ელემენტთა ბადე; 2) ოპტიმიზებული სასრულ ელემენტთა ბადე;
- ნახ.3.2: საჰაერო ხრახნების ენერგოეფექტურობის მახასიათებელი გრაფიკი 1 Nm ნიუტონ მეტრი მომენტის შედეგად მიღებული ამწევი ძალა N ნიუტონი;
- ნახ.3.3: სიმულაციის შედეგად მიღებული ტურბულენტური ჰაერის მასები ხრახნის გარშემო, ფერთა გრადიენტით კი დატანილია...;
- ნახ.3.4: საჰაერო ხრახნების პარამეტრების გამოსაცდელი სტენდის პრინციპული სქემა. 1-საჰაერო ხრახნი;...;
- ნახ.3.5: 1)კვების ბლოკი, 2) Li-po აკუმულატორ Ovonic 3S, 50C,...;
- ნახ.3.6: 1)სერვო ტესტერი, 2)ელექტრო ძრავი Exceed RC Rocket 3010..;
- ნახ.3.7: 3D პრინტერი Creality Ender 3 Pro;
- ნახ.3.8: საჰაერო ხრახნი 3D ბეჭდვისთვის. N-ამწევი ძალა; F-ცენტრიდანული ძალა;
- ნახ.3.9: საჰაერო ხრახნის ნახევარი ნაწილის ორიენტაცია 3D პრინტერზე;
- ნახ.3.10: საჰაერო ხრახნების დამზადებული მოდელები...;
- ნახ.3.11: ნახაზზე ნაჩვენებია საჰაერო ხრახნების ენერგოეფექტურობის (1 ამპერი დახარჯული ენერგიით მიღებული წევის ძალის)...;
- ნახ.3.12: საჰაერო ხრახნების აკუსტიკური მახასიათებლების ბრუნთა რიცხვებზე დამოკიდებულების გრაფიკი;
- ნახ.3.13: თოლიასებრი საჰაერო ხრახნის ფრთოვანაზე ჰაერის გარსდენის ტრაექტორია. V1- ჰაერის ნაკადის ტრაექტორია;
- ნახ.3.14: ფრთოვანას ბოლოში წარმოქმნილი გრიგალის გავლენა ფრთოვანას უკან დაცვრებულ ჰაერის ნაკადზე...;
- ნახ.3.15: ნორმალური და თოლიასებრი საჰაერო ხრახნებით აღჭურვილ კვადროკოპტერზე...;
- ნახ.3.16 A-კომპიუტერული სიმულაციების შედეგად მიღებული ენერგოეფექტურობის მახასიათებლები, B-რეალურ გარემოში გამოცდებით მიღებული ენერგოეფექტურობის მახასიათებლები

შესავალი

თემის აქტუალობა: საჰაერო ხრახნი, დღესდღეობით, ვერტიკალურ აფრენა-დაფრენის (შვეულმფრენი, კვადროკოპტერი და სხვა) და დაბალ ბგერამდელ სიჩქარეებზე მფრენ აპარატებში (თვითმფრინავი, ავტოჟირი და სხვა) ძირითად წევის ძალის შესაქმნელ აგრეგატს წარმოადგენს (გამონაკლისად შეიძლება ჩაითვალოს რამდენიმე აპარატი, რომლებშიც ვერტიკალური აფრენა ხორციელდება რეაქტიული ძრავების საშუალებით), იგი შედგება რადიალურად განლაგებული, ღერძის გარშემო, ერთ სიბრტყეში მბრუნავი ფრთოვანების/ნიჩბების ანაწყობისგან, რომელიც ძრავადან ან სხვა წყაროდან მიღებულ ბრუნვით მოძრაობას გარდაქმნის წევის ძალის ენერგიად, კერძოდ საჰაერო ხრახნის თითოეული ნიჩაბი ღერძის გარშემო ბრუნვისას წარიტაცებს ჰაერს და განდევნის მას ბრუნვის სიბრტყის უკანა მხარეს (აპარატის მოძრაობის საწინააღმდეგო მიმართულებით), შედეგად წარმოიქმნება რეაქციის ძალა და საჰაერო ხრახნი და შესაბამისად საფრენი აპარატი გადაადგილდება გატყორცნილი ჰაერის საპირისპირო მიმართულებით. თავად ფრთოვანა თვითმფრინავის ფრთის მსგავსად წარმოადგენს აეროდინამიკური პროფილის მქონე აგრეგატს, რომელზეც ამწევი/გამწევი ძალა წარმოიქმნება ფრთოვანას ზედაპირებს შორის წნევათა სხვაობით. თემის აქტუალობას განსაზღვრავს ისიც, რომ საჰაერო ხრახნები ძალზედ გავრცელებულია მრავალ სფეროში და გამოიყენება სამოქალაქო თუ სამხედრო დანიშნულების უმეტეს დრონებში თუმცა ხრახნებით აღჭურვილი დრონებს, როგორც წესი, ძალზედ მაღალი ხმაურის დონე გააჩნიათ და ხშირ შემთხვევაში აპარატებზე გარკვეული სახის შეზღუდვები წესდება ამის გამო.

სადოქტორო სამეცნიერო *კვლევის მიზანს* წარმოადგენს ისეთი საჰაერო ხრახნის კონსტრუქციის და კონსტრუქციული ჩანართების მონახვა, რომლებიც გააუმჯობესებენ საჰაერო ხრახნის მახასიათებლებს: იქნება ეს გაზრდილი ეფექტურობის მახასიათებელი, გაზრდილი ამწევი ძალის მახასიათებელი, შემცირებული წინააღობის ძალის მახასიათებელი, შემცირებული ხმაურის მახასიათებელი.

სადოქტორო სამეცნიერო ნაშრომის *მეცნიერულ სიახლეს* წარმოადგენს სამეცნიერო კვლევის შედეგად მიღებული საჰაერო ხრახნის კონსტრუქცია, რომელმაც ტრადიციულ საჰაერო ხრახნის მოდელთან შედარებით საგრძნობლად გაზრდილი ენერგოეფექტურობის მახასიათებელი და შემცირებული ხმაური აჩვენა. აქედან გამომდინარე სადოქტორო კვლევის შედეგად მიღებული საჰაერო ხრახნის კონსტრუქციის *პრაქტიკული გამოყენება* თვალსაჩინოა და იგი შეიძლება გამოყენებული იქნეს თანამედროვე, როგორც უპილოტო ასევე პილოტირებად საფრენ აპარატებში. აღნიშნული გაუმჯობესებულ მახასიათებლების საჰაერო ხრახნის პრაქტიკული გამოყენება მიზანშეწონილია რამდენიმე კუთხით: ერთ-ერთი უმთავრესია საჰაერო ხრახნის მაღალი ენერგოეფექტურობა, ეს პირდაპირ კავშირშია ამ ხრახნებით აღჭურვილი საფრენი აპარატების ფრენის დროსთან და აუმჯობესებს მას. მეორე, არანაკლებ მნიშვნელოვანი ფაქტორია, საჰაერო ხრახნის მიერ გამოცემული ხმაური ამ მოვლენის შემცირებაც შესაძლებელია კვლევის შედეგად შემუშავებული კონსტრუქციით.

სამეცნიერო კვლევის *შედეგების უტყუარობა*: კვლევის განმავლობაში დამუშავდა ათეულობით საჰაერო ხრახნის კონსტრუქცია, როგორც კომპიუტერული ისევე სტენდზე გამოცდების მეთოდებით. ამ განსხვავებული კვლევების მეთოდებიდან მიღებული იქნა საჰაერო ხრახნების კუთრი მახასიათებლები და მოხდა მათი ერთმანეთთან შედარება, რა დროსაც დაფიქსირდა ამ პარამეტრების პროპორციული გადანაწილების მსგავსება გამოკვლეულ საჰაერო ხრახნებს შორის. აღნიშნული ამტკიცებს კვლევის შედეგთა უტყუარობას, ვინაიდან ორმა ურთიერთ კავშირში არ მყოფმა კვლევის მეთოდმა თანაბარი შედეგები გამოავლინა. ორივე მეთოდის მიხედვით გამოიკვეთა ერთი ყველაზე მაღალეფექტური და დაბალი ხმაურის მქონე საჰაერო ხრახნი.

ნაშრომის აპრობაცია

სადოქტორო კვლევის განმავლობაში განხორციელდა არაერთი სამეცნიერო აქტივობა:

- აღნიშნული თემით მოხდა მონაწილეობის მიღება რამდენიმე სამეცნიერო კონფერენციაში,
 1. 2019 წ. საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის მე-13 ღია საერთაშორისო კონფერენცია. თემა „საავიაციო აირტურბინული ძრავების ქვიშისა და მტვრის ზემოქმედებისაგან დაცვა“.
 2. 2020 წ. საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის მე-14 ღია საერთაშორისო კონფერენცია. თემა „საჰაერო ხრახნის ეფექტურობის ამაღლება მისი გეომეტრიული ფორმების ოპტიმიზაციის გზით“.
 3. 2023 წ. INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY SCIENTIFIC AND PRACTICAL INTERNET CONFERENCE. INOVATIVE PROJECTS AND PARADIGMS OF INTERNATIONAL EDUCATION. (უკრაინა).
 4. 2023 წ. საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის სტუდენტთა 16-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია. „საჰაერო ხრახნის ეფექტურობის ამაღლება მისი გეომეტრიული ფორმების ოპტიმიზაციის გზით“.
- სტატიები გამოქვეყნდა შემდეგ სამეცნიერო ჟურნალებში:
 1. 2018 წ. A. Maisuradze, S.mebonia, M.Chelidze, N. Tabatadze. International Scientific Journal - Problems of mechanics. „dynamic model of security module of the turbojet of the aircraft engines“. გვ. 71. №4(73)/2018. ISSN 1512-0740.
 2. 2019 წ. ა. მაისურაძე, ს. მებონია, მ. ჭელიძე, ნ. ტაბატაძე. მეცნიერება და ტექნოლოგიები. “საფრენი აპარატის ტურბორეაქტიული ძრავას დამცავი მოდულის დინამიკური დატვირთვების განსაზღვრის მეთოდიკა”. გვ. 76. 1(730)-2019. ISSN 0130-7061.
 3. 2023 წ. N. Tabatadze. AVIATION. ვილნიუსის გედამინოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. “PROPELLER WITH HIGH EFFICIENCY AND REDUCED NOISE EMISSION”. ISSN 1648-7788 / eISSN 1822-4180
- სამეცნიერო კვლევის ფარგლებში განხორციელდა ვიზიტი ვილნიუსის, ატანას გუსტაის საავიაციო ინსტიტუტში - Antanas Gustaitis' Aviation Institute.
- აღნიშნული კვლევა განხორციელდა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით [PHDF-19-4077, “საჰაერო ხრახნების ეფექტურობის ამაღლება მათი გეომეტრიული ფორმების ოპტიმიზაციის გზით”]

კვლევიდან მიღებული შედეგების საფუძველზე შემუშავებულ საჰაერო ხრახნის კონსტრუქციაზე გაკეთდა საპატენტო განაცხადი სასარგებლო მოდელზე, განაცხადის ნომერი AU 2023 16250.

თავი I. საჭაერო ხრახნის მოქმედების პრინციპი, ძირითადი პარამეტრები, ტიპები და პრობლემური საკითხები.

ბიბლიოგრაფიული მასალის ანალიზი

1.1. საჭაერო ხრახნების განვითარების ანალიზი

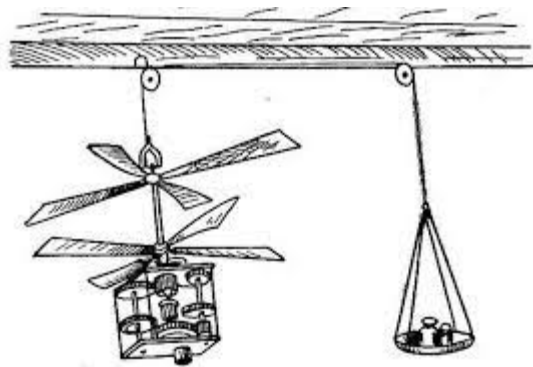
საჭაერო ხრახნების განვითარებამ დიდი როლი ითამაშა ზოგადად ავიაციის განვითარებაში, ვინაიდან ავიაციის გარიჟრაჟზე აღნიშნული აგრეგატი წარმოადგენდა ჰაერში წვეის ძალის შექმნის ერთადერთ საშუალებას (აეროდინამიკური ფრენის პრინციპით მფრენ აპარატებში), თანაც მისი კონსტრუქციული სიმარტივის გამო, დამზადება პრობლემას არ წარმოადგენდა. საჭაერო ხრახნების განვითარება შეიძლება ბუნებრივ მოვლენებსაც დავუკავშიროთ მაგალითად ზოგიერთი ჯიშის ხის ფოთლის ვარდნისას ეს ფოთოლი შემოწერს ისეთ ტრაექტორიას, რომელიც ძალზედ წააგავს ხრახნის მოძრაობის ტრაექტორიას, სწორედ ასეთ თვისებებთან მიმსგავსებით შეიძლებოდა შექმნილიყო პირველი საჭაერო ხრახნები. მაგალითად შეგვიძლია მოვიყვანოთ ნეკერჩხალი, რომლის თესლიც მიწაზე ვარდნისას ასრულებს საკმაოდ ჩქარ ბრუნვით მოძრაობას და თავად თესლიც საკმაოდ წააგავს საჭაერო ხრახნის ფრთოვანას.

ისტორიაში პირველი ცნობები ვერტიკალური ფრენის შესახებ მოდის ჩინეთიდან სადაც, ჯერ კიდევ ქრისტეს შობამდე 400 წლით ადრე, ბავშვები თამაშისთვის იყენებდნენ ბამბუკისგან დამზადებულ საფრენ სათამაშოებს (შეიძლება ითქვას საჭაერო ხრახნებს), რომელიც წამოადგენდა ჯობზე დამაგრებული ფრთოვანას ნახ.1.1, ბრუნვით მოძრაობას ანიჭებდნენ ხელებით ეს მოძრაობა კი იწვევდა ამწევი ძალის შექმნას (როგორც საჭაერო ხრახნის შემთხვევაში). შეიძლება ითქვას რომ აღნიშნული მოდელი თანამედროვე საჭაერო ხრახნების პრიმიტიულ ანალოგს და წინაპარს წარმოადგენდა.



ნახ.1.1 ბამბუკის საფრენი სათამაშო

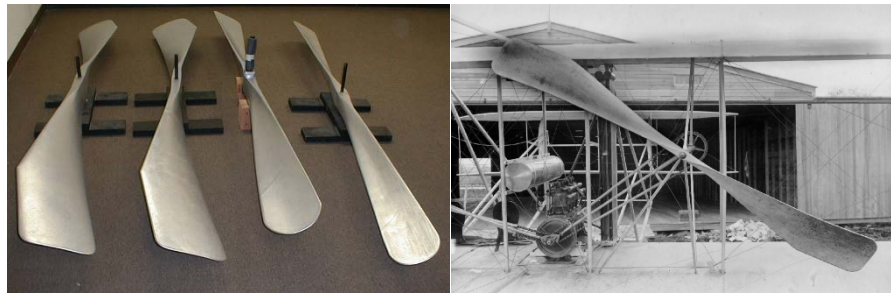
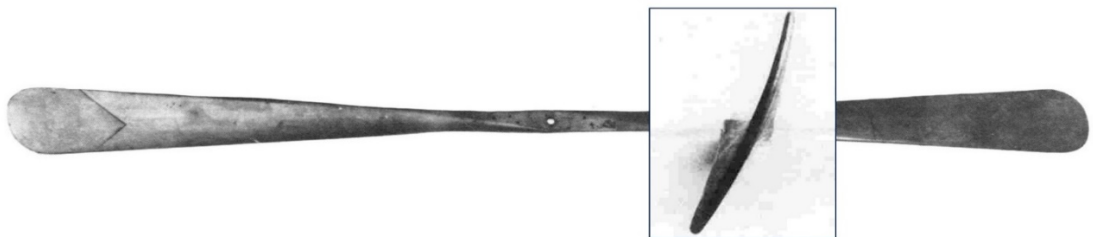
საჰაერო ხრახნებმა განვითარების საწყისებიდან დღემდე გრძელი გზა განვლეს, 1754 წლის ივლისში ცნობილმა რუსმა მეცნიერმა და მწერალმა მიხეილ ლომონოსოვმა შექმნა და წარუდგინა რუსეთის სამეცნიერო აკადემიას ხსენებული ჩინური ბამბუკის საფრენი სათამაშოს მსგავსი საჰაერო ხრახნის მოდელი, რომელიც ბრუნვით მოძრაობას იღებდა ზამბარის საშუალებით. იგი გამოგონებას მოიაზრებდა როგორც მეტეოროლოგიური ინსტრუმენტების ჰაერში ატანის მეთოდს. უშუალოდ ფრენისთვის 1784 წელს ფრანგმა გამომგონებელმა და საჰაერო ბურთით ფრენის პიონერმა ჟან პიერ ბლანჩარდმა საჰაერო ბურთზე დაამონტაჟა ხელით მართვადი საჰაერო ხრახნი, ეს იყო პირველი ჩანაწერი პროპულსური ფრენის შესახებ.



ნახ.1.2 მიხეილ ლომონოსოვის მოდელი საჰაერო ხრახნებით

თანამედროვე საჰაერო ხრახნების და ავიაციის ერთ-ერთ ფუძემდებლებად უნდა ჩაითვალოს ცნობილი ამერიკელი ავიატორები და გამომგონებლები ძმები ორვილ და ვილბულ რაიტები, მათი ავიაციისადმი მისწრაფება დაიწყო იქიდან როდესაც ერთ დღეს მამამ საჩუქრად მოუტანა ზემოთხსენებული გამომგონებლის

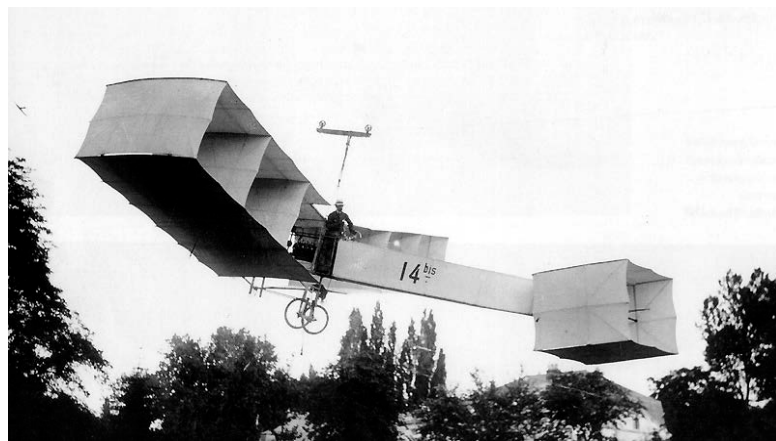
ალფონს პენაუდის მიერ შექმნილი საფრენი სათამაშო. სწორედ ძმები რაიტები იყვნენ პიონერები დაგრეხილი აეროდინამიკური პროფილის მქონე საჰაერო ხრახნებში. სანამ სხვა ინჟინრებს ჰქონდა მცდელობა საჰაერო ხრახნები მიემსგავსებინათ გემის ხრახნებისთვის, ძმებმა რაიტებმა გაანალიზეს რომ საჰაერო ხრახნი არსებითად იგივე იყო რაც თვითმფრინავის ფრთა და მისი ანალიზისთვის შეეძლოთ გამოეყენებინათ ადრინდელი, სახლში გაკეთებულ აეროდინამიკურ მილში თვითმფრინავის ფრთებზე ჩატარებული ექსპერიმენტები. შედეგად მათ მიერ დამზადებული საჰაერო ხრახნები იყო უფრო ეფექტურები ვიდრე მანამდე შექმნილი ნებისმიერი სხვა საჰაერო ხრახნი, ვინაიდან მათ მოდელში ნიჩაბი/ფრთოვანა გარდა გაუმჯობესებული აეროდინამიკური ფორმისა, სიგრძის გასწვრივ განიცდიდა ფორმის გრეხას, ეს საჭირო იყო, რომ შენარჩუნებულიყო ერთნაირი შეტევის კუთხე ფრთოვანას მთელი სიგრძის გასწვრივ.



ნახ.1.3 ძმები რაიტების მიერ შექმნილი საჰაერო ხრახნი, რომელსაც გააჩნდა აეროდინამიკური პროფილი და ფრთოვანას ფორმის გრეხა სიგრძის გასწვრივ.

მაკაგონი იყო ხის მასალა, რომელსაც ძირითადად იყენებდნენ საჰაერო ხრახნების დასამზადებლად პირველი მსოფლიო ომის დროს, მაგრამ ომის განმავლობაში ხრახნთა დასამზადებლად ასევე გამოიყენებოდა: კაკლის ხის მასალა, მუხის მასალა, ალუბლის ხის მასალა და იფანის მასალა. ბრაზილიელი გამომგონებელი და ავიაციის პიონერი ალბერტო სანტოს დუმონტი, რომელიც ძმებ რაიტებამდე

აპროექტებდა საჰაერო ხრახნებს, თუმცა არა ისეთ ეფექტურს, თავისი საჰაერო ხომალდებისათვის, იგი ზოგიერთ თავის დიზაინში საჰაერო ხრახნების დასამზადებლად იყენებდა ფორმირებულ ალუმინის ნაჭრებს, რომლებიც ქმნიდნენ აეროდინამიკური პროფილის ფორმას, მაგრამ მათი ეს დადებითი მხარე, პროფილის სიმრუდე, ფრთოვანების გრძივი დაგრეხვის გარეშე თამაშობდა უარყოფით როლს და შედეგად ასეთი ხრახნები გამოდიოდა ნაკლებად ეფექტური ვიდრე სწორი პროფილის მქონე საჰაერო ხრახნები. ყველაფრის მიუხედავად ეს შესაძლოა ყოფილიყო პირველი შემთხვევა საჰაერო ხრახნის კონსტრუქციაში ალუმინის გამოყენებისა. 1906 წელს ალბერტო სანტოს დუმონტმა შექმნა ბიპლანი სახელად 14-bis და თავის ექსპერიმენტებში დაგროვილი გამოცდილებისა და ცოდნის ხარჯზე ამ საჰაერო ხომალდში გამოიყენა ალუმინისგან დამზადებული საჰაერო ხრახნი ფოლადის ღერძით. ხრახნი განთავსებული იყო აპარატის უკანა მხარეს ანუ წარმოადგენდა მაბიძგ ხრახნს. უნდა აღინიშნოს ისიც რომ თავდაპირველად საფრენი აპარატის უკან განლაგებულ საჰაერო ხრახნს, რომელიც მაბიძგის როლს თამაშობდა უწოდებდნენ პროპელერს “Propeller” ხოლო აპარატის წინ განლაგებულ გამწევ ხრახნს უწოდებდნენ ტრაქტორს “Traqtor”, დროთა განმავლობაში კი მოხდა ორივე დასახელების გაერთიანება და დღესდღეობით მოიხსენიებენ როგორც პროპელერს ან საჰაერო ხრახნს.



ნახ.1.4 ალბერტო სანტოს დუმონტის საფრენი აპარატი 14-bis 1906 წლის ნოემბერი

დაბალ სიჩქარეებზე საფრენი საჰაერო ხრახნებისთვის აეროდინამიკა თითქმის შემუშავებული იყო 1920 იან წლებში, მაგრამ მოგვიანებით დიდი სიმძლავრეების

და უფრო პატარა დიამეტრის მქონე ხრახნების მოთხოვნილებებმა შექმნა კომპლექსური პრობლემები.

საჰაერო ხრახნთა კვლევა, აერონავტიკის ეროვნულ მრჩეველთა კომიტეტმა (NACA) დაიწყო 1916 წელს ვუილიამ ფრედერიკ დურანდის მეთაურობით. 1920 წლის 11 ივნისს NACA-მ გახსნა თავისი პირველი აეროდინამიკური მილი 1927 წელს კი გახსნეს სპეციალურად საჰაერო ხრახნების კვლევაზე ორიენტირებული აეროდინამიკური მილი. ეს ორი წარმომადგენელი მცირედაც იმ აეროდინამიკურ მილთაგან, რომლებიც დღესდღეობით NACA-ს და NASA-ს დაქვემდებარებაშია. ამ კვლევების წყალობით დღესდღეობით NACA-ს გააჩნია უდიდესი ბაზა აეროდინამიკური პროფილებისა.

თუ გადავხედავთ საჰაერო ხრახნების კონსტრუქციის განვითარების ისტორიას მივხვდებით, რომ დღესდღეობით ისინი, პრიმიტიულ ბამბუკისგან გამოთლილ ბრტყელ ზედაპირებიან ფრთოვანებთან და ადრეულ საჰაერო ხრახნებთან შედარებით საკმაოდ რთული ფორმები და კომპლექსური კონსტრუქცია გააჩნიათ. დროთა განმავლობაში მოხდა ხრახნის ნიჩბების ფორმის სახეცვლილება და მისი აეროდინამიკურ გარსდენასთან მისადაგება, მათ შეიცვალეს პროფილის ფორმა უკეთესი გარსდენის და გამწევი ძალის შექმნისთვის, მოხდა მათი გრძივი გრეხა, ბრუნვისას ნიჩბების მთელს ზედაპირზე ჰაერის თანაბარი შეტევის კუთხით მიწოდებისთვის, ვინაიდან ნიჩბის სიგრძის სხვადასხვა კვეთაში მისი ჰაერთან ურთიერთქმედების სიჩქარე სხვადასხვაა, ამის გამო მიექცა ყურადღება ნიჩბის აეროდინამიკური პროფილის ცვლილებას მისი სიგრძის გასწვრივ. სიჩქარეების მატებასთან ერთად მოხდა წინხედში საჰაერო ხრახნის ფორმების ცვლილება, ასევე შეიცვალა ნიჩბების რაოდენობაც. დიდად წინ გადადგმულ ნაბიჯს წარმოადგენდა ცვალებადი ნიჩბის დაყენების კუთხის საჰაერო ხრახნების შემუშავება, ამან ერთი ორად გააუმჯობესა საფრენი აპარატები მანევრირების თუ ეფექტურობის მახასიათებლები. უნდა აღინიშნოს მასალებიც, ვინაიდან სიმძლავრეებისა და სიჩქარეების ზრდამ გამოიწვია უფრო მტკიცე მასალების გამოყენების აუცილებლობა, ხის მასალები იქნებოდა ეს მეტალები თუ კომპოზიციური მასალები.

1.2. საჭაერო ხრახნების ძირითადი პარამეტრები, კონსტრუქცია და

მოქმედების პრინციპი

საფრენი აპარატის ჰაერში გადაადგილებისას წვევის ძალის წარმოქმნისთვის საჭიროა საფრენ აპარატსა და ჰაერს შორის რეაქციული ურთიერთქმედება, უნდა მოხდეს ჰაერის ჰავლის გატყორცნა, რათა წარმოიქმნას საპირისპირო რეაქცია და აპარატი გადაადგილოს საწინააღმდეგო მხარეს. ამ ჰავლის წყარო შეიძლება იყოს რეაქტიული ძრავა ან საჭაერო ხრახნი. ძრავას შემთხვევაში მისი საქმენიდან გამოტყორცნილი ჰაერის ჰავლია რეაქციის შემქმნელი, საჭაერო ხრახნის შემთხვევაში კი ხრახნის ნიჩბების მიერ წარტაცებული და უკან გატყორცნილი ჰაერის მასა, შედეგად, ხრახნი და შესაბამისად აპარატი გადაადგილდება გატყორცნილი ჰაერის საპირისპიროდ. საჭაერო ხრახნის შემთხვევაში უნდა აღინიშნოს წვევის ძალის შემქმნელი კიდევ ერთი ფაქტორი, ვინაიდან მისი ნიჩაბი წარმოადგენს ფრთის მაგვარ აგრეგატს, შესაბამისად გააჩნია აეროდინამიკური პროფილი და მახასიათებლებითაც მცირედ განსხვავდება ფრთისაგან, შეგვიძლია ვთქვათ რომ ისევე როგორც ფრთის შემთხვევაში, ნიჩაბზეც წარმოიქმნება აეროდინამიკური ამწევი ძალა მის ზედაპირებს შორის წნევათა სხვაობის გამო, რაც ხრახნის მიერ შექმნილი წვევის საკმაო ნაწილს წარმოადგენს.

საჭაერო ხრახნების კლასიფიცირება შეიძლება მოვახდინოთ რამდენიმე ფაქტორის მიხედვით, იქნება ეს ფრთოვანების რაოდენობა; ფრთოვანების ფორმა; ფრენის სიჩქარეები; ბრუნვის სიბრტყეთა რაოდენობა და სხვა.

1.2.1. საჭაერო ხრახნის ფრთოვანების რიცხვი

ფრთოვანების-ნიჩბების რაოდენობის მიხედვით კლასიფიკაციისას განასხვავებენ: ორ; სამ; ოთხ და მრავალ ნიჩბიან ხრახნებს. ნიჩბების რაოდენობის ზრდა გამოიწვია მეტი წვევის ძალის შექმნის მოთხოვნილებამ. ნიჩბის დამატებით იზრდება ხრახნის საერთო მუშა ზედაპირის ფართობი და შესაბამისად ეს იწვევს წვევის ძალის ზრდას, თუმცა ასევე იზრდება საჭაერო ხრახნის აეროდინამიკური წინაღობა და ამის გამო არ ხდება მარგი ქმედების კოეფიციენტის გაზრდა, ამასთან

ფრთოვანების რაოდენობის გაორმაგება არ ნიშნავ ხრახნის წვევის ძალის გაორმაგებას რაც მეტი ფრთოვანა აქვს საჰაერო ხრახნს, მით ნაკლებია წვევის ძალის ნამეტი თითოეულ ფრთოვანაზე.

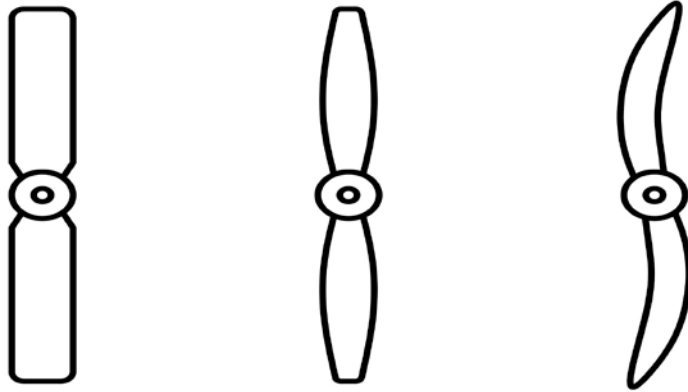


ნახ.1.5 ორი; სამი; ოთხი და ხუთ ნიჩბიანი საჰაერო ხრახნები

ფრთოვანების რაოდენობა და ფორმა შეირჩევა ძრავას სიმძლავრის მიხედვით და საჰაერო ხრახნის მაქსიმალური მარგი ქმედების კოეფიციენტის (მქკ-ს) უზრუნველყოფის აუცილებლობიდან, მისი კონსტრუქციის გარკვეული გართულებისა და საიმედოობის შემცირების გარეშე. ძრავას ძალზე დიდი სიმძლავრის დროს ნიჩბების ოპტიმალური რიცხვი შეადგენს 6-8-ს. ამ შემთხვევაში მიზანშეწონილია გამოყენებული იქნეს ორ რიგიანი საჰაერო ხრახნები არა უმცირეს ოთხი ფრთისა თითოეულ რიგში. ასეთ ხრახნებს აქვთ უფრო მაღალი მქკ ვიდრე ერთ რიგიან ხრახნებს ფრთების იგივე რაოდენობით. გარდა ამისა ორ რიგიანი ხრახნები არ წარმოქმნიან რეაქტიულ მაბრუნ მომენტს, რომელიც უარყოფითად მოქმედებს თვითმფრინავზე აფრენისა და ფრენის დროს.

1.2.2. საჰაერო ხრახნის ფრთოვანების ფორმა

ზედხედში ნიჩბის ფორმის მიხედვით შეიძლება განვასხვაოთ: სწორი მუდმივი ქორდით; სწორი ცვალებადი ქორდით და ხმლისებრი (სქიმიტარული). ზედხედში ნიჩბის ფორმის ცვლილება ძირითადად გამოწვეულია საფრენი აპარატის ფრენის სიჩქარეების ზრდით, შესაბამისად სწორი ფორმის ნიჩბები გამოიყენება უფრო დაბალ სიჩქარეებზე, ხმლისებრი კი გამოიყენება შედარებით მაღალი სიჩქარეებისათვის.



ნახ.1.6 ხრახნის ფორმები ზედ ხედში: სწორი მუდმივი ქორდით; სწორი ცვალებადი ქორდით და ხმლისებრი

ფრენის სიჩქარეების მიხედვით საჰაერო ხრახნები შეიძლება დავყოთ: დაბალ, საშუალო და მაღალ ბგერამდელ სიჩქარეებზე მფრენი აპარატებისთვის განკუთვნილ ხრახნებად. ნახ.1.8-ის მიხედვით შეიძლება განვსაზღვროთ, იგივე თანმიმდევრობა შეესაბამება, დაბალ, საშუალო და მაღალ სიჩქარეებზე მფრენი აპარატების საჰაერო ხრახნებს.

1.2.3. საჰაერო ხრახნები ფრთოვანების დაყენების კუთხის მიხედვით

არსებობს საჰაერო ხრახნები, ფრთოვანების/ნიჩბების დაყენების კუთხის უცვლელი, ხელით ცვალებადი და ავტომატურად ცვალებადი კონსტრუქციებით. შესაბამისად, საჰაერო ხრახნებს უცვლელი ნიჩბის დაყენების კუთხით, გააჩნიათ ფიქსირებული ხრახნი, რომელსაც ფრენის სხვადასხვა რეჟიმებზე გააჩნია ერთი და იგივე კონფიგურაცია; საჰაერო ხრახნებში ხელით ცვალებადი ნიჩბის დაყენების კუთხით, შესაძლებელია ამ კუთხის შეცვლა მხოლოდ მომსახურე პერსონალის მიერ აპარატის მიწაზე ყოფნისას ანუ ამ შემთხვევაში უნდა მოხდეს შესაძლო ფრენის რეჟიმების წინასწარი განსაზღვრა; ნიჩბის დაყენების კუთხის ავტომატურად ცვალებადი მექანიზმით აღჭურვილი საჰაერო ხრახნები კი ამ კუთხის ცვლილებას ახდენენ ფრენის ნებისმიერ რეჟიმზე, როგორც ჰაერში ასევე მიწაზე. უნდა აღინიშნოს, რომ ავტომატური დაყენების კუთხის კონტროლის სისტემა შეიძლება

კიდევ დაიყოს მთლიანად ავტომატიზებულ და ნახევრად ავტომატიზებულ სისტემებად. მთლიანად ავტომატიზებულ ნიჩბის დაყენების კუთხის ცვლილების სისტემაში ამ კუთხის ცვლილება ხდება პილოტის ჩარევის გარეშე კომპიუტერის მიერ ფრენის რეჟიმების შესაბამისად; ნახევრად ავტომატიზებულ სისტემაში კი ფრენის დროს თავად პილოტის მიერ ხდება სასურველ კუთხეზე ნიჩბის დაყენება.



ნახ.1.7 საჰაერო ხრახნების ფრთოვანების/ნიჩბების დაყენების კუთხის მუდმივი, ხელით ცვალებადი და ავტომატურად ცვალებადი კონსტრუქციები.

აუცილებელია საჰაერო ხრახნმა უზრუნველყოს ფრთოვანების დაყენების კუთხეების ცვლილება ფართო დიაპაზონში ძალური დანადგარის მოცემული მუშაობის რეჟიმის შესაბამისად, მისი მდგომარეობის და თვითმფრინავის ფრენის პირობებიდან გამომდინარე; ასე მაგალითად ძრავას ამუშავების შესამსუბუქებლად ფრთოვანების დაყენების კუთხეები უნდა იყოს ნულის ტოლი. ფრენის დროს ფრთოვანების დაყენების კუთხეების მუშა დიაპაზონი იცვლება მიახლოებით 200-დან 600-მდე. გარდა ამისა ხრახნის კონსტრუქციამ უნდა აღკვეთოს ფრთოვანების დაყენების კუთხეების თვითნებური ცვლილება ძრავას მტყუნებების წარმოქმნის დროს მომუშავე ძრავაზე და არ დაუშვას ფრთოვანების გადაყვანა მინიმალურად დასაშვები კუთხეების ზღვარს ქვემოთ. ძრავას ავარიის შემთხვევაში ან მისი გამორთვის აუცილებლობის დროს ფრენის პირობებში საჭიროა ხრახნის შუბლა წინალობის შემცირება მინიმუმამდე, რაც მოითხოვს ხრახნის ფრთოვანების დაყენებას ფლუგერულ მდგომარეობაში. ყველა ამ მოთხოვნებს პასუხობენ საჰაერო ხრახნები რომლებიც აღჭურვილი არიან ფრთოვანების დაყენების კუთხეების ცვლადი ბიჯის მექანიზმით. ასეთი კონსტრუქცია ახდენს ასაფრენ-დასაფრენი ზოლის (მოედნის) სიგრძის შემცირებას, აფრენის მახასიათებლების

გაუმჯობესებას, მიწაზე და ჰაერში მანევრირების გაუმჯობესებას. ცვალებადი ნიჩბის დაყენების კუთხეების კონსტრუქციით აღჭურვილი თვითმფრინავების ერთ-ერთ დიდ პლიუსს წარმოადგენს წევის რევერსირების უნარი (ხრახნი რომელიც წარმოქმნის უარყოფით წევას). ეს მიიღწევა ნიჩბის დაყენების კუთხის ისეთ მნიშვნელობებზე გადაყვანით, რომლის დროსაც შეტევის კუთხე უარყოფითია და ხრახნი წარმოქმნის უარყოფით წევას, თვითმფრინავი კი შესაბამისად გადაადგილდება უკანა მიმართულებით. წევის რევერსირების შესაძლებლობა დადებითად მოქმედებს როგორც დასაფრენი მანძილის შემცირებაზე, ასევე მიწაზე თვითმფრინავის თავისუფლად მანევრირების შესაძლებლობაზე.

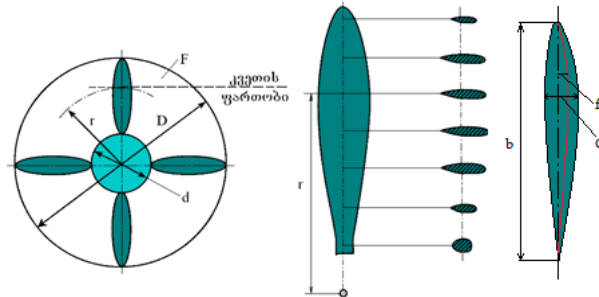
1.2.4. საჰაერო ხრახნის გეომეტრიული პარამეტრები

ნებისმიერ საჰაერო ხრახნს გააჩნია მთელი რიგი საერთო გეომეტრიული პარამეტრებისა, რომლებიც განსაზღვრავენ ხრახნის ფორმას და ზომებს, მათ მიეკუთვნებათ:

1. ხრახნის დიამეტრი, რომლის ქვეშაც იგულისხმება წრეხაზის დიამეტრი, რომელიც აღიწერება ფრთების ბოლოებით (ნახ.1.8). თვითმფრინავებს ხრახნებს აქვთ დიამეტრი $D=2\dots5m$; შვეულმფრენების ხრახნების დიამეტრმა შეიძლება მიაღწიოს 40მ-ს და მეტს. დიამეტრის მაგივრად ხრახნის ზომები შეიძლება დახასიათდეს ასევე რადიუსით $r=D/2$. ფრთოვანაზე ნებისმიერი კვეთის მდგომარეობა განისაზღვრება რადიუსით r , რომელიც ტოლია მანძილის ხრახნის ღერძიდან განხილულ კვეთამდე. $r \rightarrow r/R$ ფარდობას ეწოდება კვეთის ფარდობითი რადიუსი.

2. ფრთების რიცხვი i მერყეობს თვითმფრინავებისა და შვეულმფრენების ბგერამდელი ხრახნებისათვის 2-დან 6-მდე. ნახ.1.8-ზე ნაჩვენებია საჰაერო ხრახნის ძირითადი პარამეტრები. ფრთების რიცხვის გაზრდა იწვევს მათი ურთიერთქმედების გაზრდას და ბგერამდელი ხრახნის აეროდინამიკური მახასიათებლების გაუარესებას. ზებგერითი ხრახნებისათვის დამახასიათებელია ფრთების დიდი რიცხვი $i=6\dots8$.

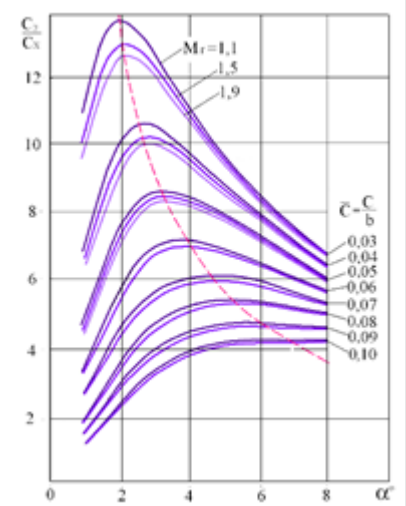
3. ფრთების პროფილი. ფრთის კვეთის პროფილი ხასიათდება ისევე როგორც თვითმფრინავის ფრთის პროფილი, $C \rightarrow C/b$ ფარდობითი სისქით, $f \rightarrow f/b$ სიმრუდით და სხვა პარამეტრებით, რომლებიც დამახასიათებელია პროფილებისათვის.



ნახ.1.8 საჰაერო ხრახნის ძირითადი პარამეტრები: i-ფრთების რიცხვი; D-ხრახნის დიამეტრი; d-გარსშემომდენის დიამეტრი; r-რადიუსი; b-პროფილის ქორდა; C-პროფილის სისქე; f-პროფილის სიმრუდე

ბგერამდელი ხრახნებისათვის გამოიყენება ჩვეულებრივი სახის პროფილები მდორედ გარსდენისთვის მომრგვალებული ცხვირით და ოდნავ დაბლაგვებული უკანა წიბოთი, ასეთი პროფილების მაქსიმალური სისქე მდებარეობს მანძილზე, რომელიც მიახლოებით ტოლია 1/3 პროფილის ქორდისა [1]. ზებგერთი ხრახნებისათვის გამოიყენებენ სპეციალურ ზებგერთ პროფილებს მახვილი წინა წიბოთი და მაქსიმალური სისქით ქორდის შუაში. ხრახნის პროფილების ძირითად მოთხოვნებს მიეკუთვნება მაღალი აეროდინამიკური ხარისხი. ჩვეულებრივ ხრახნის პროფილები ხასიათდება ეგრეთწოდებული შებრუნებული აეროდინამიკური ხარისხით $\mu=C_x/C_y$. ამავე დროს ხრახნის აეროდინამიკური მახასიათებლების ანალიზის დროს სარგებლობენ ჩვეულებრივი პროფილის ხარისხით $K= C_y/C_x$. აეროდინამიკური ხარისხი დამოკიდებულია პროფილის ფორმაზე, სისქეზე და სიმრუდეზე, M რიცხვზე და შეტევის კუთხეზე. (გრაფიკი.3.)-ზე მოყვანილია მრუდების სერია, რომლებიც განსაზღვრავს ხრახნის პროფილის ხარისხს ფარდობით სისქეზე და შეტევის კუთხეზე α დამოკიდებულებით, ფრენის რიცხვების $M=1,1; 1,5$ და $1,9$ -ის დროს. აღვნიშნოთ, რომ ზებგერთი სიჩქარეებზე პროფილის ხარისხი შედარებით მცირედ იცვლება ფრენის რიცხვის M-ის ცვლილების დროს, მაგრამ საგრძნობლად არის დამოკიდებული ფარდობით

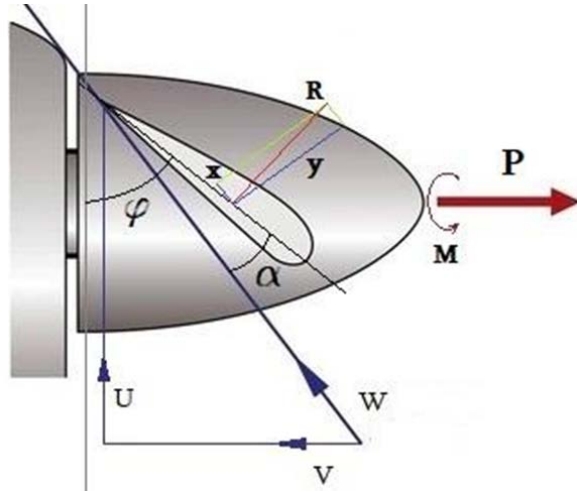
სისქეზე და შეტევის კუთხეზე α . თითოეული $C \rightarrow$ ფარდობით სისქისათვის არსებობს თავისი (ყველაზე ხელსაყრელი) შეტევის კუთხე α , რომლის დროსაც პროფილის ხარისხი აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას K_{max} . (ნახ.1.9.)-ზე ეს მნიშვნელობები აღნიშნულია წყვეტილი მრუდით. ჩვეულებრივ, როგორც ბგერამდელი ასევე ზებგერითი ხრახნებისათვის გამოიყენება პროფილები მცირე ფარდობითი სისქით $C \rightarrow = 0,03 \dots 0,10$ [1].



ნახ.1.9 გრაფიკი. საჰაერო ხრახნის პროფილის ხარისხის დამოკიდებულება ფარდობით სისქეზე და შეტევის კუთხეზე

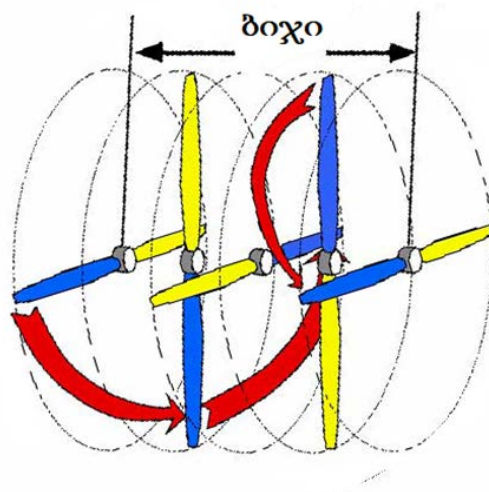
4. ფრთოვანას ელემენტის დაყენების კუთხე. φ კუთხის ქვეშ იგულისხმება კუთხე ხრახნის ბრუნვის სიბრტყისა და ფრთოვანას კვეთის პროფილის ქორდას შორის (ნახ.1.10). ფრთის სხვადასხვა კვეთებისათვის ის არ არის ერთნაირი: ხრახნის ღერძთან ახლოს φ კუთხე მეტია, ხოლო ფრთის ბოლოს ნაკლებია. კვეთის დაყენების კუთხე, რომელიც მდებარეობს ფარდობით რადიუსზე $r \rightarrow = 0,75$, პირობითად მიღებულია ეწოდოს ფრთის დაყენების კუთხე $\varphi = \varphi_{0,75}$. სხვაობა მიმდინარე კუთხესა φ და კუთხეს $\varphi_{0,75}$ შორის განსაზღვრავს ფრთის გრეხილს φ გრეხ $= \varphi - \varphi_{0,75}$. U-ხრახნის ბრუნვის წრიული სიჩქარეა, V-ფრენის სიჩქარეა, ხოლო W-ნაკადის ფარდობითი სიჩქარეა ფრთოვანას მიმართ.

შეტევის კუთხე α -ეწოდება კუთხეს, რომელიც მდებარეობს ფრთის კვეთის ქორდასა და მიმწყდომი ნაკადის სიჩქარის W-(ფარდობითი სიჩქარის) მიმართულებას შორის.



ნახ.1.10 საჰაერო ხრახნის პარამეტრები პროფილში: W-ნაკადის ფარდობითი სიჩქარეა ფრთოვანას მიმართ; V-ფრენის სიჩქარე; U-ხრახნის ბრუნვის წრიული სიჩქარე; φ -ფრთოვანას დაყენების კუთხე; α -შეტევის კუთხე; R-სრული აეროდინამიკული ძალა; y-ამწვევი ძალა; x-წინაღობის ძალა; M-მაბრუნე მომენტი; P-ხრახნის წევის ძალა

საჰაერო ხრახნის კიდევ ერთ პარამეტრს წარმოადგენს ხრახნის ბიჯი: ეს არის ხრახნის გადაადგილების მანძილი, რასაც იგი იდეალურ გარემოში ერთი სრული 360 გრადუსიანი ბრუნის შემოწერის შედეგად გაივლის, აღნიშნული პარამეტრი დიდადაა დამოკიდებული ფრთოვანას დაყენების კუთხეზე. ამ ორ პარამეტრს თითქმის ერთი და იგივე დანიშნულება აქვთ.

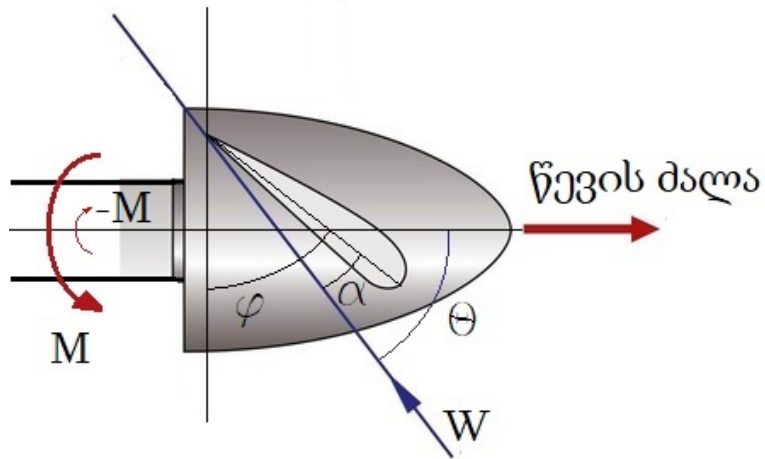


ნახ.1.11 საჰაერო ხრახნის ბიჯის ვიზუალური წარმოდგენა

საჰაერო ხრახნის ეფექტურობა დიდად დამოკიდებულია შეტევის კუთხეზე α , რომელიც განისაზღვრება ტოლობით $\alpha = \varphi - \theta$ სადაც φ წარმოადგენს ნიჩბის დაყენების კუთხეს, θ კი ხრახნის ბრუნვის ღერძსა და მიმწყდომი ჰაერის ნაკადის სიჩქარის ვექტორს შორის კუთხეს, აღნიშნულს სპირალურ კუთხესაც უწოდებენ. დაბალი ნიჩბის დაყენების და სპირალური კუთხეების მნიშვნელობით (ანუ შეტევის კუთხის დაბალი მნიშვნელობა) გვამღევს მაღალ ეფექტურობას წარმოქმნილ ამწევ (დადებით) და წინაღობის (უარყოფით) ძალებს შორის, მაგრამ ამ დროს წარმოიქმნება დაბალი მნიშვნელობის წევის ძალა. ამ კუთხეთა დიდი მნიშვნელობების დროს კი გვაქვს შებრუნებული ეფექტი ანუ წარმოიქმნება დიდი მნიშვნელობის გამწევი ძალა, მაგრამ ასევე იზრდება წინაღობის ძალაც. საუკეთესო სპირალურ კუთხედ ითვლება ის კუთხე, რომლის დროსაც ფრთოვანა იქცევა როგორც ფრთა ანუ წარმოქმნის მაქსიმალურად მაღალ ამწევ ძალას მინიმალური წინაღობის მნიშვნელობის დროს. ამწევი და წინაღობის ძალა არის ერთადერთი გზა, რომლითაც შეგვიძლია გამოვხატოთ აეროდინამიკური ძალის მოქმედება ფრთოვანაზე. იმისთვის რომ ავხსნათ საჰაერო ხომალდისა და ძრავას ფუნქციონირება იგივე ძალები აღიწერება ცოტათი განსხვავებულად, წევისა და მბრუნავი მომენტის მიხედვით, ამათგან გამომავალ ძალას წარმოადგენს წევის ძალა. სწორედ ძირითადად წევის ძალით და მბრუნავი მომენტით განისაზღვრება საჰაერო ხრახნის ეფექტურობა. საჰაერო ხრახნის შეტევის კუთხეების მნიშვნელობის დიაპაზონი იგივეა რაც ფრთისა.

საჰაერო ხრახნის ეფექტურობა შეიძლება განვსაზღვროთ როგორც:

$$\eta = \frac{\text{პროპულსური გამომავალი ძალა}}{\text{მაბრუნე შემაჯალი ძალა}} = \frac{\text{წევის ძალა} * \text{ღერძულ სიჩქარე}}{\text{წინაღობის მაბრუნე მომენტი} * \text{ბრუნვის სიჩქარე}}$$

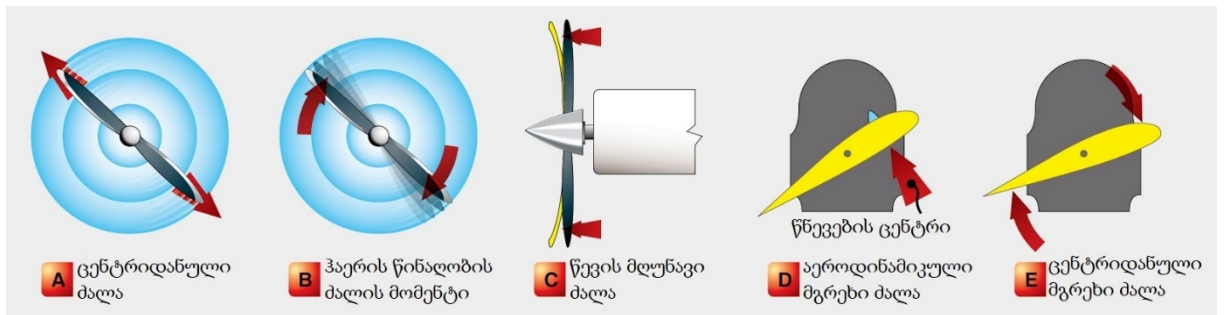


ნახ.1.12 W-მიმწყდომი ნაკადის სიჩქარე; θ -სპირალური კუთხე ჰაერის მიმწყდომ ნაკადსა და ბრუნვის ღერძს შორის; φ -ნიჩბის დაყენების კუთხე; α -შეტევის კუთხე; M-ძრავადან გამომავალი ლილვის მაბრუნე მომენტი; -M-წინააღობის ძალით გამოწვეული მაბრუნე მომენტი

1.2.5. საჰაერო ხრახნის მიერ წარმოქმნილი ძალები და მომენტები

დღესდღეობით, საჰაერო ხრახნები დიდი ტვირთამწეობის თვითმფრინავებისთვის გიგანტურ ზომებს აღწევენ (მაგალითად B-36-ის საჰაერო ხრახნის დიამეტრი დაახლოებით 5.8 მეტრს აღწევდა) შესაბამისად დიდია ასეთი ხრახნების მასაც, რაც მრავალ სტრესულ ეფექტს იწვევს. ამ ეფექტთაგან ზოგიერთი მათგანი ერთანეთის მაკომპენსირებელია, ზოგი კი მასტიმულირებელი. ძირითად დატვირთვას საჰაერო ხრახნზე ახდენს ბრუნვის გამო წარმოქმნილი ცენტრიდანული ძალა, რომელიც ორი სახით ვლინდება. ერთ-ერთი მათგანია ცენტრიდანული გამჭიმე ძალა, რომელიც ხრახნის ნიჩბებს/ფრთოვანებს ექაჩება ბრუნვის ცენტრიდან გარეთა მიმართულებით; ხოლო მეორეა ცენტრიდანული მგრეხე ძალა გამოწვეულია ასიმეტრიული მბრუნავი სხეულით, იგი ფრთოვანას აიძულებს გასწორდეს ბრუნვის სიბრტყის პარალელურად. ასევე ორი სახით ვლინდება აეროდინამიკური ძალის ზემოქმედება საჰაერო ხრახნზე. ერთი მათგანია საერთო წვევის ძალით გამოწვეული მღუნავი ძალა, რომელიც აიძულებს ნიჩბებს გადაიხარონ წვევის ძალის მიმართულებით; ხოლო მეორეა აეროდინამიკური მგრეხე ძალა, იმის გამო რომ აეროდინამიკური წნევების ცენტრი მდებარეობს ფრთოვანას

მექანიკური ცენტრის მიმართ ცოტათი წინ. ეს წარმოქმნის მგრეხ მომენტს, რომელიც ცდილობს ნიჩბის მობრუნებას ფრენის მიმართულების გასწვრივ. ხრახნზე მოსული დატვირთვის კიდევ ერთ სახეს წარმოადგენს ჰაერის წინააღმდეგობის ძალით შექმნილი მახრუნი მომენტი, რომელიც ცდილობს წინააღმდეგობა გაუწიოს ძრავას ლილვის მახრუნ მომენტს, ნიჩაბი კი როგორც შუალედური რგოლი იღებს ამ ზეწოლას და წარმოიქმნება ერთგვარი ნიჩბის მოღუნვის ტენდენცია ბრუნვის სიბრტყეში. ასევე ინდა აღინიშნოს ის ვიბრაციული ნიშანცვლადი ძალები რომლებიც მოქმედებენ ხრახნებზე, მათი გამომწვევი მიზეზი შეიძლება იყოს მრავალი: გარემოს ზემოქმედება; ძრავადან მიღებული ვიბრაცია და სხვა.



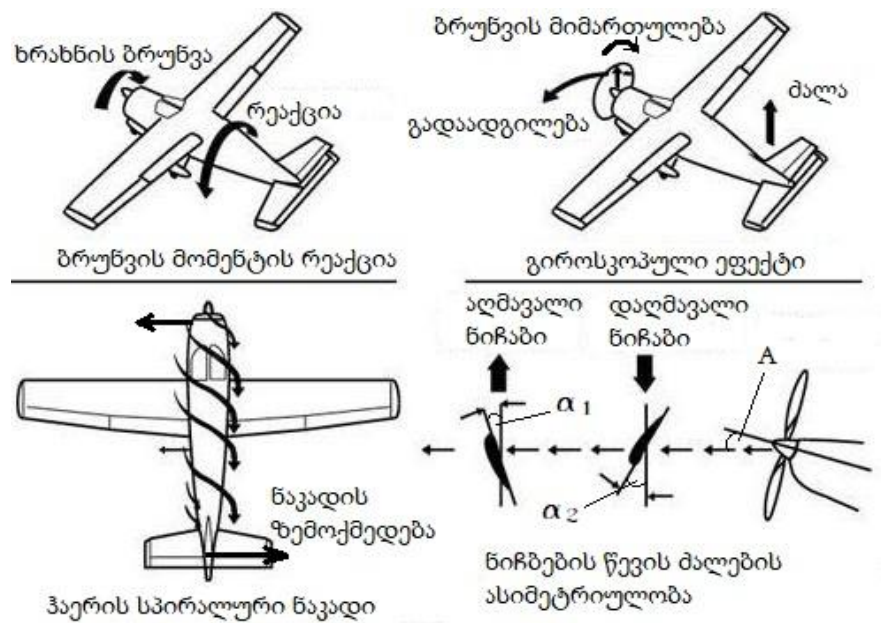
ნახ.1.13 საჰაერო ხრახნზე მოსული დატვირთვების ვიზუალური წარმოდგენა

ზემოთხსენებული დატვირთვის ტიპებიდან ერთმანეთის მაკომპენსირებლებს წარმოადგენენ: ცენტრიდანული ძალა და წვევის მღუნავი ძალა. ცენტრიდანული ძალა აკომპენსირებს წვევის მღუნავ ძალას, ვინაიდან იგი, იმის გარდა რომ მიმართულია ცენტრიდან გარეთ და ცდილობს ნიჩბების განდევნას ამ მიმართულებით, ასევე აიძულებს ნიჩბებს გასწორდნენ ბრუნვის სიბრტყეში, შედეგად, ნიჩბები რჩებიან და ბრუნავენ ერთ სიბრტყეში; ასევე ერთმანეთის მაკომპენსირებელია აეროდინამიკური და ცენტრიდანული მგრეხი ძალები, რომლების საპირისპირო მიმართულებით მოქმედებენ ნიჩაბზე; წინააღმდეგობის ძალის მომენტის მაკომპენსირებლად შეიძლება ჩაითვალოს ცენტრიდანული ძალა, რომელიც ცდილობს მოახდინოს ნიჩბის გაჭიმვა მისი ღერძის გასწვრივ.

საჰაერო ხრახნი ზემოქმედებს საფრენ აპარატზე, განსაკუთრებით ერთი ხრახნით აღჭურვილ თვითმფრინავებში. ასეთ ზემოქმედებას ადგილი აქვს და მეტად

შესამჩნევია აფრენის დროს, როდესაც საფრენ აპარატს აქვს ტენდენცია გაცურდეს ერთ-ერთ მხარეს, გარდა გვერდითი ქარისა ამის გამომწვევი მიზეზი შეიძლება იყოს ოთხი, რომელთაგან ოთხივე მოქმედებს უკანა დამხმარე საყრდენიდან საფრენ აპარატებზე, ხოლო მეტნაკლებად მხოლოდ ორი ზემოქმედებს საფრენ აპარატებზე ცხვირა დამხმარე საყრდენის განლაგებით. ერთ-ერთი მათგანია ხრახნის ბრუნვის მომენტის რეაქციული მომენტი, რომელიც ცდილობს გადააბრუნოს აპარატი ხრახნის ბრუნვის საპირისპირო მიმართულებით, შედეგად ერთ-ერთი ძირითად საყრდენზე ხდება დაწოლის მატება მეორეზე კი სუსტდება, ეს კი იწვევს ხომალდის დაცურება დატვირთული საყრდენის მიმართულებით, ჰაერში ყოფნისას კი ეს ეფექტი ცდილობს თვითმფრინავის დაგვერდებას; საფრენ აპარატზე ხრახნის ზემოქმედების კიდევ ერთი ტიპია ხრახნის მიერ წარმოქმნილი ჰაერის მოძრაობის სპირალური მიმართულება. ხრახნის მიერ გამოტყორცნილი სპირალურად მოძრავი ჰაერი ხელს უშლის ხრახნს უკან მდებარე ფრთასხმულობის გამართულ ფუნქციონირებას, კერძოდ ჰორიზონტალური ფრთასხმულობის შემთხვევაში მის მარჯვენა და მარცხენა ნახევარს ასიმეტრიულად განსხვავებული კუთხით მიეწოდება ჰაერი ეს კი იწვევს არათანაბარი ძალების წარმოქმნას მათზე. ვერტიკალური ფრთასხმულობის შემთხვევაში კი აღნიშნული ჰაერის სპირალური მოძრაობით გამოწვეული კილზე მიმწყდომი ნაკადი ქმნის საფრენი აპარატის სრიალის კუთხით მოძრაობის ტენდენციას. აღნიშნული ორი ხრახნის მიერ ზემოქმედი ფაქტორი საერთო აქვთ როგორც წინა ასევე უკანა დამხმარე საყრდენიდან საფრენ აპარატებს, ხოლო მომდევნო ორი განიხილება მხოლოდ უკანა დამხმარე საყრდენიან აპარატებში. შასის დამხმარე საყრდენის უკანა განლაგების კონფიგურაციისას, ნორმალური ხრახნით აღჭურვილ საფრენ აპარატებში, აფრენის დროს ვაწყდებით, ბრუნვისას ზემოთ და ქვემოთ მიმავალ ფრთოვანებს შორის სხვადასხვა წევის ძალის წარმოქმნის პრობლემას, იმის გამო რომ აფრენის დაწყებისას თვითმფრინავი იმყოფება დახრილ მდგომარეობაში კერძოდ ცხვირით ზემოთ და შესაბამისად ჰაერი ხრახნის ბრუნვის სიბრტყეს მიეწოდება გარკვეული კუთხით. შესაბამისად, ქვემოთ მიმავალ ნიჩაბზე გვაქვს მეტი მნიშვნელობის შეტევის კუთხე ვიდრე ზემოთ მიმავალ ნიჩაბზე. აღნიშნული იწვევს მართვადობის

გაუარესებას აფრენისას სანამ თვითმფრინავის უკანა დამხმარე საყრდენი მიწას არ მოსცილდება და აპარატი მოძრაობის მიმართულების პარალელურად, ხრახნის ბრუნვის სიბრტყე კი ჰაერის ნაკადის სიჩქარის ვექტორის მართობულად არ გასწორდება; მეოთხე ხრახნის ზემოქმედების სახეს წარმოადგენს გიროსკოპული ეფექტი, აღნიშნული მდგომარეობს შემდეგში, ნებისმიერ სწრაფ მბრუნავ სხეულს გააჩნია გიროსკოპული ეფექტი რომელიც მდგომარეობს სივრცეში საკუთარი მდგომარეობის შენარჩუნებისადმი სწრაფვაში ანუ თუ მასზე ვიმოქმედებთ და ვეცდებით რომელიმე მხარეს გადავადგილოთ იგი არამართო შეგვეწინააღმდეგება, არამედ გადაადგილება სხვა მიმართულებით, სწორედ იგივე შემთხვევაა დახრილი თვითმფრინავის გასწორება აფრენის დროს, ვინაიდან საჰაერო ხრახნს გააჩნია საკმაოდ დიდი ბრუნთა რიცხვი ამ ხრახნის ბრუნვის სიბრტყის დახრის კუთხის ცვლილება იწვევს გიროსკოპულ ეფექტს და კუთხის ცვლილების პარალელურად ბრუნვის ღერძი გადაადგილდება მარჯვნივ ან მარცხნივ, ეს კი შეიძლება იყოს გამომწვევი საფრენი აპარატის მარჯვნივ ან მარცხნივ გასრიალებისა აფრენისას ან კურსის ცვლილებისა ფრენისას ტანგაჟის კუთხის შეცვლისას.

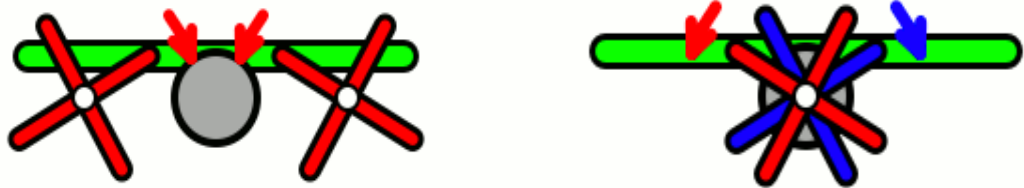


ნახ.1.14 ხრახნის ზემოქმედება თვითმფრინავზე: A-კუთხე ხრახნის ბრუნვის ღერძსა და გადაადგილების მიმართულებას შორის; $\alpha_1 < \alpha_2$ ხრახნის ნიჩბების შეტევის კუთხეებს შორის სხვაობა

აღნიშნული უარყოფითი ზემოქმედებების პრევენციისთვის შესაძლებელია გამოყენებული იყოს გარკვეული კონსტრუქციულ-ფუნქციონალური გადაწყვეტილებები. მაგალითად ორ ან მეტი ლუწი რაოდენობით აღჭურვილ ძრავებში გამოიყენება, თითოეულ ძრავაზე, საპირისპიროდ მბრუნავი საჰაერო ხრახნი, მათი ასეთი კონსტრუქცია იწვევს ხრახნთა მიერ წარმოქმნილი ზემოქმედების ძალების კომპენსირებას, საპირისპიროდ მოძრავი ხრახნების მიერ კომპენსირდება ყველა ზემოთ აღნიშნული ფაქტორი: მბრუნე მომენტის რეაქციული ძალები, ვინაიდან თითოეული ხრახნი წარმოქმნის საპირისპირო მნიშვნელობის მომენტს; ნიჩბების წვევის ძალის ასიმეტრიულობით გამოწვეული ეფექტი, ვინაიდან გვაქვს სიმეტრიული წვევა თვითმფრინავის სიმეტრიის სიბრტყის მიმართ; ხრახნის უკან ჰაერის სპირალური მოძრაობით გამოწვეული ეფექტი, ვინაიდან გვაქვს საპირისპიროდ სპირალის ტრაექტორიაზე მოძრავი ჰაერის მასები; და გიროსკოპული ეფექტი, ვინაიდან თითოეული ხრახნის მიერ შექმნილი გიროსკოპული ეფექტი აწონასწორებს მეორეს ერთნაირი ბრუნთა რიცხვის შემთხვევაში.

კონტრ-როტაციული თანადერძულ ხრახნიანი თვითმფრინავების შემთხვევაშიც ეს პრობლემები თითქმის მოგვარებულია, ვინაიდან, როგორც საპირისპიროდ მბრუნავ ხრახნებიან თვითმფრინავებში ამ შემთხვევაშიც გვაქვს, ერთი ბრუნვის ღერძით, ორი ხრახნი, რომლებიც მაკომპენსირებელ ერთმანეთის ზემოქმედებას თვითმფრინავზე: ბრუნვის რეაქციის ძალები, ისევე როგორც საპირისპიროდ მოძრავ ხრახნებში, აქაც იგივენაირად კომპენსირდება; იგივენაირად კომპენსირდება ხრახნების გიროსკოპული მომენტიც, ერთნაირი ბრუნვის სიჩქარეების შემთხვევაში, ვინაიდან თითოეულ ხრახნს გააჩნია თავისი საპირისპირო გიროსკოპული ეფექტი. რაც შეეხება ხრახნის ასიმეტრიულ წვევას და ხრახნის უკან სპირალური ნაკადით გამოწვეულ ზემოქმედებას, ამ შემთხვევაში თუ საუბარია რამდენიმე კონტრ-მბრუნავი ხრახნით აღჭურვილ თვითმფრინავზე, აღნიშნული ეფექტებიც კომპენსირებული იქნება, მაგრამ თუ საუბარია ერთი კონტრ-მბრუნავი ხრახნით აღჭურვილ აპარატზე, მაშინ სურათი ცოტათი შეიცვლება, ვინაიდან საჰაერო ხრახნის ასიმეტრიული წვევის დროს წინა ხრახნის

ზემოთ და ქვემოთ მიმავალი ნიჩბები ჰაერს განსხვავებული შეტევის კუთხეებით მიიღებენ, ხოლო უკანა ხრახნის ნიჩბები ჰაერს მიიღებენ მეტნაკლებად ერთნაირი შეტევის კუთხეებით, ვინაიდან წინა ხრახნი გარკვეულწილად გაასწორებს ჰაერს უკანა ხრახნისთვის. ასე რომ მთლიანად მაკომპენსირებელი წევა არ გვაქვს, ამ შემთხვევაში ეფექტი ნორმალურ ხრახნთან შედარებით, შესაძლოა, უფრო ნაკლებად იყოს, მაგრამ მისი არსებობა მაინც ყურადსაღებია; ხრახნის უკან სპირალური ჰაერის ნაკადის წარმოქმნა კი მაინც მოხდება, უკანა ხრახნიდან გამომავალ ჰაერს ვერაფერი გაასწორებს და მაკომპენსირებელიც არაფერი არ აქვს, შესაბამისად, ეს ეფექტიც რჩება უფრო ნაკლებად ნორმალურ ხრახნიან აპარატთან შედარებით, თუ ხრახნთა ბრუნვა ოპტიმიზებული იქნება.



ნახ.1.15 ორი ან მეტ ძრავიანი თვითმფრინავებისთვის საპირისპიროდ მბრუნავი ხრახნები და თანაღერძული კონტრ-მბრუნავი საჰაერო ხრახნები

უნდა აღინიშნოს, რომ კონსტრუქციულად თანაღერძული კონტრ-მბრუნავი ხრახნები საკმაოდ რთულ აგრეგატს წარმოადგენს, რთული რედუქტორის და ორლილვიანი კონსტრუქციის გამო. საპირისპიროდ მბრუნავი ხრახნები კი იმ შემთხვევაში, თუ ორივე ხრახნი ზუსტად ერთნაირ ძრავაზეა დამაგრებული (ანუ ორივე ძრავა ერთი მიმართულებით ბრუნავს) რთულდება კონსტრუქცია ვინაიდან ერთ-ერთ ხრახნი ამ შემთხვევაში ითხოვს რედუქტორის დაყენებას, რაც იწვევს დისბალანსს და წონის არათანაბარ გადანაწილებას, თვითმფრინავის სიმეტრიის სიბრტყის მიმართ.

თეორიიდან ცნობილია, რომ საჰაერო ხრახნის ბრუნვაზე მოხმარებული სიმძლავრე ტოლია.

$$N = \beta \cdot \rho \cdot n^2 s \cdot D^5$$

სადაც:

β – სიმძლავრის კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია ხრახნის ფორმაზე და მისი მუშაობის პირობებზე. ρ – ჰაერის სიმკვრივე; n_s – ხრახნის ბრუნვათა სიხშირე წამში; D – ხრახნის დიამეტრი.

თუ ძრავა ანვითარებს სიმძლავრეს, რომელიც ტოლია საჰაერო ხრახნის ბრუნვებზე დახარჯული სიმძლავრისა, მაშინ ამ დროს წარმოქმნილი ხრახნის წევა შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით:

$$R = \alpha \cdot \rho \cdot n_s^2 \cdot D^4$$

სადაც: α – ხრახნის წევის კოეფიციენტი, რომელიც მხედველობაში ღებულობს ხრახნის ფორმას და მისი მუშაობის პირობებს.

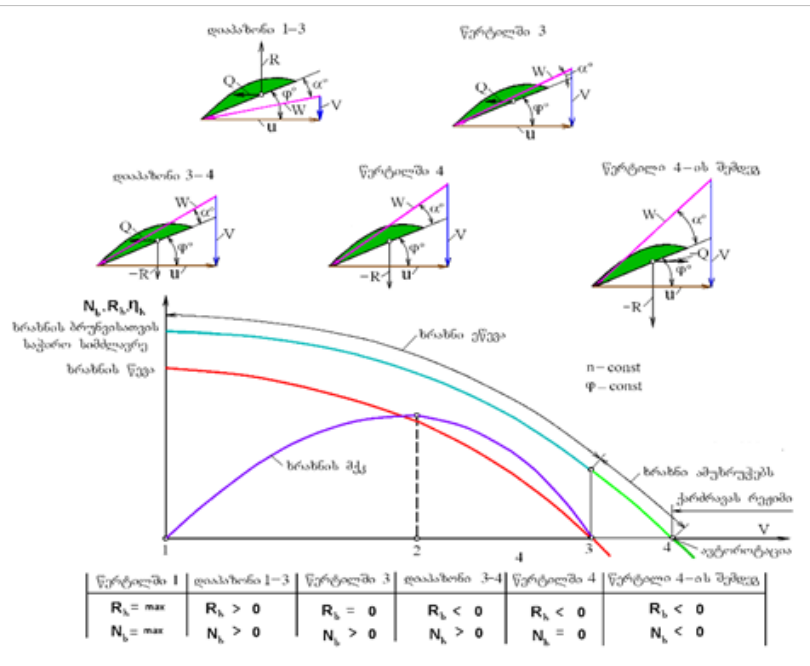
ხრახნის წევის სიმძლავრე ტოლია $N_{br} = \frac{RV}{75}$ სადაც V ფრენის სიჩქარეა.

წევის სიმძლავრის ფარდობას სიმძლავრესთან, რომელიც საჭიროა ხრახნის დასაბრუნებლად ეწოდება ხრახნის მქც [1].

$$\eta_{\text{მქც}} = \frac{N_{\text{მქც}}}{N}$$

მოთხოვნილ სიმძლავრეზე, წევაზე, წევის სიმძლავრეზე და ხრახნის მქც-ზე მოქმედებენ ხრახნის გეომეტრიული ზომები, ფრთების დაყენების კუთხეები, ძრავას სიმძლავრე, ხრახნის ბრუნვათა სიხშირე, თვითმფრინავის ფრენის სიმძლავრე და სიჩქარე, ჰაერის წნევა და ტემპერატურა და სხვა ფაქტორები.

საჰაერო ხრახნის მუშაობის რეჟიმებზე შეიძლება ითქვას შემდეგი: იმ შემთხვევაში, როდესაც ძრავას განკარგვით სიმძლავრე იცვლება ისევე, როგორც საჰაერო ხრახნის ბრუნვის მოთხოვნილი სიმძლავრე ეს უკანასკნელი შეიძლება მუშაობდეს შემდეგ დამახასიათებელ რეჟიმზე (ნახ.1.16).



ნახ.1.16 გრაფიკი. N , P და η -ის ცვლილების ხასიათი ფრენის სიჩქარის მიხედვით, თუ ფრთის დაყენების კუთხე φ და ხრახნის ბრუნვათა სიხშირე n არ იცვლება

1. ჰელიკოპტერული რეჟიმი, ანუ მაქსიმალური წევის რეჟიმი (წერტილი 1). საჰაერო ხრახნის წინსვლითი სიჩქარე ნულის ტოლია, წევა და მის შექმნაზე დახარჯულ სიმძლავრეს აქვთ მაქსიმალური მნიშვნელობა (α , β და n წმ – ყველაზე მაღალი), საჰაერო ხრახნის წევის სიმძლავრე და მკვ ნულის ტოლია რადგანაც სიჩქარე უდრის ნულს.

2. პროპელერული რეჟიმი (დიაპაზონი 1-3), ხასიათდება დადებითი წევით, რომელიც სიჩქარის ზრდასთან ერთად თანდათანობით მცირდება და წერტილში 3 ხდება ნოლის ტოლი (α მცირდება, ρ , n ს და D რჩებიან უცვლელეები).

საჰაერო ხრახნის მკვ თავიდან იზრდება, რადგანაც ხრახნის წევის სიმძლავრე იზრდება (ფრენის სიჩქარე იზრდება უფრო სწრაფად, ვიდრე მცირდება ხრახნის წევა), ხოლო ხრახნის ბრუნვაზე მოთხოვნილი სიმძლავრე მცირდება. შემდეგ ხრახნის მკვ მცირდება იმიტომ, რომ მცირდება ხრახნის წევის სიმძლავრე (წევა ვარდება უფრო სწრაფად, ვიდრე იზრდება ფრენის სიჩქარე) და ერთდროულად ამასთან მოთხოვნილი სიმძლავრე ხრახნის დასაბრუნებლად, მაგრამ წევის სიმძლავრე მცირდება უფრო სწრაფად ვიდრე მოთხოვნილი.

3. ნულოვანი წვევის რეჟიმი (წერტილი 3). ამ რეჟიმზე საჰაერო ხრახნის წვევა და მკვ ნულის ტოლია, მაგრამ ხრახნის დასაბრუნებლად საჭირო სიმძლავრე ჯერ კიდევ არ არის ნულის ტოლი, რადგანაც აუცილებელია ხრახნის დასაბრუნებლად წინააღმდეგობის ძალის Q გადალახვა. ეს ძალა სიდიდით და მიმართულებით ტოლია აეროდინამიკური ძალების ტოლქმედის R.

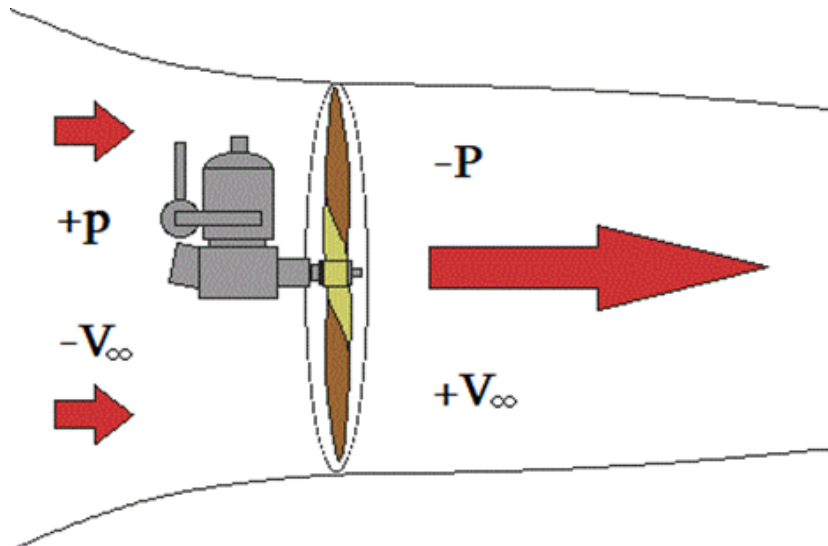
4. დამუხრუჭების რეჟიმი. დიაპაზონში 3-4 ხრახნი მუხრუჭდება. მის ბრუნვებზე იხარჯება ერთდროულად ძრავას სიმძლავრე და ჰაერის მიმწყდომი ნაკადის ენერგია. უკვე არა ხრახნი გადაისვრის უკან ჰაერს, არამედ ჰაერი აწვება ხრახნს[1].

ამ დროს წარმოიქმნება უარყოფითი წვევა, რომელიც იზრდება სიჩქარის ზრდასთან ერთად წერტილიდან 3 წერტილამდე 4.

5. ავტოროტაციის რეჟიმი. წერტილში 4 წარმოიქმნება ე. წ. ავტოროტაცია. ამ რეჟიმზე საჰაერო ხრახნი ბრუნავს მხოლოდ ჰაერის მიმწყდომი ნაკადის ენერგიის ხარჯზე. უარყოფითი წვევა სიდიდით და მიმართულებით ტოლია აეროდინამიკური ძალების ტოლქმედისა R. ძრავას სიმძლავრე საჰაერო ხრახნს არ გადაეცემა და იხარჯება მხოლოდ ძრავში არსებული შინაგანი დანაკარგების დასაძლევად (ტურბინა, კომპრესორს და ძრავას სხვადასხვა აგრეგატებს), არ გადაეცემა სიმძლავრე ასევე საჰაერო ხრახნიდან ძრავას.

6. ქარძრავას რეჟიმი. წერტილი 4-ის შემდეგ მყარდება ქარძრავას რეჟიმი. ამას პირობითად ეწოდება ავტოროტაციის რეჟიმი, მაგრამ ეს ერთი და იგივე არ არის. ავტოროტაციის რეჟიმისაგან განსხვავებით ქარძრავას რეჟიმი საჰაერო ხრახნის უარყოფითი სიმძლავრის ნაწილი გადაეცემა ძრავას – ჰაერის მიმწყდომი ნაკადი აბრუნებს ხრახნს და ძრავას როტორს. საჰაერო ხრახნი წარმოქმნის ამ რეჟიმზე მაქსიმალურ უარყოფით წვევას.

საჰაერო ხრახნი შეიწოვს ჰაერს და აჩქარებულად გამოსტყორცნის მას საპირისპირო მხარეს ამ დროს ხრახნის გარსშემოდენას აქვს შევიწროვებადი მილის, ერთგვარი ძაბრის ფორმა, ეს გამოწვეულია იმით რომ აჩქარებულ ნაწილში სიჩქარის გაზრდის გამო მცირდება წნევა ატმოსფერულ წნევასთან შედარებით და ამიტომ ატმოსფერული ჰაერი ავიწროებს მას.



ნახ.1.17 ხრახნის გარსშემოდენა შეწოვის არეში ჰაერს გააჩნია მაღალი წნევა $+P$ და დაბალი სიჩქარე $-V_{\infty}$; გამოტყორცნის არეში კი დაბალი წნევა $-P$ და მაღალი სიჩქარე $+V_{\infty}$

საჰაერო ხრახნის მუშაობაზე სხვადასხვა ფაქტორი ახდენს გავლენას მაგალითად საჰაერო ხრახნის მუშაობაზე მოქმედებს ძრავას სიმძლავრის, საჰაერო ხრახნის ბრუნვათა სიხშირის, ფრენის სიჩქარის და ჰაერის სიმკვრივის ცვლილება[1].

ძრავას სიმძლავრის ცვლილება იწვევს იმას, რომ საჰაერო ხრახნი ხდება მძიმე ან მსუბუქი. იმისათვის, რომ აღდგეს წონასწორობა სიმძლავრეს შორის, რომელიც საჭიროა ხრახნის დასაბრუნებლად, ძრავას განკარგვით, სიმძლავრეს შორის, საჭიროა ხრახნის ფრთოვანების დაყენების კუთხის შეცვლა: სიმძლავრის გაზრდის დროს მომატება, შემცირების დროს დაკლება. საჰაერო ხრახნის ბრუნვათა სიხშირის ცვლილება ფრთების დაყენების მუდმივი კუთხის დროს იწვევს მის დასაბრუნებლად მოთხოვნილი სიმძლავრის ცვლილებას ბრუნვათა სიხშირის კუბის პროპორციულად. მაგალითად, ორჯერ ბრუნვათა სიხშირის შემცირების დროს, მოთხოვნილი სიმძლავრე ხრახნის დასაბრუნებლად მცირდება რვაჯერ. ამ თავისებურებას მხედველობაში ღებულობენ ხრახნის სისტემების შექმნისას უარყოფითი წევის ზემოქმედებისაგან თავდასაცავად.

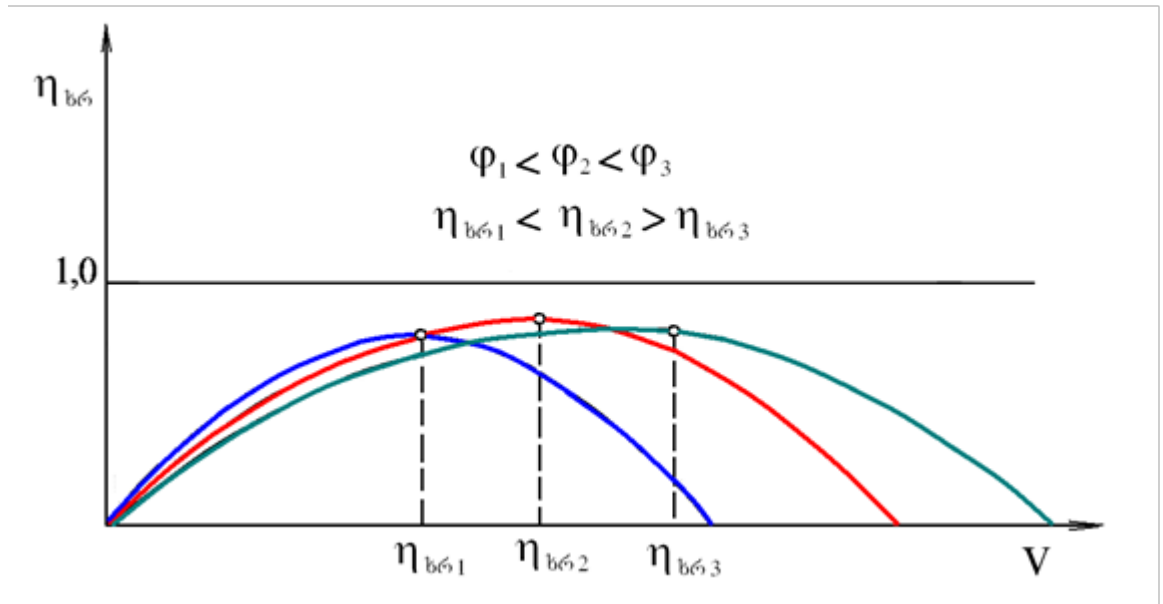
ფრენის სიჩქარის ცვლილება მოქმედებს ფიქსირებული ბიჯის საჰაერო ხრახნზე შემდეგნაირად: ფრენის სიჩქარის შემცირების დროს საჰაერო ხრახნი ხდება მძიმე და მის დასაბრუნებლად სიმძლავრე საკმარისი არ არის. ფრენის სიჩქარის

გაზრდის დროს ის ხდება მსუბუქი. ამის გამო, უცვლელი ბრუნვათა სიხშირის პირობებში ფრენის სიჩქარის შემცირების დროს საჭიროა ხრახნის დაყენების კუთხის შემცირება, სიჩქარის გაზრდის დროს მომატება.

ჰარის სიმკვრივის ცვლილება ძრავას მუდმივი სიმძლავრის დროს აისახება საჰაერო ხრახნის ფრთების დაყენების კუთხეზე. ჰაერის სიმკვრივის შემცირების დროს დაყენების კუთხე იზრდება.

როგორც აღნიშნული იყო, ტრმ-ს ბრუნვათა სიხშირე ფრენის დროს რჩება მუდმივი. მაშინ ძრავას სიმძლავრის, ფრენის სიჩქარის და ჰაერის სიმკვრივის ცვლილება იწვევს საჰაერო ხრახნის ფრთების დაყენების კუთხის ცვლილების აუცილებლობას. ამ დროს, თუ ფრთების დაყენების კუთხე უნდა იყოს გაზრდილი ძრავას სიმძლავრეზე და ჰაერის სიმკვრივეზე დამოკიდებულებებით, მაშინ დამუხრუჭების რეჟიმები (დიაპაზონი 3-4), ავტოროტაციის (წერტილი 4) და ქარძრავას (წერტილი 4 მარჯვნივ) გადაადგილდებიან უფრო მაღალ სიჩქარეებისაკენ (ნახ.1.18). გარდა ამისა ფრთების დაყენების კუთხის ცვლილება საშუალებას იძლევა შენარჩუნებული იქნეს ხრახნის მაქსიმალური მკვ (η_ს) ფრენის სიჩქარეების ფართო დიაპაზონში. (ნახ.1.18)-ზე ჩანს, რომ ფრთოვანების დაყენების მუდმივი კუთხის დროს საჰაერო ხრახნის მკვ აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას, მხოლოდ ფრენის ერთი სიჩქარის დროს წერტილში 2, რომელიც შეესაბამება ყველაზე ხელსაყრელ ფრთების შეტევის კუთხეს. სიჩქარის შემცირება ან გაზრდა იწვევს ხრახნის მკვ-ს შემცირებას.

ნახ.1.18-ზე ნაჩვენებია η_ს-ის ცვლილების მრუდები ფრენის სიჩქარეზე დამოკიდებულებით ფრთოვანების დაყენების კუთხეების სამი მნიშვნელობისათვის: φ₁, φ₂, φ₃.

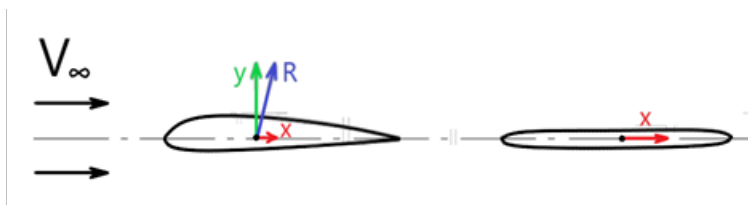


ნახ.1.18 გრაფიკი საჰაერო ხრახნის მქც-ის ηβ ცვლილება სიჩქარეზე დამოკიდებულებით ფრთოვანების დაყენების სხვადასხვა კუთხეების დროს (φ)

ფრთოვანების დაყენების კუთხის φ თითოეულ მნიშვნელობას შეესაბამება თავისი ხრახნის მაქსიმალური მქც η_{\max} და თავისი ფრენის სიჩქარე V_1 , V_2 და V_3 . ეს ნიშნავს, რომ თუ ხრახნი დამზადებული იქნება ფრენის დროს ფრთების დაყენების კუთხეების ცვლილებით φ ან, როგორც ამას უწოდებენ ფრენის დროს ცვალებადი ბიჯით, მაშინ შეიძლება შენარჩუნებული იქნეს მაქსიმალური მქც ფრენის სიჩქარეების ფართო დიაპაზონში. ხრახნის ფრთების დაყენების კუთხეების ცვლილება ფრენის დროს აუცილებელია აგრეთვე იმისათვის, რომ შენარჩუნებული იქნეს ხრახნის მაღალი მქც ჰაერის სიმკვრივის ცვლილების დროს.

1.3. თანამედროვე საჰაერო ხრახნების კლასიფიკაცია და ანალიზი

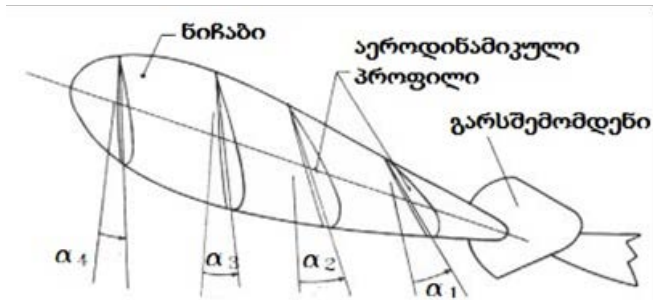
დღესდღეობით შეიძლება ითქვას, რომ საჰაერო ხრახნები სრულად არის შესწავლილი და მაქსიმალური ეფექტურობის ხრახნები უკვე მიღებულია. მათი ეფექტურობა 80% და მეტსაც აღწევს, მაგრამ არსებული ხრახნების ეფექტურობის ძირითადი დიაპაზონი საშუალოდ 50-80% ზღვრებშია, იმისდა მიუხედავად, რომ თანამედროვე ხრახნების მარგი ქმედების კოეფიციენტი ამხელა მნიშვნელობებს აღწევს, დღესდღეობით ისევ მიმდინარეობს მუშაობა მათ ამაღლებაზე და ხრახნთა უკეთესი კონსტრუქციების შექმნაზე. ძირითადი ცვლილებები რაც ხრახნის კონსტრუქციამ განიცადა ეფექტურობის ამაღლების კუთხით ეს არის ფრთოვანებისათვის აეროდინამიკური გარსდენის პროფილის მინიჭება, რამაც ნახტომისებურად შეცვალა ეფექტურობის მნიშვნელობა ასეთი კონსტრუქციის არმქონე ხრახნებთან მიმართებაში, ვინაიდან ამ შემთხვევაში გარდა რეაქციული წვევისა მივიღეთ აეროდინამიკური წვევაც, უპროფილო ხრახნებში კი მხოლოდ ჰაერის რეაქციული წვევა წარმოიქმნება, აეროდინამიკური ძალა კი მხოლოდ წინაღობის ძალით ვლინდება (ნახ.1.19).



ნახ.1.19 აეროდინამიკური პროფილზე სრული აეროდინამიკური ძალის გეგმილები: y-ამწევი ძალა; x-წინაღობის ძალა; R-სრული აეროდინამიკური ძალა; V_∞ -შეუშფოთებელი ჰაერის ნაკადის სიჩქარე

ასევე ხრახნების ეფექტურობაზე დადებითად იმოქმედა ფრთოვანას გრეხვამ მისი ღერძის გასწვრივ, ეს გულისხმობს ფრთოვანას მთელი ზედაპირის გასწვრივ შეტევის კუთხის ხელსაყრელი მნიშვნელობას, კერძოდ ბრუნვის ღერძთან ახლოს ფრთოვანას გააჩნია დაყენების დიდი კუთხე რადიუსის ზრდასთან ერთად კი ეს კუთხე მცირდება ვინაიდან ხრახნის კიდეები ცენტრთან ახლო სექციებთან შედარებით უფრო სწრაფად მოძრაობენ და მიმწყდომი ნაკადის სიჩქარე მეტია,

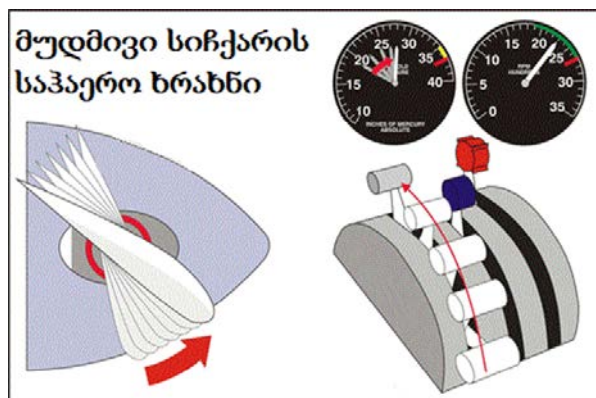
შესაბამისად შეტევის კუთხე ნაკლები, აღნიშნულმა დიდად აამალა ხრახნის ეფექტურობა (ნახ.1.20).



ნახ.1.20 ხრახნის ნიჩბის გრებილი ფორმა: α -შეტევის კუთხე $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 > \alpha_4$

1.3.1. მუდმივი სიჩქარის საჰაერო ხრახნი

საჰაერო ხრახნების ეფექტურობის ამაღლების მნიშვნელოვან ღონისძიებას წარმოადგენდა მათზე ავტომატურად ცვალებადი დაყენების კუთხის ნიჩბების დაყენება, აღნიშნულს მუდმივი სიჩქარის ხრახნებსაც უწოდებენ იმის გამო, რომ ძრავას ბრუნთა რიცხვების ცვლასთან ერთად ნიჩაბიც იცვლის დაყენების კუთხეს, ამ კუთხის მაქსიმალურად ეფექტურ მნიშვნელობამდე, ასე რომ აღნიშნული ხრახნი ფრენის ნებისმიერ ეტაპზე გვამღევს მაქსიმალურ ეფექტურობას და ასევე იძლევა წევის ძალის ცვლილების შესაძლებლობას ძრავაზე ზემოქმედების გარეშე.



ნახ.1.21 მუდმივი სიჩქარის საჰაერო ხრახნი: როდესაც სახელური გადაადგილდება წინ საჰაერო ხრახნი ავტომატურად ზრდის დაყენების კუთხეს იმისთვის, რომ შეინარჩუნოს ძრავას დანიშნული ბრუნთა რიცხვი

1.3.2. სქიმიტარული საჰაერო ხრახნი

საჰაერო ხრახნების აეროდინამიკის და ეფექტურობის გამაუმჯობესებელი შეიძლება იყოს მისი ფორმის დახვეწა ზედ ხედში, სწორედ ასეთ შემთხვევას წარმოადგენს ხმლის ფორმის საჰაერო ხრახნი, რომელსაც სქიმიტარულ ხრახნსაც უწოდებენ. სქიმიტარული საჰაერო ხრახნის ფორმა გეგმილში წააგავს სქიმიტარ ხმალს (სქიმიტარი არის მოღუნული ხმლის სახეობა, რომელიც გავრცელებული იყო შუა აღმოსავლეთში) ანუ ფრთოვანას წინა წიბოს გასწვრივ მატულობს მისი ისრისებურობის კუთხე და ამის გამო გააჩნია ბრუნვის საწინააღმდეგო მხარეს გადახრილი ფორმა. ასეთი ფორმის საჰაერო ხრახნების გამოჩენა დაკავშირებულია ბრუნვის სიჩქარეების იმ დონეებამდე გაზრდით, რომ ფრთოვანების ბოლოები აღწევდნენ ჰაერთან მიმართებაში ბგერის სიჩქარეებს, ეს კი იწვევდა ბგერითი დარტყმითი ტალღების წარმოქმნას და შესაბამისად ე.წ. ტალღური წინაღობის გაჩენას ბგერის სიჩქარის ზონაში, შედეგად კი მკვეთრად მცირდებოდა ხრახნის ეფექტურობა. ტალღური წინაღობის შემცირების გზას წარმოადგენს სქიმიტარული ხრახნების გამოყენება მათი დახრილი ფრთების გამო. ვინაიდან ასეთნაირი კონსტრუქციით შესაძლებელია ხრახნს დიამეტრის შემცირება და ისრისებურობის გამო ჰაერის სიჩქარე ფრთოვანას ბოლოზე იშლება მდგენელებად, ქორდის და ბრუნვის ტრაექტორიის მიმართ, ეს ამცირებს რელატიურ ჰაერის სიჩქარეს. ასეთი ხრახნების უარყოფით მხარეს წარმოადგენს დიდი ხმაურის დონე, გამოწვეული ფრთოვანას სპეციფიური ფორმიან და დიდი ბრუნვის სიჩქარეებიდან.



ნახ.1.22 სქიმიტარული ხმლისებრი საჰაერო ხრახნი

1.3.3. საჰაერო ხრახნი უკუისრისებურობით

დღესდღეობით ფართოდ მიმდინარეობს მუშაობა გაუმჯობესებული მახასიათებლების საჰაერო ხრახნების შემუშავებაზე და არის გარკვეული მიღწევები, ერთ-ერთ ასეთ ექსპერიმენტულ მოდელს წარმოადგენს, შებრუნებული სქიმიტარული საჰაერო ხრახნი, აღნიშნული წარმოადგენს ზრდადი უკუისრისებურობის კუთხის მქონე ხრახნს, რომელმაც ერთნაირ ატმოსფერულ პირობებში ცდების დროს ჩვეულებრივ ხრახნებთან შედარებით გაუმჯობესებული მახასიათებლები აჩვენა.

ასევე უკუისრისებურობის მქონე ხრახნებზე მიმდინარეობს კვლევა მაიამის უნივერსიტეტის აერონავტიკის დეპარტამენტში, პროფესორ Zha wowed-ის და მისი გუნდის მიერ, იმ განსხვავებით, რომ ამ შემთხვევაში ხრახნი წარმოადგენს ნორმალური ხრახნისა და უკუისრისებურ ხრახნის ნაზავს, ცენტრიდან გარკვეულ მანძილამდე ფრთოვანა სწორია, შემდეგ იხრება (ნახ.1.23) აღნიშნული ხრახნის შედარება მოხდა ტრადიციული კონსტრუქციის ხრახნთან ვირტუალურ აეროდინამიკურ მილში, სადაც აღნიშნულმა ხრახნმა ტრადიციულთან შედარებით მაღალი ეფექტურობა აჩვენა.



ნახ.1.23 ექსპერიმენტული საჰაერო ხრახნის მოდელი უკუისრისებურობით

1.3.4. ბიონიკური საჰაერო ხრახნი

ერთ-ერთ საკმაოდ პერსპექტიულ პროტოტიპს წარმოადგენს კომპანია BigRep-ის მიერ შექმნილი „ბიონიკური საჰაერო ხრახნის“ მოდელი, რომლის დიზაინიც შემუშავებულია ფრინველის ფრთის მიხედვით, კერძოდ ფრთის ბოლოში ბუმბულები ქმნიან ერთგვარ ნაწიბურებს/კბილებს, რომლებიც მას ეხმარება პლანირების დროს, აღნიშნული ნაწიბურები ასევე აქვთ კუზა ვეშაპებს,

გამომდინარე ამ ბიომიმკრული მიმსგავსებებით, ასეთივე ნაწიბურები გააჩნია ხრახნს უკანა წიბოზე, რაც უფრო ეფექტურს და ნაკლებ ხმაურიანს ხდის ხრახნს, ვინაიდან ჰაერი ამ ნაწიბურებიდან გამოდის მიკროგრიგალური სახით და ეს ხელს უშლი ფრთოვანას უკან უფრო დიდი ზომის გრიგალური ზონის ფორმირებას საბოლოოდ კი ვიღებთ ნაკლებ წინაღობას და ხმაურს, ასევე ხრახნს გააჩნია ერთგვარი რგოლში ჩასმული კონსტრუქცია ამ ყველაფრის გათვალისწინებით კი ხრახნი წარმოქმნის ნაკლებ დაგრიგალებას ფრთოვანას ბოლოებში, შესაბამისად ნაკლებ ხმაურს და ნაკლებ ინდუქციურ წინაღობას, კომპანიის ცნობით აღნიშნული ბიონიკური ხრახნი ეფექტურია როგორც ჰაერში ისევე წყალში. ჩატარებული კვლევების საფუძველზე ხრახნი ჰაერში ხრახნი 30%-ით ნაკლებ ხმაურიანია და წყალში გამოცდისას 19% მეტ გამწვევ ძალას წარმოქმნის. უნდა აღინიშნოს რომ ბიონიკური ხრახნის არსებულ ვერსიას არ გააჩნია აეროდინამიკური პროფილი, ეს კი მის ჰაერში ეფექტურობის ინდექსს დაბლა სწევს, თუმცა საჰაერო ხრახნთა ასეთი კონსტრუქცია, ფრთოვანას ბოლოებში ნაწიბურები, საკმაოდ პერსპექტიულ კონცეპტს წარმოადგენს და ხრახნთა ახალი კონსტრუქციების წარმოქმნის საშუალებას იძლევა.



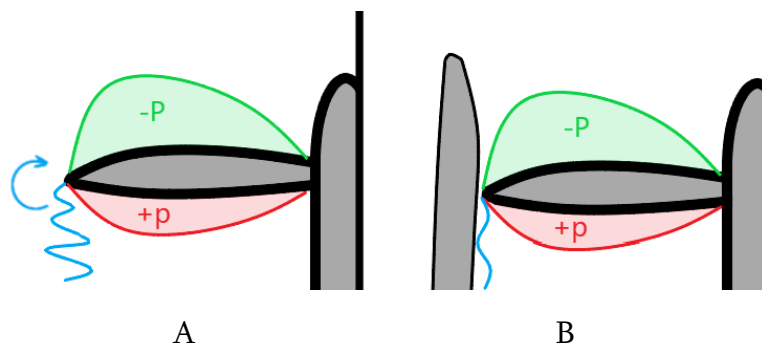
ნახ.1.24 ბიონიკური საჰაერო ხრახნი

1.3.5. არხში მოთავსებული საჰაერო ხრახნი

საჰაერო ხრახნების ერთ-ერთ ეფექტურობის ამაღლების ხერხს წარმოადგენს მისი არხში ჩასმა, ასეთ კონსტრუქციისთვის განკუთვნილ ხრახნს ხშირად მოიხსენებენ როგორც ვენტლატორს, კონსტრუქციულად ეს სქემა წარმოადგენს ხრახნის გარშემო შემოვლებულ სარტყელს, რომელიც ქმნის მილს/არხს სადაც

გაივლის ხრახნის მიერ შეწოვილი ჰაერი, ასეთი კონსტრუქციის ხრახნები გამოირჩევიან ეფექტურობით პირველი მიზეზი ამისა არი ის რომ არხის კედლების წყალობით თითქმის არ წარმოიქმნება ჰაერის აგრიგალებით, ენერგიის დანაკარგები ფრთოვანების ბოლოებზე; მეორე კი ის რომ არხის მიმღები და გამშვები სექციების ოპტიმიზებით შეიძლება ხრახნის ეფექტურობის გაზრდა, ასევე არხში ჩასმულ ხრახნებში ფრთოვანების თავებზე ბგერითი დარტყმების წარმოქმნა ხდება შედარებით უფრო გვიან ვიდრე ტრადიციულ ხრახნებში. ასეთი ხრახნები საკმაოდ დიდ ისტორიას ითვლის ჯერ კიდევ 1910 წელს რუმინელმა გამომგონებელმა ჰენრი კოანდამ შექმნა დაახლოებით ასეთ (უფრო რთული) პრინციპით თვითმფრინავი.

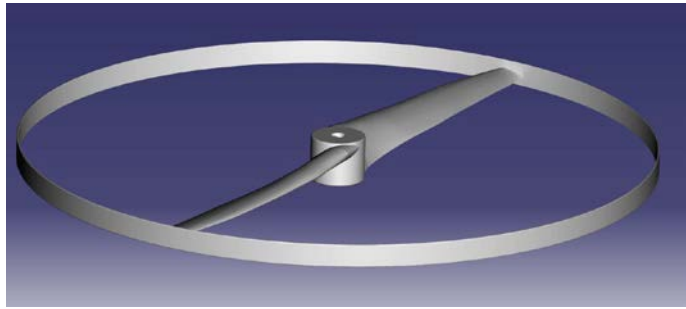
ზემოთაღნიშნული ხრახნის დანაკარგების ეფექტურ აღკვეთის გზად მოინახა საჰაერო ხრახნის არხში ჩასმა, ამ დრო არხის კედლები თამაშობს ფიზიკური ბარიერის როლს. ფრთოვანა მაღალი წნევის არესა და დაბალ წნევის არეს შორის არ აძლევს მაღალი წნევის არეში მყოფ ჰაერს გადავიდეს დაბალ წნევის არეში, შესაბამისად, ამ დროს აღარ წარმოიქმნება გრიგალები ხრახნის ბოლოებში და მთელი ენერგია ხმარდება წნევის ძალის შექმნას, ხმაურის კოეფიციენტიც მცირდება. უნდა აღინიშნოს, რომ არხის კედელსა და ხრახნს შორის რეალურად მაინც რჩება მცირე ღიობი სადაც შეიძლება მცირე გრიგალები წარმოიქმნას. არხში ჩასმულმა საჰაერო ხრახნმა ჩვეულებრივ ხრახნთან შედარებით შეიძლება 20-30%-ით აამაღლოს ეფექტურობა. აღნიშნული კონსტრუქციის უარყოფით მხარეს წარმოადგენს კონსტრუქციის დამატებითი მასა; ჰაერის მიღების კუთხეების დაბალი დიაპაზონი და ხრახნსა და არხს შორის ღიობის მაღალი სიზუსტის უზრუნველყოფის სირთულე.



ნახ.1.25 A აგრიგალება თავისუფალი ხრახნის ფრთოვანას ბოლოში B აეროდინამიკული არხით მიღებული ეფექტი

1.3.6. სარტყელიანი საჭაერო ხრახნი

არხში ჩასმული ხრახნის პრინციპია გამოყენებული სარტყელიანი ხრახნის/ვენტილატორის კონსტრუქციაში იმ განსხვავებით, რომ ამ შემთხვევაში სარტყელი თავად ხრახნის შემადგენელ ნაწილს წარმოადგეს და არა არხით განცალკევებულ დეტალს. აღნიშნულს გააჩნია არხის მიერ შექმნილი დადებითი ეფექტები ხრახნზე, მაგრამ გამომდინარე იქიდან, რომ სარტყელიც ბრუნავს ხრახნთან ერთად ეს წარმოქმნის დიდი ინერციული ძალების განვითარების საშიშროებას და ამიტომ ავიაციაში ასეთ ხრახნებს არ იყენებენ, მაგრამ საკმაოდ პერსპექტიულ კონსტრუქციას წარმოადგენს.



ნახ.1.26 სარტყელიანი საჭაერო ხრახნი (ხრახნი რგოლში)

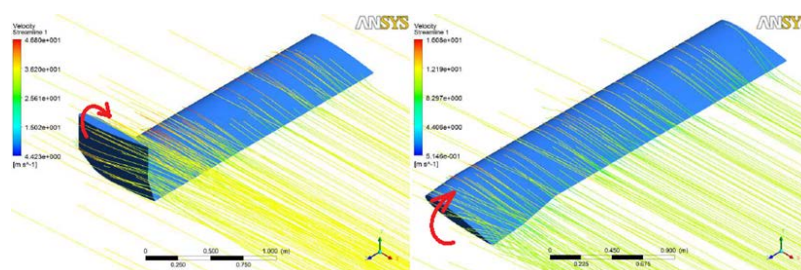
1.3.7. Q-tip საჭაერო ხრახნი

ასევე, საკმაოდ პერსპექტიულ კონსტრუქციას წარმოადგენს ე.წ. Q-tip ხრახნი. ასეთი ხრახნები დღესდღეობით არც თუ ისე ფართოდ გამოიყენება თუმცა მათ გააჩნიათ დიდი პერსპექტივა და ამ ხრახნების მომავალში დახვეწა და გაუმჯობესება საკმაოდ იმედის მომცემია, ვინაიდან Q-tip ხრახნს ჩვეულებრივ ხრახნთან შედარებით შემცირებული აქვს ხმაური და ინდუქციური წინაღობა.



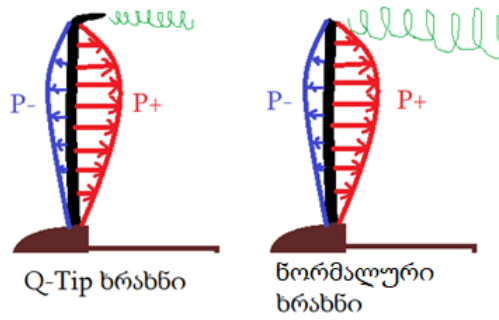
ნახ.1.27 Q-tip საჰაერო ხრახნი

Q-tip ხრახნისთვის დამახასიათებელ ნიშანს წარმოადგენს ფრთოვანას ბოლოში დამატებული პროპლეთი (proplet) პატარა “ანაღუნი”, რომელიც თვითმფრინავს ფრთის winglet-ის მსგავსად არ აძლევს საშუალებას ჰაერს გადავიდეს მაღალი წნევის არედან (ანუ ხრახნის ბრუნვის სიბრტყის უკანა ზედაპირიდან) დაბალი წნევის არეში (ხრახნის ბრუნვის სიბრტყის წინა ზედაპირზე) ანუ იგი წარმოადგენს გარკვეულ ფიზიკურ ბარიერს მაღალ და დაბალ წნევის არეებს შორის.



ნახ.1.28 ფრთის ბოლოებზე წარმოქმნილი გრიგალების შედარება ნორმალურ ფრთაზე წარმოქმნება შედარებით დიდი დიამეტრის გრიგალი winglet-ით ფრთაზე კი ეს გრიგალი უფრო პატარა დიამეტრისაა

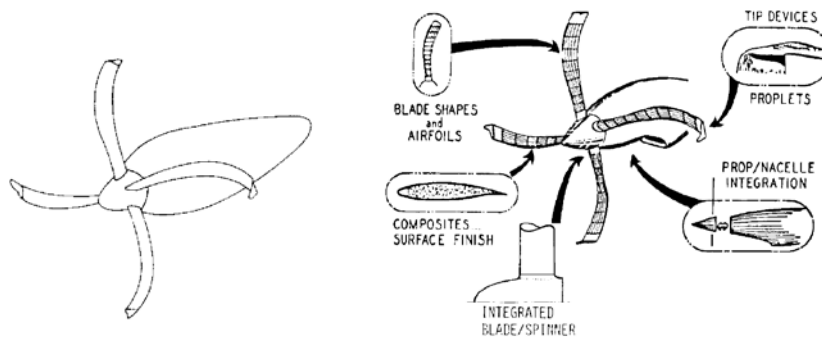
Q-tip საჰაერო ხრახნები დღესდღეობით გამოიყენება ძირითადად ხმაურის კოეფიციენტის შესამცირებლად, უფრო მეტად მაბიძგ ხრახნიან თვითმფრინავებში, ვინაიდან ასეთ თვითმფრინავებში ეს პრობლემა მეტად შემაწუხებელია. Q-tip ხრახნების ანალიზისას გასათვალისწინებელია ფრთოვანას ბოლოში დამატებითი სიმძიმის არსებობა და როგორ იმოქმედებს მასზე ცენტრიდანული ძალა. უნდა აღინიშნოს ის ფაქტი რომ ცენტრიდანული ძალის მოქმედებით ჰაერის ნაკადი ერთგვარად მიყვება ნიჩბის ასეთ ფორმას და მაინც ხდება გარკვეული ზომის გრიგალის წარმოქმნა.



ნახ.1.29 Q-tip ხრახნის მიერ წარმოქმნილი ეფექტი ნორმალურ ხრახნთან შედარებით

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ იმის გამო რომ პროპლეტი, Q-tip ხრახნზე, მეტნაკლებად არ აძლევს ჰაერს საშუალებას გადავიდეს მაღალი წნევის არიდან P+, დაბალი წნევის არეში P-(ნახ.1.29), ამიტომ ნაკლებად ხდება ჰაერის გადადინება ფრთოვანების ბოლოში და შესაბამისად ნაკლებად ხდება ნაკადთა აგრიგალებების წარმოქმნა, ნორმალურ ხრახნთან შედარებით. შედეგად კი ვიღებთ რომ Q-tip ხრახნი იმი გამო რომ წარმოქმნის უფრო მცირე აგრიგალებას მცირდება თავად ხრახნის მიერ წარმოქმნილი ხმაური და ინდუქციური წინაღობა, რაც რამდენადმე ამაღლებს ასეთი ხრახნის გამოყენების მართებულობას ტრადიციულ ხრახნებთან შედარებით.

უნდა აღინიშნოს რომ Q-tip ხრახნების მსგავსი კონსტრუქცია წარმოდგენილია NASA-ს 1981 წლის აეროდინამიკურ მილში ჩატარებულ ტესტების ანგარიშში[35] და იგი მოიაზრება როგორც მომავლის საჰაერო ხრახნი დაბალი სიჩქარეებისათვის, იმ განსხვავებით რომ NASA-ს საჰაერო ხრახნის კონცეპტს ფრთოვანას ანალუნი წინა მხარეს აქვს გადახრილი.



ნახ.1.30 NASA-ში შემუშავებული საჰაერო ხრახნის კონცეპტი დაბალი სიჩქარეებისთვის

1.4. საჰაერო ხრახნის ენერგოეფექტურობა და ხმაური

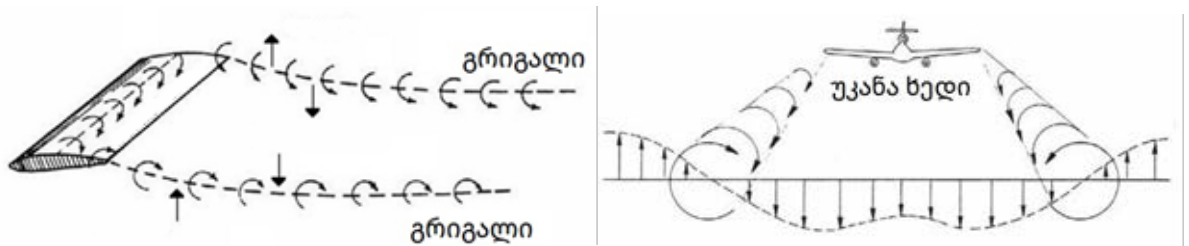
სადოქტორო კვლევის მიზანს წარმოადგენს საჰაერო ხრახნის ეფექტურობის ამაღლება და მის მიერ წარმოქმნილი ხმაურის შემცირება. ამისათვის აუცილებელია შესწავლილი იქნას საჰაერო ხრახნის აეროდინამიკა და მიმდინარე პროცესები. ერთ-ერთი ყველაზე არასასურველი აეროდინამიკური პროცესი, რაც საჰაერო ხრახნის მუშაობისას წარმოიქმნება არის ჰაერის დაგრიგალებული, ტურბულენტური მოძრაობა. აღნიშნული უარყოფით გავლენას ახდენს ხრახნის თითქმის ყველა მახასიათებელზე, განსაკუთრებით კი ხრახნის აეროდინამიკურ წინაღობაზე, წევის ძალაზე და ხმაურზე. ამ კუთხით ყველაზე მნიშვნელოვან ზონას საჰაერო ხრახნის ფრონთანაზე წარმოადგენს ბოლოები, სადაც ჰაერის დაგრიგალება გარდაუვალია.

1.4.1. ინდუქციური წინაღობა და ფრთის ბოლოში წარმოქმნილი

ჰაერის დაგრიგალება

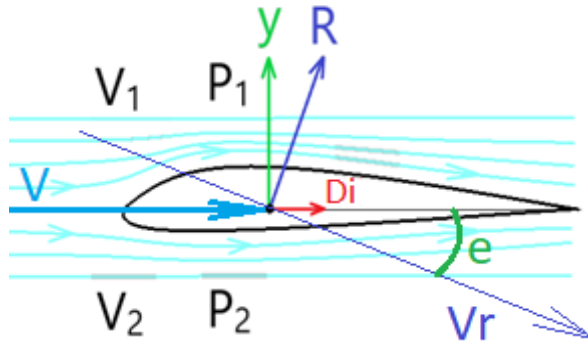
როგორც ვიცით ფრთაზე ამწევი ძალა წარმოიქმნება, ჰაერის ნაკადში მოძრავი ფრთის არასიმეტრიული აეროდინამიკური პროფილის მეშვეობით. ფრთის პროფილის ზედა ზედაპირზე აქვს უფრო მეტი სიმრუდე, ქვედა ზედაპირზე კი პირიქით. ამის გამო ფრთის ზედა ზედაპირზე ჰაერს უწევს უფრო გრძელი ტრაექტორიის გავლა და შესაბამისად იზრდება მისი სიჩქარე, ქვედა ზედაპირზე კი ჰაერი გადის შედარებით მოკლე მანძილს და შესაბამისად მისი სიჩქარე ნაკლებია ზედა ზედაპირზე გამავალ ჰაერის ნაკადთან შედარებით[19]. ბერნულის თეორიიდან კი ცნობილია, რომ სითხის ან აირის მოძრაობისას რაც მეტია სიჩქარე მის კვადრატულ მცირეა წნევა და პირიქით რაც უფრო ნაკლებია სიჩქარე მის კვადრატულ იზრდება წნევა. გამომდინარე აქედან, ფრთის ზედა ზედაპირზე გვაქვს მაღალი სიჩქარე და დაბალი წნევა, ქვედა ზედაპირზე კი ჰაერის შედარებით დაბალი სიჩქარე და შედარებით მაღალი წნევა. ეს ორი შეიძლება განისაზღვროს როგორც დაბალი და მაღალი წნევის არეები. გამომდინარე აქედან, ფრთის შემთხვევაში, ქვედა მაღალი წნევის არიდან ჰაერი ცდილობს გადავიდეს და შეავსოს ზედა დაბალი წნევის არე, მაგრამ მათ შორის ფრთის არსებობის გამო, ჰაერი,

მაღალი წნევის არიდან ფრთას გადაადგილებს დაბალი წნევის არის მიმართულებით, და ეს მოქმედება გამოიხატება როგორც, ჰაერის, მაღალ წნევიანი არის მიერ ფრთაზე ამწევი ძალის წარმოქმნა. მაგრამ ფრთის ბოლოში, სადაც მაღალ და დაბალ წნევის არეებს შორის ფიზიკური ბარიერი აღარ არის, ჰაერი ფრთის ბოლოზე შემოვლით გადაადგილდება ფრთის ქვედა ზედაპირიდან ზედა ზედაპირზე. იმის გათვალისწინებით რომ ფრთა მოძრაობს ჰაერის ნაკადის შემხვედრი მიმართულებით, ფრთის ბოლოში ჰაერის ეს წრიული ტრაექტორია გადადის ფრთის უკან წარმოქმნილი სპირალურ ტრაექტორიაში (დაგრიგალებაში).



ნახ.1.31 აგრიგალებით გამოწვეული ჰაერის ნაკადის ტრაექტორიის ცვლილება ფრთის უკან

ამ ფაქტს გააჩნია ორი სახის უარყოფითი ეფექტი, ერთი ის რომ გრიგალის წარმოქმნაზე იხარჯება და შესაბამისად ამწევ ძალას აკლდება, ფრთის ბოლოზე წნევათა სხვაობით მიღებული სასარგებლო ენერგია და მეორე კი ის, რომ აღნიშნული გრიგალი ფრთის უკან მდებარე ჰაერის ნაკადს უცვლის ტრაექტორიას, ხრის ქვედა მიმართულებით (ამას downwash-ს უწოდებენ), შედეგად იცვლება აეროდინამიკური პროფილის ჰაერის გარსემომდენი ნაკადის საშუალო ტრაექტორია (იხრება ქვემოთ), ეს იწვევს ამწევი ძალის ვექტორის ფრენის მიმართულების პერპენდიკულარული ღერძიდან უკან გადახრას. მისი შესაბამის ღერძებზე დაგეგმილებით კი ვიღებთ 2 დამატებით ძალას ერთი[19], ფრენის მიმართულების პერპენდიკულარულ ღერძზე დაგეგმილებული ვექტორი, არის რეალური ამწევი ძალა ხოლო მეორე, ფრენის მიმართულების პარალელურ ღერძზე დაგეგმილებული ვექტორი, წარმოადგენს ნარჩენ წინაღობის ძალას რომელსაც ინდუქციურ წინაღობას უწოდებენ.



ნახ.1.32 ძალათა განაწილება, აეროდინამიკურ პროფილზე ჰაერის ნაკადის აგრიგალებით გამოწვეული, გარსშემომდენი ნაკადის შეცვლილი ტრაექტორიისას.

V_r - ჰაერის ნაკადის საშუალო ტრაექტორია შეუშფოთებელ და ფრთის უკან დაცვრებულ ნაკადებს შორის; V შეუშფოთებელი ჰაერის ნაკადი; R აბსოლუტური აეროდინამიკური ამწევი ძალა; Y რეალური ამწევი ძალა, D_i ინდუქციური წინაღობა; e კუთხე ჰაერის შეუშფოთებელ და საშუალო ნაკადებს შორის

უნდა აღინიშნოს რომ ინდუქციური წინაღობა გარდაუვალი მოვლენაა აეროდინამიკური ამწევი ძალის მიღებისას, მაგრამ ხსენებული ჰაერის აგრიგალება ზრდის მის მნიშვნელობას. აღნიშნული პრობლემები საერთოა, როგორც თვითმფრინავის ფრთისთვის, ასევე საჰაერო ხრახნის ფრთოვანასათვის, მაგრამ იმ განსხვავებით რომ საჰაერო ხრახნის შემთხვევაში თავს იჩენს კიდევ ერთი მოვლენა - ცენტრიდანული ძალა, რომელიც ხრახნის ბრუნვის სიბრტყეში მოყოლილ ჰაერს განდევნის კიდეებისკენ და ხელს უწყობს აღნიშნული უარყოფითი ეფექტების წარმოქმნას. ამ ყველაფრის შედეგად კი ვიღებთ საჰაერო ხრახნის მარგი ქმედების კოეფიციენტის გაუარესებას, გრიგალების წარმოქმნით ენერჯის დანაკარგების და გაზრდილი ინდუქციური წინაღობის გამო, და ხმაურის დიდ კოეფიციენტს.

ფრთაზე ამწევი ძალის ელიფსური განაწილებით ინდუქციური წინაღობის D_i ძალა შეიძლება გამოითვალოს შემდეგნაირად [16]:

$$D_i = \frac{L^2}{\frac{1}{2}\rho_0 V_E^2 \pi b^2}$$

სადაც: L - არის ამწევი ძალა; ρ_0 - არის ჰაერის სიმკვრივე ზღვის დონეზე; V_E - ექვივალენტური ჰაერის სიჩქარე; b - არის ფრთის გაქანი.

ამ ფორმულიდან ჩანს რომ ინდუქციური წინაღობა კვადრატულ დამოკიდებულებაშია ამწევ ძალასთან და შებრუნებულ კვადრატულ დამოკიდებულებაში ჰაერის სიჩქარესა და ფრთის გაქანთან.

1.4.2. საჰაერო ხრახნის კონცეპტუალური მოდელი ინდუქციური წინაღობის შესამცირებლად

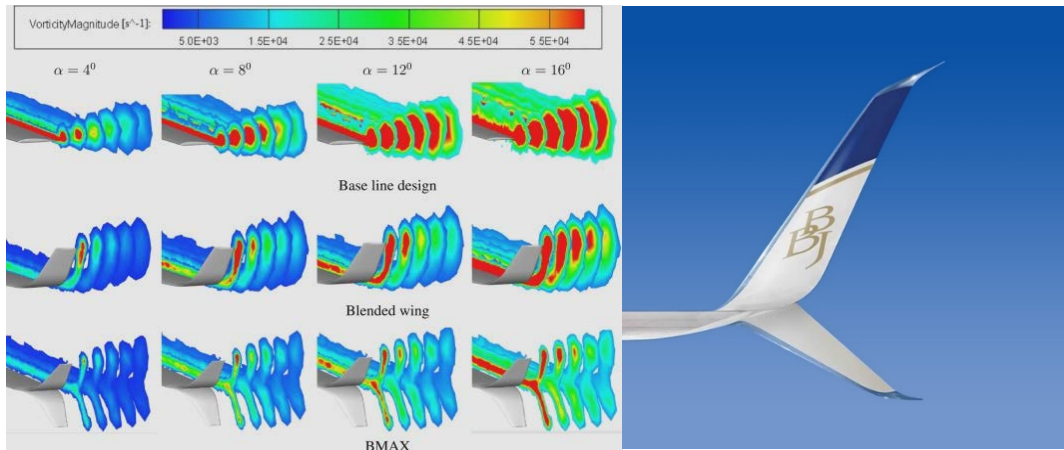
ყველა ზემოთხსენებულიდან გამომდინარე საჰაერო ხრახნის გაუმჯობესებისა და ეფექტურობის ამაღლებისათვის გადაჭრის გზა უნდა ვეძებოთ ხსენებულ ფრთოვანას ბოლოებში ჰაერის დაგრიგალების ტენდენციის შემცირებისკენ. ამის ნათელი მაგალითია არხში ჩასმული საჰაერო ხრახნი, რომელიც ამცირებს ფრთოვანას ბოლოში გრიგალს, შედეგად კი ხრახნის წვევის ძალას იზრდება შესამჩნევად 20-40%-ით [7]. გარდა ამისა, ასეთ საჰაერო ხრახნებში ხმაურის კოეფიციენტიც გაცილებით დაბალია, ვიდრე ღია ხრახნებში. ფრთოვანას ბოლოში ჰაერის დაგრიგალების შემცირებისთვის საუკეთესო საშუალება იქნება მის მაღალ და დაბალ წნევის არეების განცალკევება ფიზიკური ბარიერით.



ნახ.1.33 საჰაერო ხრახნი ფრთოვანების T-სებრი დაბოლოებებით (პროპლეტებით)

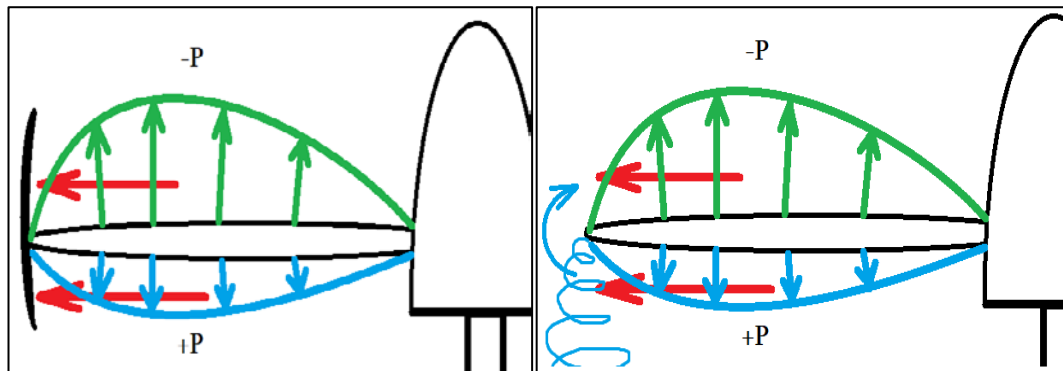
თუ ფრთოვანას ბოლოში დავამაგრებთ ფირფიტას, რომელიც გამოწეული იქნება ფრთოვანას ორივე ზედაპირისკენ (Q-tip საჰაერო ხრახნის მსგავსად, მაგრამ ორივე მხარეს), შეიძლება ვთქვათ, რომ ასეთი ხრახნი იმოქმედებს როგორც იდეალურად შესრულებული, ღრეჩოს არ არსებობით, არხში ჩასმული ხრახნი, ვინაიდან

აღნიშნული ფორფიტა განაცალკევებს მაღალ და დაბალ წნევის არეებს და არ მისცემს საშუალებას ჰაერს გადავიდეს ფრთოვანას ქვედა ზედაპირიდან ზედა ზედაპირზე (ნახ.1.33). თვითმფრინავის ფრთის მაგალითზე მსგავსი ორმხრივი winglet-ები ცალმხრივთან შედარებით გამოირჩევიან მაღალი ეფექტურობით და ნაკლებად წარმოქმნიან გრიგალებს (ნახ.1.34), რაც გამოწვეულია ფრთის ზედა და ქვედა ზედაპირებზე ერთგვარი ბარიერების არსებობით.



ნახ.1.34 ფრთის ბოლოებში წარმოქმნილი დაგრიგალების ვირტუალური ანალიზი; ორმხრივი winglet-ის უპირატესობა

ვინაიდან ხსენებული ორმხრივი ვინგლეტები (ხრახნის შემთხვევაში პროპლეტები) საჰაერო ხრახნებში არ გვხვდება და მათზე ჩანაწერები და ექსპერიმენტები მცირეაა ამიტომ ასეთ საჰაერო ხრახნებს შეგვიძლია ვუწოდოთ ხრახნები T-ებრი დაბოლოებებით, ვინაიდან კონსტრუქციულად ხრახნის ფრთოვანას ბოლო ჰგავს ლათინურ T-ს.



ნახ.1.35 T-სებრი და ნორმალური საჰაერო ხრახნების შედარება

იმის მიუხედავად, რომ თეორიულად T-სებრმა საჰაერო ხრახნმა უნდა შეამციროს ჰაერის აგრიგალება და ინდუქციური წინაღობის წარმოქმნა ფრთოვანას ბოლოებში და ამით უნდა მოგვეცეს გაზრდილი სამუშაო მახასიათებლები. მაგრამ შესაძლოა მოგვიწიოს გარკვეულ პრობლემებთან თვალის გასწორება, ვინაიდან საჰაერო ხრახნს ფრთოვანების ბოლოებში ემატება გარკვეული მასა, ამაზე შეიძლება უარყოფითად იმოქმედოს ცენტრიდანულმა ძალამ და ამ ადგილებში შეგვექმნას სიმტკიცის პრობლემები. თუმცა საჰაერო ხრახნზე მოქმედი ცენტრიდანული ძალის გამოთვლა შეგვიძლია მარტივად:

$$F = m\omega^2 r$$

სადაც: F-არის ცენტრიდანული ძალა; m-არის სხეულის მასა; ω -კუთხური სიჩქარე; r-რადიუსი.

ვინაიდან როგორც ვიცით ბრუნვით სხეულზე მასა პირდაპირპროპორციულ დამოკიდებულებაშია ცენტრიდანულ ძალასთან, ამიტომ ასეთი ხრახნების გამოყენება მიზანშეწონილი იქნება განსაკუთრებით, დღესდღეობით ფართოდ გავრცელებული, მცირე ზომის უპილოტო საფრენ აპარატებში, რაც შეიძლება იყოს eVTOL მულტიროტორული და მსგავსი აპარატები. ვინაიდან აღნიშნულ აპარატებს გააჩნიათ ხრახნთა მცირე დიამეტრი (შესაბამისად მცირე კუთხური სიჩქარე) და მცირე მასა, რაც ნიშნავს იმას, რომ ცენტრიდანული დატვირთვა შედარებით მცირეა ხრახნზე, ასევე აღნიშნული აპარატებში ენერჯის ფარდობითი მოხმარება ძალზედ მაღალი მნიშვნელობისაა, ამიტომაც დღესდღეობით არსებულ დრონებში მუშაობის დრო საშუალოდ 30 წუთზე ნაკლებია, ასე რომ ნებისმიერი ენერგეტიკული დანაკარგის (საუბარია ინდუქციურ წინაღობაზე) აღმოფხვრა დადებითად წაადგება აპარატის მუშაობის ხანგრძლივობას.

ცენტრიდანული ძალით გამოწვეული პრობლემების კუთხით შესაძლებელია განხილული იქნეს კონსტრუქციის მცირე მასის ზღვრებში გათვალისწინება, ანუ ფრთოვანას ბოლოებში დამატებული პროპლეტები უნდა იყოს მაქსიმალურად მცირე მასის, ასევე საჰაერო ხრახნის დასამზადებლად გამოყენებული უნდა იყოს მტკიცე მაგრამ მცირე კუთრი მასის მქონე მასალები. წინააღმდეგ შემთხვევაში, მაღალ ბრუნთა სიჩქარეებზე ფრთოვანების ბოლოებში პროპლეტებს ექნებათ

ტენდენცია გასწორდნენ ბრუნვის სიბრტყის პარალელურად და საბოლოოდ მოტყდეს სამაგრი ადგილიდან. მაგრამ, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, დრონების შემთხვევაში მათი საჰაერო ხრახნების პატარა დიამეტრის და მასის მცირე მნიშვნელობის გამო შეიძლება ასეთი ძალების დამაკმაყოფილებელ ზღვრებში მიღება ხრახნის დასამზადებელი მასალის კუთრი სიმტკიცის მიხედვით შერჩევას.

T-სებრი დაბოლოებების მქონე საჰაერო ხრახნების პერსპექტიულობაზე საუბრისას შეგვიძლია ვთქვათ რომ ასეთი ხრახნების პერსპექტივა საკმაოდ დიდია, ვინაიდან თეორიულად წარმოადგენს საკმაოდ საინტერესო კონსტრუქციას და შესაბამისი კვლევებისა და გამოცდების ჩატარებით შესაძლებელი მიღებული იქნეს საჰაერო ხრახნის მუშა უნარიანი მაღალ ეფექტური პროტოტიპი.

1.4.3. საჰაერო ხრახნების მიერ გამოწვეული ხმაური და მისი

შემცირების შესაძლებლობების ანალიზი

სადოქტორო კვლევის განმავლობაში სულ უფრო და უფრო აქტიურად გამოიკვეთა საჰაერო ხრახნის მიერ წარმოქმნილი ხმაურით გარემოს დაბინძურების პრობლემა. აღნიშნული განსაკუთრებით აქტუალური ბოლო წლების განმავლობაში გახდა, ვინაიდან სწორედ ამ პერიოდში სერიოზულად დაიწყო მსჯელობა, პერსონალური, ვერტიკალური აფრენა-დაფრენის ელექტრო (eVTOL) საფრენი აპარატების ყოველდღიურ ცხოვრებაში გამოყენებაზე, ერთგვარ აერო ტაქსებად (Air Taxi). ეს ტერმინი დღესდღეობით დიდი პოპულარობით სარგებლობს და მასზე დიდი იმედები მყარდება. თუმცა ამ კონცეპტის რეალურ ცხოვრებაში განხორციელებისათვის მრავალ სხვა საკითხთან ერთად გარემოს მაღალი ხმაურით დაბინძურების საკითხიც დგას. მართლაც, როგორც შესავალში აღვნიშნეთ, გადაადგილების ასეთი ინოვაციური მეთოდი ძალზედ მიმზიდველია, მაგრამ ათასობით ასეთი აპარატის მიერ წარმოებული ხმაურის პირობებში ცხოვრება ძალზედ არაკომფორტული იქნება.

რომ გავიაზროთ, ხმაურის შემცირების შესაძლებლობა, ჯერ უნდა გავიგოთ მისი არსი. ფიზიკაში ხმა არის ვიბრაცია, რომელიც რაიმე შუამავლის (განვიხილოთ ჰაერის შემთხვევაში) მეშვეობით ვრცელდება გარემოში როგორც აკუსტიკური ტალღა. თავის მხრივ ეს პროცესი წარმოადგენს, ხმის წყაროში წარმოქმნილ, ლოკალური, წნევის ოსცილაციას (ფლუქტუაცია), რომელიც გადაეცემა ჰაერის ნაწილაკებს და ასე ვრცელდება მასში[16]. აკუსტიკური ხმოვანი ტალღის სიდიდე ანუ ტალღის ლოკალურ და გარემო წნევებს შორის დისბალანსი განსაზღვრავს ხმამაღლობას (ხმოვანი დაწნევის დონეს). აქედან შეგვიძლია დავასკვნათ ის, რომ ხმის წარმოშობისთვის აუცილებელია რაიმე სახის მოძრაობა, რომელიც გარემოს შემადგენელ ნაწილაკებს ჯაჭვურ მოძრაობაში მოიყვანს.

ადამიანისთვის აღქმადია 16 დან 20000 ჰერცამდე ხმის სიხშირე, აქვე უნდა აღინიშნოს რომ მაღალი სიხშირის ხმა უფრო ხმადაბალია, თუმცა უფრო მკაფიოდ აღიქმება ყურისთვის.

თანამედროვე eVTOL ტიპის საფრენ აპარატებში მოძრავი დეტალების რაოდენობა ძალზედ მცირეა, ამიტომ მაღალი ხმაურის წარმოქმნილი ნაწილიც ბევრი არ არის, გარდა საჰაერო ხრახნებისა[16]. დიდი სიჩქარით ბრუნვისას ხრახნის ფრთოვანები პულსირებულ შეხებაში მოდის ჰაერის დიდ მოცულობასთან, რაც იწვევს მაღალი ხმის ტალღების წარმოშობას. საჰაერო ხრახნებში ხმამაღლობა დიდ წილად დამოკიდებულია ხრახნის დიამეტრზე, რაც უფრო დიდი დიამეტრისაა მით უფრო დაბალია ბრუნვის სიჩქარე და შესაბამისად უფრო დაბალია აკუსტიკური ტალღების სიხშირე, ხოლო მაღალია ხმის დაწნევის დონე, მცირე დიამეტრის შემთხვევაში კი პირიქით. ხმის ინტენსივობაზე ასევე გავლენას ახდენს ხრახნის ფრთოვანების გარშემო მიმდინარე აეროდინამიკური პროცესები. მაგალითად ტურბულენტური ზონები, სადაც ჰაერი სპირალურად მოძრაობს და ლოკალური წნევების ოსცილაცია ინტენსიურია, რაც მაღალი მნიშვნელობის ხმაურს გვაძლევს.

საჰაერო ხრახნების ხმაურის შეფასებისას უნდა გავითვალისწინოთ ასევე ამ ხმის სიხშირე. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ ხრახნის განსხვავებული დიამეტრების დროს განსხვავებულია ხმაურის პარამეტრებიც, კერძოდ მცირე დიამეტრის ხრახნის შემთხვევაში საკმარისი ამწევი ძალის მისაღებად საჭიროა ხრახნის ბრუნვის დიდი

სიჩქარე. ამ დროს მი მიერ გამოყოფილ ხმაურს მაღალი სიხშირე აქვს, ამის გამო კი ხმა მკვეთრი და შემაწუხებელია ახლო მყოფი დამკვირვებლისთვის თუმცა დაბალ სიხშირიანი ხმისგან განსხვავებით მას დიდი ძალა არ აქვს და დიდ მანძილებზე ისე მკვეთრად ვერ ვრცელდება. ამ პარამეტრზე ასევე გავლენას ახდენს საჰაერო ხრახნის ფრთოვანების რიცხვი რაც მეტი ფრთოვანა აქვს ხრახნს მით მაღალი სიხშირის ხმას გამოსცემს და ხმის გავრცელების არეალიც მცირეა.

1.4.4. ხმაურის პრობლემის გადაწყვეტისთვის არსებული ნეთოდები

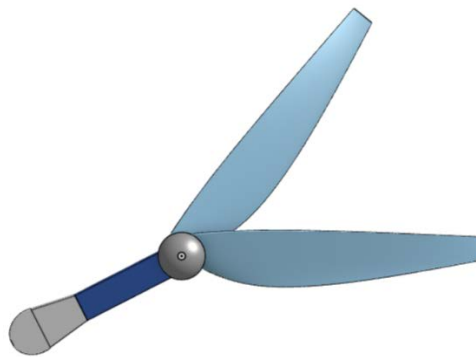
და მათი ანალიზი

ზემოთაღნიშნული ხმაურის პრობლემების გადაწყვეტისთვის საჰაერო ხრახნებში შეგვიძლია შემდეგი მეთოდები გამოვიყენოთ. ამისათვის უნდა განისაზღვროს თუ ხმის რა სპექტრის ანუ რომელი სიხშირეების თავიდან არიდება გვსურს. თუ გვსურ დაბალი სიხშირეების თავიდან არიდება, ამის მიღწევა შესაძლებელია ფრთოვანების რაოდენობის გაზრდით ან ხრახნის ბრუნვის სიჩქარის გაზრდით. მაღალი სიხშირეების თავიდან არიდებისთვის კი პირიქით, რაც შეიძლება მცირე ფრთოვანათა რიცხვი და დაბალი ბრუნთა რიცხვია საჭირო. მაგალითად მცირე ზომის სპორტულ დრონებში, სადაც მაღალი მანევრირების მოთხოვნებია, ხრახნის ბრუნთა რიცხვიც მაღალია და შესაბამისად საშუალება გვაქვს აპარატიდან მივიღოთ მაქსიმალურად მაღალი სიხშირის ხმა, რომელიც დიდ მანძილზე არ გავრცელდება [16]. ამისთვის შეგვიძლია მოვახდინოთ საჰაერო ხრახნის ფრთოვანების რაოდენობის გაზრდა.



ნახ.1.36 2 ფრთოვანიანი და მრავალ ფრთოვანიანი საჰაერო ხრახნები

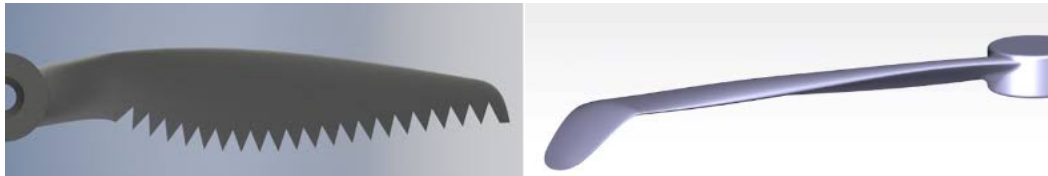
ასევე შესაძლებელია აღნიშნული სიხშირეების სინერჯის მიღწევა ანუ მაღალი სიხშირის ტალღების ფართო ინტერვალებით გაშვება, რაც ცნობილ უპილოტო საფრენი აპარატების მწარმოებელ კომპანია „ზიპლაინში“ გამოიყენეს. მათ მიერ შემუშავებულ საჰაერო ხრახნის კონცეპტს გააჩნია 2 ფრთოვანა, თუმცა არა სიმეტრიულად განლაგებული ნახ.1.37, ანუ ისეთნაირად, რომ ისინი წარმოადგენენ 8 ფრთოვანიანი ხრახნის ერთ-ერთ სექციას. ამის შედეგად მიიღწევა არა მაღალი სიხშირის უწყვეტი „ბზუილი“ არამედ ამ „ბზუილის“ ნაწყვეტი პულსირებული ვერსია, რაც საბოლოოდ შედარებით დაბალი მნიშვნელობის ხმოვან დაწნევას განაპირობებს [47].



ნახ.1.37 „ზიპლაინის“ დრონებში სექციური საჰაერო ხრახნი კონცეფცია

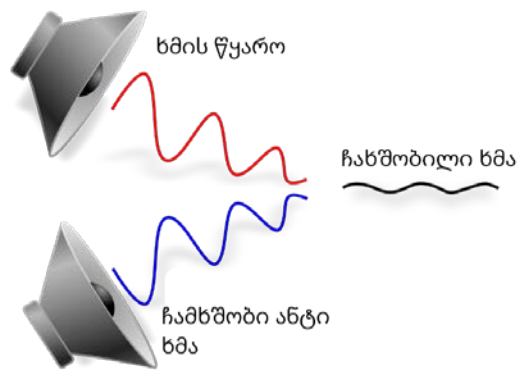
ხმაურის შემცირებისთვის საჰაერო ხრახნებში მნიშვნელოვანია ტურბულენტური ზონების შემცირება, ვინაიდან ასეთ ზონებში ჰაერი ქაოტურად მოძრაობს და შესაბამისად დიდია ხმაურიც. ამ შემთხვევაში ხმაურის შემცირებისთვის დიდი მნიშვნელობა ენიჭება საჰაერო ხრახნის აეროდინამიკურ ოპტიმიზაციას და მათი ისეთი გადაწყვეტებით აღჭურვას, რომლებიც ამ ტურბულენტურ ზონებს გააქრობენ ან შეამცირებენ. საჰაერო ხრახნის მოქმედებისას ტურბულენტური ზონები ძირითადად წარმოიქმნება ფრთოვანების ბოლოებში სადაც ხდება ჰაერის აგრიგალება და ფრთოვანას უკან სადაც გაიტყორცნება აჩქარებული ჰაერი. შესაბამისად ფრთოვანას ბოლოებში ტურბულენტობის შემცირება შეგვიძლია ფრთის ბოლო მოწყობილობებით ეგრედწოდებული პროპლეტებით (proplet), რომლებში შეიძლება განვიხილოთ ჩვენთვის კარგად ცნობილი Q-tip ბოლოები, T-სებრი დაბოლოებები და ა.შ. ხოლო ფრთოვანას უკან

წარმოქმნილი ტურბულენტური ზონის შემცირებისთვის შესაძლოა გამოვიყენოთ ფრთოვანაზე მიკრო გრიგალების წარმომქმნელი მოწყობილობები, რომელთა საშუალებითაც მოვახდენთ ამ ზონების პატარა ნაწილებად დაშლას, რაც შეამცირებს ხმაურის ინტენსივობას. ასეთი მოწყობილობები შეიძლება იყოს ფრთოვანაზე დატანილი ტურბულიზატორები, ფრთოვანას წინა და უკანა კიდეები ხერხის ან სავარცხლის მაგვარად შესრულება და ა.შ.



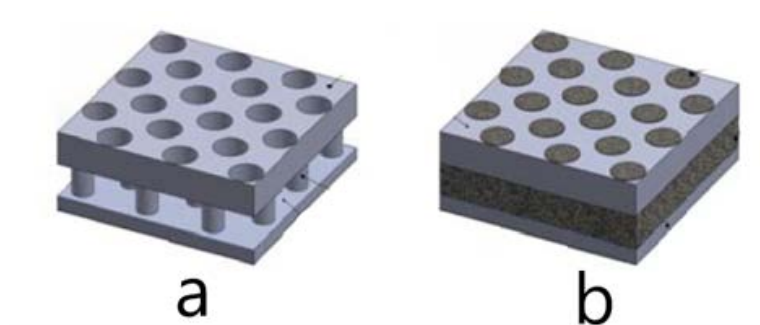
ნახ.1.38 საჰაერო ხრახნი ფრთოვანას უკანა კიდეზე ხერხისებური ტურბულიზატორებით; Q-tip პროპლეტის მქონე ხრახნი

ხმაურის შემცირების კიდეც ერთ ძალზედ ეფექტურ საშუალებას, როგორც ზოგადად, ისე საჰაერო ხრახნებში წარმოადგენს აქტიური ხმის კონტროლის სისტემა (Active Noise Control). აღნიშნული სისტემის საშუალებით შესაძლებელია ხრახნის მიერ გამოცემული ხმის ტალღის საპირისპირო მნიშვნელობის ტალღის გაშვება, რომელიც ჩაახშობს ხმას. ამისთვის სისტემა გამოცემული ხმის ტალღის სიხშირისა და ძალის დასადგენად შეიცავს მიკროფონს, რომელიც სიგნალს აგზავნის გამომთვლელში, რომელიც თავის მხრივ მიღებული სიგნალის შებრუნებულ ვერსიას გადასცემს დინამიკს და ახშობს ხმას. ცალ ცალკე ეს ორი სიგნალი დამკვირვებლის მიერ აღიქმება როგორც გარკვეული ხმაური თუმცა ერთდროულად ისინი ერთმანეთს ახშობენ და დამკვირვებლისთვის აღქმა შეუძლებელია. აღნიშნული სისტემა დღესდღეობით ფართოდ გამოიყენება აუდიო მოწყობილობებში როგორცაა ყურსასმენები. ასევე გამოიყენება ავტომობილების სალონებში გარე ხმაურის ჩასახშობად. გამომდინარე აქედან აღნიშნული სისტემის გამოყენება შესაძლებელია საჰაერო ხრახნებშიც და ამაზე არსებობს კიდეც გარკვეული კვლევები სადაც ხმის კონტროლის აქტიური სისტემის გამოყენებით საჰაერო ხრახნის ხმაურის 20%-დან-40%-მდე ჩახშობა მოახერხეს.



ნახ.1.39 ხმის აქტიური კონტროლის ANC სისტემის მოქმედების პრინციპული სქემა

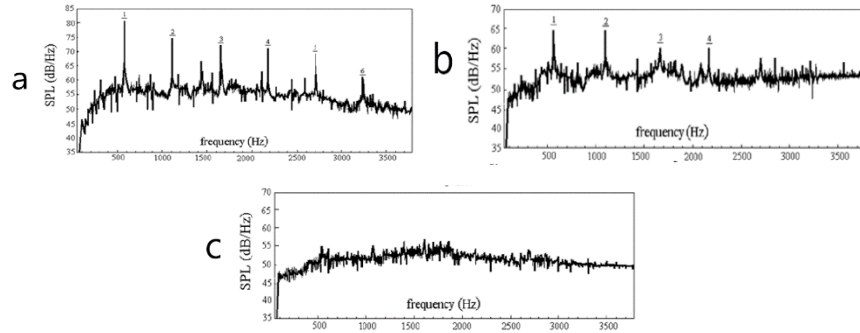
ასევე ერთ-ერთ პერსპექტიულ მიმართულებას საჰაერო ხრახნის ხმაურის შესამცირებლად წარმოადგენს, მისი ფოროვანი მასალით დაფარვა ამ მეთოდს პეპლის აკუსტიკური კანის სახელით იცნობენ, რაც განპირობებულია პეპლის ფრთების ანატომიით და წარმოადგენს ერთგვარ თავდაცვით მექანიზმს მასზე მონადირე ღამურებისგან, რომლებსაც გააჩნიათ ექოლოკაციით მსხვერპლის აღმოჩენის უნარი. მკვლევარები ირწმუნებიან რომ ფრთების აღნიშნული სტრუქტურა ნაკლებად აირეკლავს ხმოვან სიგნალებს ანუ ამცირებს ექოს გამოცემას და ამდაგვარად შეუმჩნეველი რჩება ღამურასთვის.



ნახ.1.40 მეთოდისთვის შემუშავებული საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას ზედაპირის ნიმუში. a - მიკრო პერფორირებული ფენა ღრუ სივრცით; b - მიკრო პერფორირებული ფენა შემავსებლით

აღნიშნული მეთოდის საჰაერო ხრახნზე გადმოტანისთვის იყენებენ მიკრო პერფორირებული პანელის რამდენიმე შრეს, რომელთა შორისაც მოთავსებულია გარკვეული სახის შემავსებელი [16]. აღნიშნულ კონსტრუქციებზე

განხორციელებული ცდები გვიჩვენებენ მეთოდის ეფექტურობის შედეგებს (ნახ.1.54). ნახაზიდან ვხედავთ გამოცდის შედეგად მიღებულ აკუსტიკურ სიხშირეთა სპექტრს, სადაც ნათლად ჩანს ხმოვან სიგნალთა სიხშირეთა სხვაობა ნორმალურ და გაუმჯობესებულ ზედაპირებს შორის.



ნახ.1.41 ფოროვანი მასალით დაფარული საჰაერო ხრახნების ხმის დაწნევის დონის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკები. a - ნორმალური ზედაპირი; b - მიკრო ფოროვანი ღრუ ზედაპირი; c - მიკრო ფოროვანი ზედაპირი შემავსებლით

1.4.5. ხმაურის აქტიური კონტროლის სისტემა საჰაერო ხრახნებისთვის.

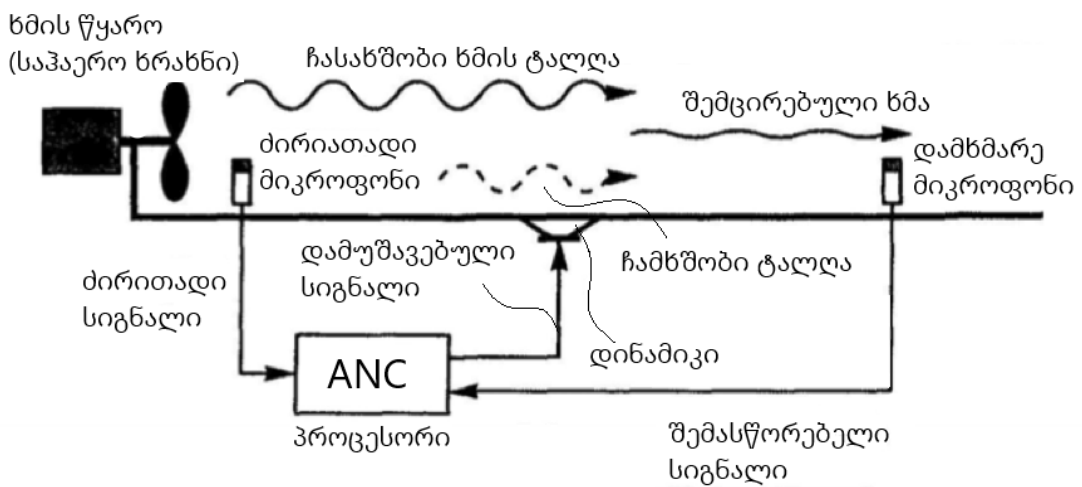
საჰაერო ხრახნებზე ხმაურის შემცირების ჩამოთვლილ მეთოდთაგან ყოველივე მათგანს გააჩნია გარკვეული უპირატესობები ერთმანეთთან მიმართებაში ასევე შესაძლებელია მათი ერთდროულად სინერგიულად გამოყენება, თუმცა ამ მეთოდთაგან განსაკუთრებულ ყურადღებას იმსახურებს ხმის აქტიური კონტროლის მეთოდი.

თავის არსში, ხმის აქტიური კონტროლი ANC არის ტექნოლოგია, რომელიც აქტიურად ებრძვის და ანეიტრალებს არასასურველ ხმის ტალღებს თანაბარი და საპირისპირო აკუსტიკური სიგნალის წარმოქმნით. იგი მიჰყვება დესტრუქციული ჩარევის პრინციპს, სადაც თანაბარი ამპლიტუდის და საპირისპირო ფაზის ორი ხმოვანი ტალღა ანადგურებს-ახშობს ერთმანეთს. ANC სისტემაში ეს მიიღწევა სტრატეგიულად განლაგებული მიკროფონებით მიღებული, ჩასახშობი შემომავალი ხმის, სიხშირისა და ამპლიტუდის გაანალიზებით და შემდეგ “ციფრული სიგნალის პროცესორის - DSP” მეშვეობით შებრუნებული ხმის ტალღის წარმოქმნით. ეს

შებრუნებული ხმის ტალღის ფორმა გამოიცემა დინამიკის საშუალებით, რაც ეფექტურად ახშობს საწყის ხმაურს.

ხმის აქტიური კონტროლი ANC სისტემის გამოყენების არეები მრავალფეროვანია. ერთ-ერთი ყველაზე გამორჩეული სფერო, სადაც ANC-მ მნიშვნელოვანი გავლენა მოახდინა, არის ტრანსპორტის სფერო. ეს ტექნოლოგია გამოიყენება თვითმფრინავებში, მატარებლებში, ავტომობილების სალონში: ძრავის, ჰაერის და სხვა გარე ხმაურის მნიშვნელოვნად შესამცირებლად. გარდა ამისა ANC სისტემა აქტიურად გამოიყენება ყურსასმენებში გარე ფონური ხმაურის მოსაცილებლად.

ყველაფერი ამის მიუხედავად ხმის აქტიური კონტროლი ANC სისტემის იმპლემენტაცია გარკვეულ მექანიზმში ან მოწყობილობაში საკმაოდ რთულ გამოწვევას წარმოადგენს და ეფექტური სისტემის შემუშავება კონკრეტული დავალებისთვის მოითხოვს აკუსტიკური, სიგნალის დამუშავების და ადაპტური ალგორითმების ღრმა ანალიზს. გარდა ამისა ANC სისტემის წარმატებული ფუნქციონირება დამოკიდებულია ზუსტ მოდელირებაზე და კალიბრაციაზე, ასევე კომპლექსური და განსხვავებული ხმოვან გარემოთა მართვის უნარზე. მიუხედავად ამისა, მკვლევარები და ინჟინრები აგრძელებენ ANC სისტემური ტექნოლოგიების დახვეწას, რაც მათ უფრო ეფექტურს, მრავალმხრივს და ხელმისაწვდომს ხდის ყოველ დღიურად.



ნახ.1.41 ხმის აქტიური კონტროლი ANC სისტემა

ნახ.1.42-ზე მოცემულია ხმის აქტიური კონტროლის ANC სისტემის გამოყენების სქემა საჰაერო ხრახნისთვის: ძირითადი მიკროფონი იღებს სიგნალს ხმის წყაროდან და გადასცემ პროცესორს, რომელიც ამ სიგნალის შებრუნებულ სიგნალს აწვდის დინამიკს, რომელიც გამოყოფს ხმაურის წყაროდან მომავალი ხმის ტალღის საპირისპირო მნიშვნელობის ტალღას. ეს ორი ხმის ტალღა გარკვეულწილად აბათილებს ერთმანეთ და რჩება უმნიშვნელო ნარჩენი ხმაური. მეორეს მხრივ ამ ნარჩენი ხმაურის დაფიქსირება ხდება დამხმარე მიკროფონის მიერ რომელიც შემასწორებელ სიგნალს აგზავნის პროცესორში ნარჩენი ხმის მაქსიმალურად შესამცირებლად.

ხმის აქტიური კონტროლი ANC სისტემის გამოყენება პერსონალურ eVTOL საფრენ აპარატებში მიზანშეწონილი იქნება მისი მაღალეფექტურობის გამო. თუმცა ასეთი სისტემის უარყოფით მხარეს შეიძლება წარმოადგენდეს საფრენი აპარატის დამატებითი მოწყობილობებით აღჭურვის საჭიროება, რაც გამოიწვევს გარკვეულწილად აპარატის წონის მომატებას და მოითხოვს დამატებით მცირე ელექტროენერჯის ხარჯს.

ასევე უნდა აღინიშნოს ხმის აქტიური კონტროლის მეთოდთან სხვა მეთოდების სინერჯის დიდი პოტენციალი გამომდინარე იქიდან, რომ რაც უფრო მეტად მოვახდენთ ხმის წარმოქმნის კერაშივე ხმაურის შემცირებას, მით უფრო ადვილად იქნება შესაძლებელი ამ მეთოდის გამოყენებით მაქსიმალური ეფექტურობის მიღწევა. მაგალითად შეგვიძლია ავიღოთ მცირე ზომის კვადროკოპტერის საჰაერო ხრახნი ფრთოვანების მაქსიმალური რაოდენობით რომელიც მოთავსებულია აეროდინამიკურ არხში, ასეთი გადაწყვეტის შედეგად გამოცემული ხმაური საკმაოდ მცირე იქნება, თუმცა დამატებით ANC სისტემით აღჭურვის შემთხვევაში შესაძლებელია საერთოდ შეუმჩნეველიც გახდეს დამკვირვებლისათვის.

1.5 პირველი თავის დასკვნები

- გაანალიზებული იქნა საჰაერო ხრახნი, მისი სტრუქტურა და პარამეტრები. შესწავლილი იქნა ხრახნთა ძირითადი ტიპები და დადგინდა მათი დადებითი და უარყოფითი თვისებები.
- განხილული იქნა თანამედროვე საჰაერო ხრახნებში არსებული პრობლემური საკითხები და მათი წარმოშობის მიზეზები. გაანალიზდა ფრთოვანების ბოლოში ჰაერის დაგრიგალება და ამით მიღებული უარყოფითი შედეგები.
- გაანალიზდა თანამედროვე საჰაერო ხრახნების ხმაურის პრობლემური საკითხი. განხილული იქნა მისი შემცირების არსებული გზები და შეირჩა ამ პრობლემის შემცირების კვლევისთვის ყელაზე მისაღები ტექნოლოგია.

თავი II. საჰაერო ხრახნების პროექტირება და გამოთვლითი სიმულაციური მეთოდების ანალიზი

2.1. სითხეთა დინამიკის მათემატიკური მოდელების ანალიზი

სითხეების და აირების მოძრაობას შეისწავლის ჰიდროდინამიკა, სითხისა და აირის დინამიკის მათემატიკური მოდელირება იწყება ექსპერიმენტებით, მოცემული სითხის რეოლოგიური კანონის დადგენით. მაგალითად ნიუტონისეული სითხეებისათვის გვაქვს ნიუტონის განზოგადებული რეოლოგიური კანონი[2]:

$$\sigma_{ij} = B_{ijmn} D_{mn} ; \quad (2.1.1)$$

სადაც $D_{mn} = \epsilon_{mn}$ დეფორმაციის სიჩქარის ტენზორის კომპონენტებია. თუ სითხე ერთგვაროვანია, მაშინ B_{ijmn} მუდმივი სიდიდეებისაგან შედგება, რომლებიც ახასიათებს მოცემული სითხის ბლანტ თვისებებს. თუ განვიხილავთ იზოტროპულ ნიუტონისეულ სითხეს, მუდმივათა მატრიცაში 81 კომპონენტიდან მხოლოდ ორი იქნება λ და μ დამოუკიდებელი [2]. აქედან გამომდინარე რეოლოგიურ კანონს ექნება სახე:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda^* D_{kk}\delta_{ij} + 2\mu^* D_{ij} ; \quad (2.1.2)$$

სადაც λ^* და μ^* - სითხის სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტებია.

საშუალო ნორმალური ძაბვის განტოლება შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$\frac{1}{3}\sigma_{ii} = -p + \frac{1}{3}(3\lambda^* + 2\mu^*)D_{ii} = -p + \chi^* D_{ii} ; \quad (2.1.3)$$

სადაც χ^* - სიბლანტის სივრცული კოეფიციენტია. თუ მივიღებთ სტოქსის პირობას და დავუშვებთ, რომ $\chi^*=0$ მაშინ მივიღებთ:

$$\frac{1}{3}\sigma_{ii} = -p ; \quad (2.1.4)$$

გამომდინარე აქედან ჰიდროსტატიკური წნევა ბლანტ სითხეში, წონასწორობის პირობებში, საშუალო ნორმალური ძაბვის ტოლია და მიმართულია სითხის შიგნით.

ამით აიხსნება სითხის წვეთის წონასწორობა სიბრტყეზე. ასეთ შემთხვევაში, თერმოდინამიკური წნევა მთლიანად განისაზღვრება მექანიკური სიდიდეებით [2].

კომპიუტერულ სიმულაციებში სითხეთა მოძრაობის მათემატიკურ მოდელთაგან ერთ-ერთი მნიშვნელოვანია მოდელი, რომლითაც ნავიე-სტოქსის განტოლების ამოხსნის მცდელობით და მიახლოებითი ამონახსნის მიხედვით გამოვლინდება ამ სითხის ან აირის და მათში მოძრავი ობიექტების მახასიათებლები და ერთმანეთთან ურთიერთქმედება.

2.1.1. ნავიე – სტოქს – დიუგემის განტოლება

ნავიე – სტოქს – დიუგემის განტოლების გააზრებისთვის განვიხილოთ ბლანტი სითხის მათემატიკური მოდელი იმ შემთხვევისათვის, როცა სითხური ეფექტები იმდენად უმნიშვნელოა, რომ შეიძლება უგულებელვყოთ [2].

თუ კინემატიკურ თანაფარდობებს:

$$D_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}); \quad (2.2.1)$$

შევიტანთ ნიუტონის (2.1.2) რეოლოგიურ განტოლებაში, მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= -p\delta_{ij} + \lambda^* \frac{1}{2}(v_{k,k} + v_{k,k}) + 2\mu^* \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}) = \\ &= -p\delta_{ij} + \lambda^* v_{k,k} \delta_{ij} + \mu^* (v_{i,j} + v_{j,i}). \end{aligned} \quad ; \quad (2.2.2)$$

მოძრაობის განტოლებას კოშის ფორმით:

$$\sigma_{ji,j} + \rho b_i = \rho \dot{v}_i; \quad (2.2.3)$$

თუ (2.2.2) განტოლებას შევიტანთ მოძრაობის (2.2.3) განტოლებაში, გვექნება:

$$\rho \dot{v}_i = -p_{,i} + \lambda^* v_{k,kj} \delta_{ij} + \mu^* (v_{i,jj} + v_{j,ji}) + \rho b_i; \quad (2.2.4)$$

საბოლოოდ კი იგი მიიღებს სახეს:

$$\rho \dot{v}_i = -p_{,i} + (\lambda^* + \mu^*) v_{j,ji} + \mu^* v_{i,jj} + \rho b_i; \quad (2.2.5)$$

ამ განტოლებას (2.2.5) ნავიე – სტოქს – დიუგემის განტოლება ეწოდება ბლანტი სითხეებისათვის.

2.2. კვლევისას გამოყენებული კომპიუტერული პროგრამების

ანალიზი

ვინაიდან კვლევა მიმდინარეობს ემპირიული მიდგომით რაც გულისხმობს ექსპერიმენტებისა და დაკვირვებების გზით კონკრეტული შედეგების დაფიქსირებას და მათ აღრიცხვას ამიტომ საშუალება უნდა გვქონოდა რომ ეს პროცესები შედარებით სწრაფად წარგვემართა ამიტომ საწყისი ეტაპისთვის ვარჩიეთ ექსპერიმენტებისა და გამოთვლების ძირითადი ნაწილი თანამედროვე კომპიუტერული ტექნოლოგიების კერძოდ სპეციალიზებული კომპიუტერული პროგრამების საშუალებით განგვეხორციელებინა. კვლევისთვის გამოვიყენეთ 3 ძირითადი კომპიუტერული პროგრამა, ესენია:

1. Dassault Systems Catia V5 R21
2. XFLR5
3. ANSYS 19.2

2.2.1. Dassault Systems Catia V5 R21

Dassault Systems Catia V5 R21 წარმოადგენს კომპიუტერულ საინჟინრო პროგრამას, რომელიც მოიცავს:

- CAD-computer-aided design - კომპიუტერის დახმარებით პროექტირება
- CAM-computer-aided manufacturing - კომპიუტერის დახმარებით წარმოება
- CAE-computer-aided engineering - კომპიუტერული ინჟინერია
- PLM-product lifecycle management - პროდუქტის სასიცოცხლო ციკლის მართვა
- 3D modeling - 3 განზომილებიანი მოდელირება

Catia V5-ს გააჩნია მრავალი პლატფორმა და მოდული უამრავი სახის საინჟინრო საკითხების გადასაწყვეტად, პროდუქტის პროექტირების ყველა ეტაპისთვის, იგი საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ ნაკეთობათა როგორც 2 განზომილებიან ასევე 3 განზომილებიან სივრცეში პროექტირება და მოვახდინოთ მათი ოპტიმიზება საწარმოო პროცესებისთვის.

პროგრამას გააჩნია რამდენიმე ტიპის 3 განზომილებიან სხეულთან მუშაობის შესაძლებლობა ესენია: solid body - სავსე სხეული, მოდელი საბოლოო სახით სწორედ ასეთი ტიპის სხეულად წარმოდგება; surfaces - ზედაპირები ანუ 3 განზომილებაში მოქცეული 2 განზომილებიანი სხეულები; 3D splines - 3 განზომილებიანი წირები; sketch - ესკიზები; subdivision surface - ქვეგანყოფილების ზედაპირებად ანუ არა პარამეტრული ძერწვადი ზედაპირები და სხვა. ასევე პროგრამა მოიცავს მცირე რაოდენობის გამოთვლით მოდულებს ნაკეთობის სიმტკიცის და სხვა სიმულაციური პარამეტრების დასათვლელად, ასევე შესაძლებელია საწარმოო პროცესების მართვა CAM კომპიუტერის დახმარებით წარმოების მოდულების გამოყენებით. ასე რომ აღნიშნული საშუალებების გამოყენებით Catia - ში თითქმის ნებისმიერი სირთულის ნაკეთობის პროექტირებაა, სასაზღვრო პირობების დადგენა, და საწარმოოდ მომზადება შესაძლებელი.

2.2.2. XFLR5

XFLR5 - წარმოადგენს 2 განზომილებიან აეროდინამიკური ანალიზის ხელსაწყოს, დაბალ რეინოლდსის რიცხვებზე ოპერირებად ფრთებისა და თვითმფრინავებისთვის. იგი შეიცავს:

- XFoil-ის (ინტერაქტიული პროგრამა ბგერამდელი იზოლირებული აეროდინამიკური პროფილების ანალიზისთვის) პირდაპირ და შებრუნებული აეროდინამიკური ანალიზის შესაძლებლობებს ანუ შესაძლებელია როგორც კონკრეტული აეროდინამიკური პროფილის პარამეტრების დადგენა ასევე სასურველი პარამეტრების მიხედვით პროფილის ოპტიმიზება
- ამწევი ხაზის თეორიაზე (Lifting Line Theory), გრიგალურ გისოსთა მეთოდზე (Vortex Lattice Method) და 3D პანელთა მეთოდზე (3D Panel Method) დაფუძნებულ ფრთის დაპროექტების და აეროდინამიკური ანალიზის შესაძლებლობებს.

XFLR5 - ის საშუალებით შესაძლებელია აეროდინამიკური პროფილის ამწევი ძალის და წინაღობის ძალის კოეფიციენტების დაანგარიშება შესაბამისი სიჩქარეებისთვის. ამისთვის აუცილებელია პროგრამაში აეროდინამიკური

პროფილი შევიტანოთ კოორდინატთა სისტემის სახით და მივუთითოთ შესაბამისი ფრენის სიჩქარე და რეინოლდსის რიცხვი. უნდა აღინიშნოს პროგრამის ხსენებული შეზღუდვები პროექტირების შესაძლებლობა, სადაც სასურველი კოეფიციენტების მისაღებად პროგრამა თავად ახდენს მიწოდებული აეროდინამიკური ფრთის პროფილის რედაქტირებას.

2.2.3. ANSYS Workbench 19.2

ANSYS Workbench 19.2 - წარმოადგენს სასრულ ელემენტთა მეთოდზე დაფუძნებულ გამოთვლით პროგრამას, სტრუქტურების, ელექტრონიკის ან მანქანათა კომპონენტების კომპიუტერული მოდელების სიმულაციისთვის რომ გაანალიზდეს მათი სიმტკიცე; ელასტიურობა; თერმოგამტარობა; ელექტრომაგნიტურობა; სითხეთა და აირთა მოძრაობა და სხვა. პროგრამის საშუალებით შესაძლებელი განისაზღვროს ნაკეთობის ან რაიმე პროდუქტის ქცევა რეალურ გარემოში განსხვავებული პირობებით, მისი ფიზიკური გამოცდების გარეშე. მაგალითად შეიძლება განისაზღვროს წლების განმავლობაში როგორ შეინარჩუნებს მდგრადობას რომელიმე შენობა ნაგებობა ან თუნდაც რა სახის ამწევ ძალას მივიღებთ კონკრეტული საჰაერო ხრახნის გარკვეულ სიჩქარეებზე დატრიალებით.

Ansys-ის სამუშაო გარემო წარმოადგენს მრავალი საპროექტო, მეშის მაკონტროლებელი და გამოთვლითი მოდულისა და ქვემოდულისგან შემდგარ სისტემას, სიმულაციები ძირითადად ტარდება ერთგვარ სამუშაო მაგიდაზე, სადაც შესაძლებელია Ansys-ის სასურველი მოდულების გადატანა, მათი ერთმანეთთან საჭიროებისამებრ დაკავშირება, კომპიუტერული გამოთვლები ჩატარება და მიღებული შედეგების გაცნობა.

Ansys-ის მრავალ მოდულთაგან ჩვენი კვლევისთვის საინტერესოა, მისი (fluid flow) Fluent მოდული, რომელიც პროგრამაში შემავალ CFD (Computational Fluid Dynamics-გამოთვლითი სითხეთა დინამიკა) მოდულთაგან ერთ-ერთს წარმოადგენს. თავად “CFD გამოთვლითი სითხეთა დინამიკა” წარმოადგენს რთული ჰიდრო და აეროდინამიკური დავალებების კომპიუტერული მეთოდებით

ამოხსნის საშუალებას. თავად ეს მეთოდები დაფუძნებულია სხვადასხვა სახის რიცხვით მეთოდზე, რომელთა მეშვეობითაც ხორციელდება რთული დიფერენციალური განტოლებების მიახლოებით ამოხსნა. მაგალითად ნავიე-სტოკსის განტოლება, ვინაიდან ამ განტოლებათა სისტემის ზუსტი ამონახსნი არ არსებობს, გამოიყენება სხვადასხვა სახის ტურბულენტური მოდელი, რომელთა ექსპერიმენტებით მიღებული პარამეტრების მეშვეობით, ხორციელდება ნავიე-სტოკსის განტოლებათა მიახლოებითი პასუხის მოძიება. CFD-ის მუშაობის პრინციპი შემდეგია სიმულაციების განსახორციელებლად, სისტემა იყოფა სასრულ მოცულობების ელემენტებიან ზადედ, ამის შემდეგ ხდება სისტემაში მიმდინარე ფიზიკური ან ქიმიური პროცესების აღწერა, შემდეგ მიეთითება სითხის მახასიათებლები და სასაზღვრო პირობები. ამ სახით მოცემულ სისტემაზე, შესაძლებელია განხორციელდეს ძირითადი განტოლებების ინტეგრირება სისტემის ყველა ელემენტზე, შემდეგ ხდება მიღებული ინტეგრალური განტოლებების ალგებრულ განტოლებების სისტემად გარდაქმნა - დისკრეტიზება და ბოლოს ამ ალგებრული განტოლებათა სისტემების იტერაციული მეთოდებით ამოხსნა.

გადატანის განტოლებები, სიჩქარის თითოეული კომპონენტისთვის (იგივე იმპულსის განტოლებები) შეიძლება გადატანის ძირითადი განტოლებიდან იწარმოოს. თითოეული სიჩქარის კომპონენტი სხვა დანარჩენი კომპონენტების იმპულსის განტოლებებშიც იჩენს თავს და ამავდროულად, სიჩქარის ველმა ასევე უნდა დააკმაყოფილოს უწყვეტობის განტოლება [2].

ეს მარტივად შეიძლება ვაჩვენოთ 2-გამზომილებიანი ლამინარული დინების ძირითადი განტოლებებით:

- x -იმპულსის მდგენელის განტოლება

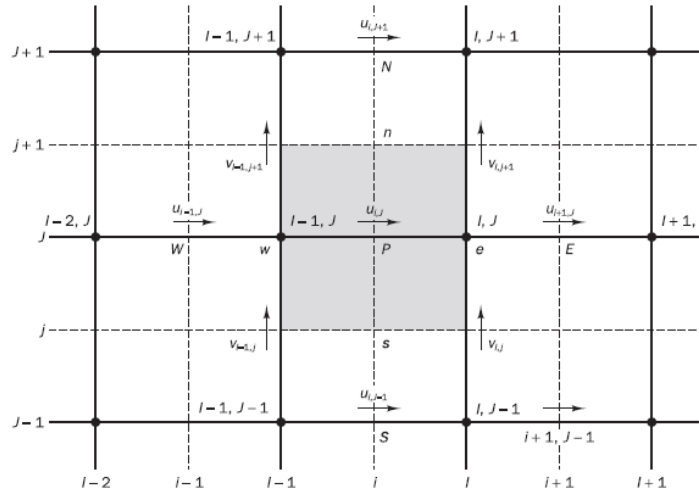
$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vu) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u$$
 ; (2.3.1)

- y -იმპულსის მდგენელის განტოლება

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v$$
 ; (2.3.2)

- უწყვეტობის განტოლება

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0$$
 ; (2.3.3)



ნახ. 2.1 სასრულ მოცულობათა ბადე, 2 განზომილებიანი დინების u სიჩქარის კომპონენტისათვის

ზემოთ აღნიშნული იტერაციები მეტნაკლებად საერთოა Ansys-ის CFD მოდულთათვის თუმცა კვლევისთვის საჭირო სიმულაციები ძირითადად ტარდებოდა Fluent მოდულში SIMPLE ალგორითმის გამოყენებით.

აბრევიატურა SIMPLE წარმოდგება, როგორც „Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations“ - „ნახევრად იმპლიციტური მეთოდი, წნევასთან დაკავშირებული განტოლებებისათვის“. ალგორითმი წარმოადგენს სასრულ ელემენტთა ბადისთვის, წნევას გამოსათვლელ გამოცნობა-შესწორების ტიპის პროცედურას.

SIMPLE ალგორითმით გაანგარიშების პროცესის დასაწყებად, საჭიროა წნევას ველი p^* -ს წინასწარი ვარაუდი. დისკრეტიზებული იმპულსის განტოლებები (2.3.1) და (2.3.2) ითვლებიან ნავარაუდები წნევას ველის მიერ, სიჩქარის u^* და v^* კომპონენტების მისაღებად [2] (მეთოდი განვიხილოთ 2 განზომილებიანი ლამინარული დინების განტოლებებისათვის):

$$a_{i,j}u_{i,j}^* = \sum a_{nb}u_{nb}^* + (p_{i-1,j}^* - p_{i,j}^*)A_{i,j} + b_{i,j} ; \quad (2.3.4)$$

$$a_{i,j}v_{i,j}^* = \sum a_{nb}v_{nb}^* + (p_{i,j-1}^* - p_{i,j}^*)A_{i,j} + b_{i,j} ; \quad (2.3.5)$$

სადაც, I, J -თ აღნიშნება ელემენტთა საზღვრები, ხოლო i, j -თ ელემენტთა შიდა მნიშვნელობები ნახ. 1. შემდეგ, განისაზღვრება წნევის შესწორება pp' , რაც არის

შესწორებულ წნევათა ველის p -სა და ნავარაუდევ წნევათა ველს p^* -ს შორის სხვაობა:

$$p = p^* + p'; \quad (2.3.6)$$

ანალოგიურად, განისაზღვრება სიჩქარეების შესწორებები u' და v' , შესწორებული სიჩქარეების u და v -ს, ნავარაუდევ სიჩქარეებთან u^* და v^* -თან დასაკავშირებლად:

$$\begin{aligned} u &= u^* + u' \\ v &= v^* + v'; \end{aligned} \quad (2.3.7)$$

შესწორებული წნევათა ველის p -ს, იმპულსის განტოლებაში ჩანაცვლებით, ვიღებთ შესწორებულ სიჩქარის ველს (u, v) . დისკრეტული იმპულსის განტოლებები აკავშირებენ შესწორებულ სიჩქარის ველს, შესწორებულ წნევის ველთან.

(2.3.4) და (2.3.5) განტოლებების დისკრეტული იმპულსის განტოლებებიდან გამოკლებით, მივიღებთ:

$$\begin{aligned} a_{i,j}(u_{i,j} - u_{i,j}^*) &= \\ \Sigma a_{nb}(u_{nb} - u_{nb}^*) + [(P_{I-1,j} - P_{I-1,j}^*) - (p_{I,j} - p_{I,j}^*)]A_{i,j}; \end{aligned} \quad (2.3.8)$$

$$\begin{aligned} a_{I,j}(v_{I,j} - v_{I,j}^*) &= \\ \Sigma a_{nb}(v_{nb} - v_{nb}^*) + [(P_{I,j-1} - P_{I,j-1}^*) - (p_{I,j} - p_{I,j}^*)]A_{I,j}; \end{aligned} \quad (2.3.9)$$

შესწორებული ფორმულების (2.3.7) მიხედვით, (2.3.8) და (2.3.9) განტოლებები შემდეგნაირად გადაიწეროს:

$$a_{i,j}u'_{i,j} = \Sigma a_{nb}u'_{nb} + (p'_{I-1,j} - p'_{I,j})A_{i,j}; \quad (2.3.10)$$

$$a_{I,j}v'_{I,j} = \Sigma a_{nb}v'_{nb} + (p'_{I,j-1} - p'_{I,j})A_{I,j}; \quad (2.3.11)$$

გამოთვლების ამ ეტაპზე, ხდება მიახლოების შემოტანა: ხდება $\Sigma a_{nb}u'_{nb}$ და $\Sigma a_{nb}v'_{nb}$ წევრების ჩამოშორება, სიჩქარის შესწორებების განტოლებების გასამარტივებლად. ამ წევრების მოშორება, არის SIMPLE ალგორითმის მთავარი მიახლოება. შედეგად ვიღებთ:

$$u'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{I-1,j} - p'_{I,j}); \quad (2.3.12)$$

$$v'_{I,j} = d_{I,j}(p'_{I,j-1} - p'_{I,j}); \quad (2.3.13)$$

$$\text{სადაც } d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}} \text{ და } d_{l,j} = \frac{A_{l,j}}{a_{l,j}} ; \quad (2.3.14)$$

(2.3.12) და (2.3.13) განტოლებები აღწერს იმ შესწორებებს, რომლებიც უნდა მიეთითოს (2.3.7) ფორმულებში, რაც იძლევა:

$$u_{i,j} = u_{i,j}^* + d_{i,j}(p'_{l-1,j} - p'_{l,j}) ; \quad (2.3.15)$$

$$v_{l,j} = v_{l,j}^* + d_{l,j}(p'_{l,j-1} - p'_{l,j}) ; \quad (2.3.16)$$

იგივენაირი გამოსახულება არსებობს $u_{i+1,j}$ და $v_{l,j+1}$ -სთვის:

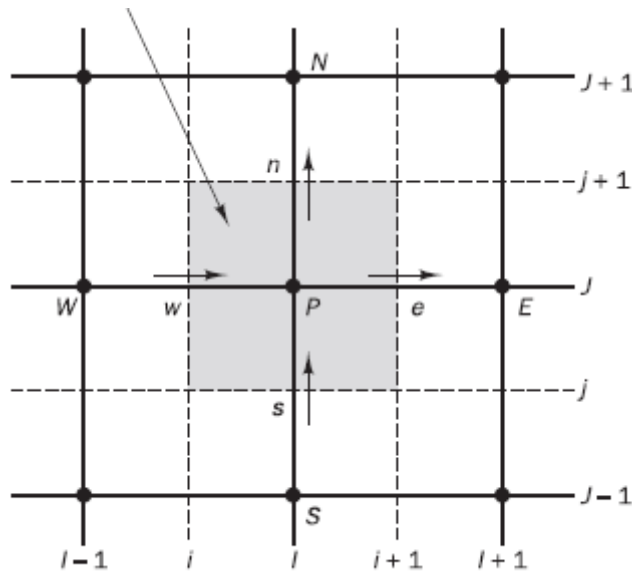
$$u_{i+1,j} = u_{i+1,j}^* + d_{i+1,j}(p'_{l,j} - p'_{l+1,j}) ; \quad (2.3.17)$$

$$v_{l,j+1} = v_{l,j+1}^* + d_{l,j+1}(p'_{l,j} - p'_{l,j+1}) ; \quad (2.3.18)$$

$$\text{სადაც } d_{i+1,j} = \frac{A_{i+1,j}}{a_{i+1,j}} \text{ და } d_{l,j+1} = \frac{A_{l,j+1}}{a_{l,j+1}} ; \quad (2.3.19)$$

აქამდე, განხილული იყო მხოლოდ იმპულსის განტოლებები, მაგრამ როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, სიჩქარის ველი ასევე უნდა აკმაყოფილებდეს უწყვეტობის განტოლებას. უწყვეტობა დაკმაყოფილებულია დისკრეტიზებული ფორმით, სკალარული მოცულობისთვის ნახ. 2.2.2 ზე [2]:

$$[(\rho u A)_{i+1,j} - (\rho u A)_{i,j}] + [(\rho v A)_{l,j+1} - (\rho v A)_{l,j}] = 0, \quad (2.3.20)$$



ნახ.2.2 სკალარული მოცულობა, უწყვეტობის განტოლების დისკრეტიზებისთვის

შესწორებული სიჩქარეების განტოლებების (2.3.17), (2.3.18) დისკრეტიზებულ უწყვეტობის განტოლებაში (2.3.20) შეტანით, ვიღებთ:

$$\begin{aligned} & \left[\rho_{i+1,J} A_{i+1,J} \left(u_{i+1,J}^* + d_{i+1,J} (p'_{i,J} - p'_{i+1,J}) \right) \right. \\ & \quad \left. - \rho_{i,J} A_{i,J} \left(u_{i,J}^* + d_{i,J} (p'_{i-1,J} - p'_{i,J}) \right) \right] \\ & \quad + \left[\rho_{i,J+1} A_{i,J+1} \left(v_{i,J+1}^* + d_{i,J+1} (p'_{i,J} - p'_{i,J+1}) \right) \right. \\ & \quad \left. - \rho_{i,J} A_{i,J} \left(v_{i,J}^* + d_{i,J} (p'_{i,J-1} - p'_{i,J}) \right) \right] = 0 \quad ; \quad (2.3.21) \end{aligned}$$

ეს განტოლება შეგვიძლია გადავაწყოთ შემდეგნაირად:

$$\begin{aligned} & [(\rho dA)_{i+1,J} + (\rho dA)_{i,J} + (\rho dA)_{i,J+1} + (\rho dA)_{i,j}] p'_{i,J} = \\ & (\rho dA)_{i+1,J} p'_{i+1,J} + (\rho dA)_{i,j} p'_{i-1,J} + (\rho dA)_{i,J+1} p'_{i,J+1} \\ & \quad + (\rho dA)_{i,j} p'_{i,J-1} \\ & \quad + [(\rho u^* A)_{i,j} - (\rho u^* A)_{i+1,J} + (\rho v^* A)_{i,j} \\ & \quad - (\rho v^* A)_{i,j+1}] \quad ; \quad (2.3.22) \end{aligned}$$

p' -ს კოეფიციენტების გამოტანით, განტოლება შეიძლება შემდეგნაირად ჩაიწეროს:

$$\begin{aligned} a_{i,j} p'_{i,j} &= a_{i+1,J} p'_{i+1,J} + a_{i-1,J} p'_{i-1,J} \\ & \quad + a_{i,J+1} p'_{i,J+1} + a_{i,J-1} p'_{i,J-1} + b'_{i,j} \quad ; \quad (2.3.23) \end{aligned}$$

სადაც, $a_{i,j} = a_{i+1,J} + a_{i-1,J} + a_{i,J+1} + a_{i,J-1}$ და კოეფიციენტები მოცემულია ცხრილში:

ცხრ.2.1 $a_{i,j} = a_{i+1,J} + a_{i-1,J} + a_{i,J+1} + a_{i,J-1}$ და კოეფიციენტები

$a_{i+1,J}$	$a_{i-1,J}$	$a_{i,J+1}$	$a_{i,J-1}$	$b'_{i,j}$
$(\rho dA)_{i+1,J}$	$(\rho dA)_{i,J}$	$(\rho dA)_{i,j+1}$	$(\rho dA)_{i,j}$	$(\rho u^* A)_{i,j} - (\rho u^* A)_{i+1,J} + (\rho v^* A)_{i,j} - (\rho v^* A)_{i,j+1}$

განტოლება (2.3.22) ასახავს დისკრეტიზებულ უწყვეტობის განტოლებას, როგორც წნევათა შესწორების p' განტოლებას. b' წევრი ამ განტოლებაში, აღნიშნავს უწყვეტობის დისბალანსს, რომელიც წარმოიქმნება არათანაბარი სიჩქარის u^* , v^* ველისგან. განტოლების ამოხსნით, შესაძლებელია მივიღოთ p' წნევის შესწორება ყველა წერტილზე. მას შემდეგ, რაც წნევათა შესწორების ველი ნაპოვნი იქნება, შესაძლებელი ხდება ვიპოვოთ შესწორებული წნევები (2.3.6) ფორმულისა და სიჩქარის კომპონენტები (2.3.15) და (2.3.18) ფორმულების მეშვეობით. გამოთვლისას

$\Sigma a_{nb} u'_{nb}$ წევრის გამოტოვება საბოლოოდ მიღებულ შედეგზე დიდ ზეგავლენას არ ახდენს, რადგან წნევისა და სიჩქარის შესწორებები გამოთვლების დასასრულს 0-ს ტოლი იქნება.

წნევის შესწორების განტოლება მგრძნობიარეა გალევასთან მიმართებით მანამ, სანამ რაიმე ქვე-რელაქსაცია არ იქნება გამოყენებული იტერაციული პროცესის დროს და ახალი, გაუმჯობესებული წნევა p^{new} იქნება მიღებული:

$$p^{new} = p^* + \alpha_p p' ; \quad (2.3.24)$$

სადაც, α_p არის წნევის ქვე-რელაქსაციის ფაქტორი. თუ ჩავთვლით რომ α_p უდრის 1-ს, ნავარაუდები წნევითა ველი p^* შესწორდება მხოლოდ p' -თ. თუმცა, შესწორებები p' , როდესაც ნავარაუდები ველი p^* ჯერ კიდევ შორსაა საბოლოო ამონახსნამდე, ხშირ შემთხვევაში ძალიან დიდია სტაბილური გათვლის საწარმოებლად. α_p -ს ნულოვანი მნიშვნელობა მიუღებელია, რადგან ამ შემთხვევაში საერთოდ არ გვექნება შესწორებები.

α_p -ს მნიშვნელობა, რომელიც 0-დან 1-ს შუალედში იქნება მოქცეული, მოგვცემს:

$$u^{new} = \alpha_u u + (1 - \alpha_u) u^{(n-1)} ; \quad (2.3.25)$$

$$v^{new} = \alpha_v v + (1 - \alpha_v) v^{(n-1)} ; \quad (2.3.26)$$

$$\begin{aligned} \frac{a_{i,j}}{\alpha_u} u_{i,j} &= \\ &= \Sigma a_{nb} u_{nb} + (p_{I-1,j} - p_{I,j}) A_{i,j} + b_{i,j} + \left[(1 - \alpha_u) \frac{a_{i,j}}{\alpha_n} \right] u_{i,j}^{(n-1)} ; \end{aligned} \quad (2.3.27)$$

$$\begin{aligned} \frac{a_{I,j}}{\alpha_v} u_{I,j} &= \\ &= \Sigma a_{nb} v_{nb} + (p_{I,j-1} - p_{I,j}) A_{I,j} + b_{I,j} + \left[(1 - \alpha_v) \frac{a_{I,j}}{\alpha_v} \right] v_{I,j}^{(n-1)} ; \end{aligned} \quad 2.3.28)$$

SIMPLE ალგორითმი, წნევისა და სიჩქარეების გამოთვლის ერთ-ერთი იტერაციული ხასიათის მეთოდია და როდესაც სხვა სკალარები დაწყვილებულეები არიან იმპულსის განტოლებასთან, გამოთვლები უნდა განხორციელდეს თანმიმდევრულად. თანმიმდევრობა, რომლითაც **SIMPLE** ალგორითმი მუშაობს **CFD** გათვლების დროს, წარმოდგენილია ნაზ.2.2.3 -ზე.

$$u_{i,J} = \frac{\sum a_{nb} u_{nb} + b_{i,J}}{a_{i,J}} + \frac{A_{i,J}}{a_{i,J}} (p_{I-1|J} - p_{I,J}) ; \quad (2.3.29)$$

$$v_{I,j} = \frac{\sum a_{nb} v_{nb} + b_{I,j}}{a_{I,j}} + \frac{A_{I,j}}{a_{I,j}} (p_{I,J-1} - p_{I,J}) ; \quad (2.3.30)$$

$$\hat{u}_{i,J} = \frac{\sum a_{nb} u_{nb} + b_{i,J}}{a_{i,J}} ; \quad (2.3.31)$$

$$\hat{v}_{I,j} = \frac{\sum a_{nb} v_{nb} + b_{I,j}}{a_{I,j}} ; \quad (2.3.32)$$

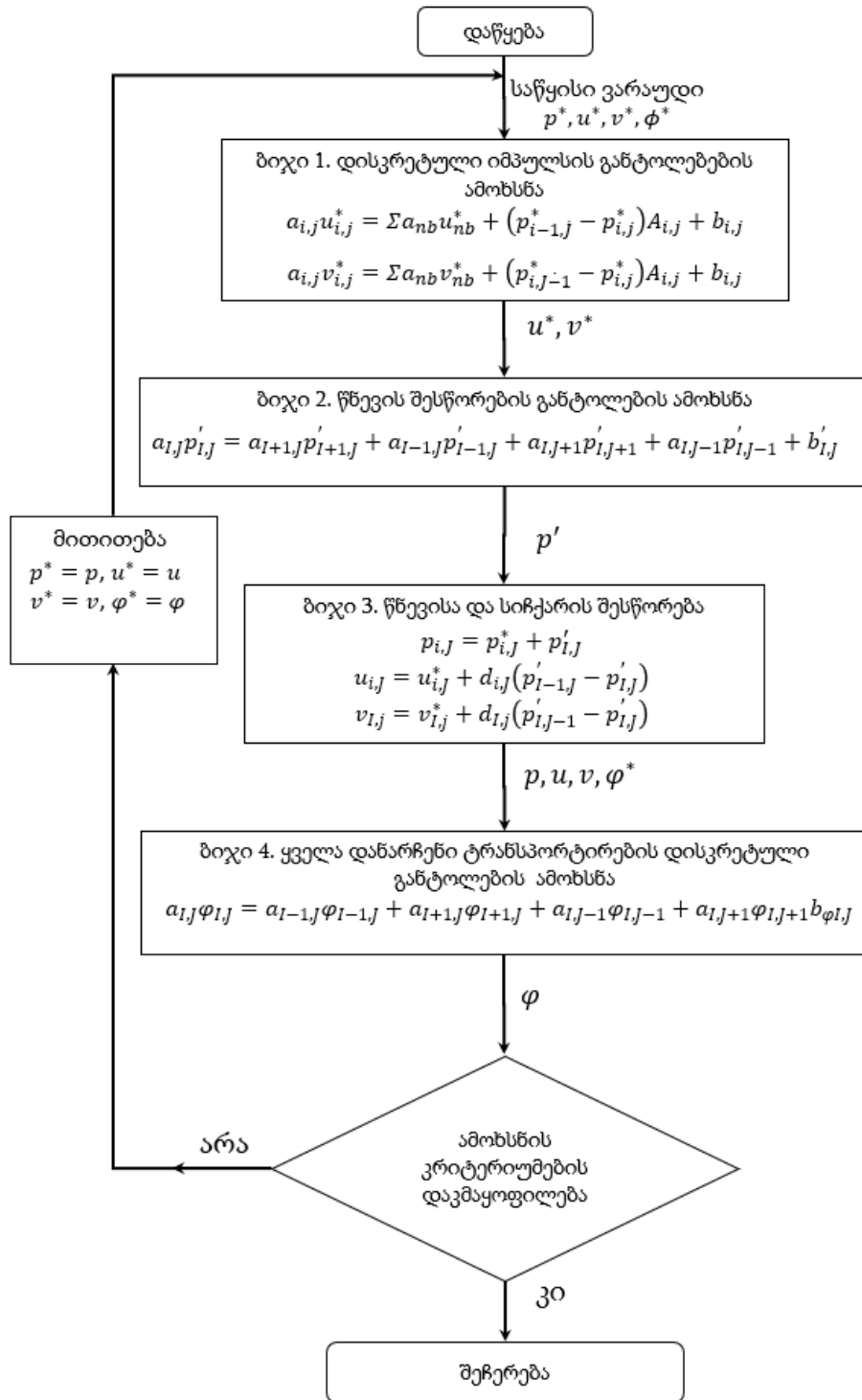
დახარვეზებული განტოლებები შემდეგნაირად გადაიწერება:

$$u_{i,J} = \hat{u}_{i,J} + d_{i,J} (p_{I-1,J} - p_{I,J}) ; \quad (2.3.33)$$

$$v_{I,j} = \hat{v}_{I,j} + d_{I,j} (p_{I,J-1} - p_{I,J}) ; \quad (2.3.34)$$

ტრანსპორტირების დისკრეტიზებული განტოლება:

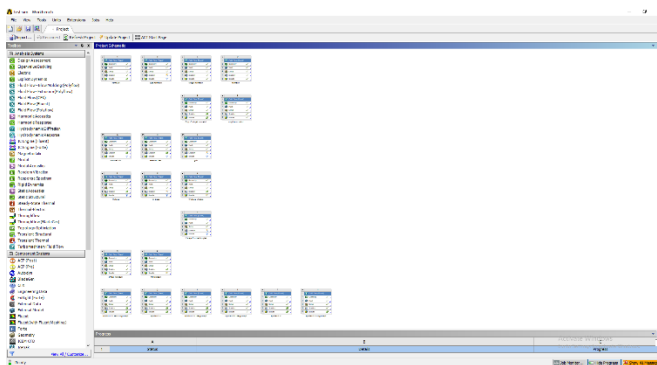
$$a_{I,J} \varphi_{I,J} = a_{I-1,J} \varphi_{I-1,J} + a_{I+1,J} \varphi_{I+1,J} + a_{I,J-1} \varphi_{I,J-1} + a_{I,J+1} \varphi_{I,J+1} b_{\varphi_{I,J}} ; \quad (2.3.35)$$



ნახ.2.3 SIMPLE ალგორითმის მუშაობის ბლოკ-სქემა

2.3. კომპიუტერული სიმულაციები

სასურველი მოდელის ვახდენთ მის კომპიუტერულ გამოთვლით საინჟინრო პროგრამა Ansys workbench-ისთვის მისაღებ ფორმატად კონვერტაციას. როგორც წესი Ansys workbench-ში შესაძლებელი მრავალი სახის 3 განზომილებიანი მოდელის ფორმატის აღქმა, თუმცა კვლევის განმავლობაში დაგროვილი გამოცდილებიდან გამომდინარე, ყველაზე სტაბილურ ასეთ ფორმატად მივიჩნიეთ stp ფორმატი, რომელიც ISO სტანდარტის მულტიპლატფორმული 3 განზომილებიანი მოდელის ფორმატია, და მისი სტრუქტურის (ინფორმაციის გაცვლის ამერიკული სტანდარტული კოდი — ASCII) გამო ადვილად აღქმადია დღესდღეობით არსებული უმეტესი CAD (კომპიუტერის დახმარებით პროექტირებადი) პროგრამებისთვის.



ნახ.2.4 Ansys Workbench 19.2 საწყისი გვერდი Project Schematic განყოფილებაში მოცემულია (fluid flow) fluent მოდულები ყველას საჭირო ხრახნისთვის რომლის სიმულაციაც მოვახდინეთ

კვლევის შემდგომ ეტაპს წარმოადგენს შემუშავებული მოდელის Ansys workbench-ის (fluid flow) fluent მოდულში (ნახ.2.4) შეტანა სადაც ამ მოდულის 3 განზომილებიანი მოდელების შესადგენი კომპონენტით ვახდენთ, სიმულაციისთვის საჭირო ნიუანსების დამატებას და შეტანას მოდელისთვის. ასეთი ნიუანსებია:

გარემოს მოცულობა სადაც საჭირო ხრახნის სიმულაცია მოხდება, ამისთვის უნდა შეიქმნას გარემოს სამგანზომილებიანი მოდელი, რომელსაც ექნება ჰაერის მიმწოდებელი და გამშვები სექციები, ეგრეთ წოდებული inlet-ი და outlet-ი, ჩვენს

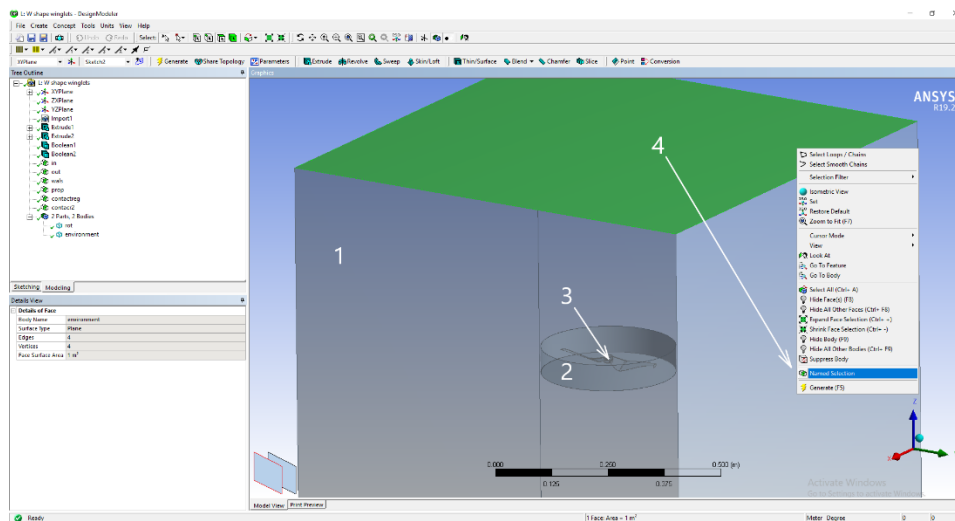
შემთხვევაში გარემოს ამ მოდელს წარმოადგეს ოთხკუთხა პრიზმა 10/10/50 სიგრძე/სიგანე/სიმაღლე პარამეტრებით.

უნდა განისაზღვროს საჰაერო ხრახნის როტაციული ზონა, ანუ გარემოს გარკვეული ნაწილი (ნახ.2.5), სადაც ჰაერი იმოძრაებს წრიულად გარკვეული ბრუნთა სიჩქარით, ამის საჭიროება, გამომდინარეობს იქიდან, რომ თავად საჰაერო ხრახნის მეშის (სასრულ ელემენტთა ბადის) დატრიალება ansys-ში დიდ სირთულეებთან არის დაკავშირებული და გამოთვლების დროს ძალზედ ზრდის. ჰაერის ხრახნის გარშემო დატრიალებით, კი სიმულაციის მომზადებისა და გამოთვლების პროცესი ერთიორად მარტივდება და გაცილებით ნაკლებ დროს მოითხოვს. ამასთან, გამოთვლების სიზუსტე და კომპეტენტურობა არ იკლებს. როტაციის ზონისთვის გარემოში, ათვლის ცენტრის გარშემო სადაც საჰაერო ხრახნის მოდელია მოთავსებული, შემოგვაქვს ცილინდრული სხეული, ჩვენს შემთხვევაში ამ ცილინდრის პარამეტრები შემდეგია: ცილინდრის სიმაღლე არის დაახლოებით 400% საჰაერო ხრახნის მაქსიმალური სიმაღლისა Z ღერძის გასწვრივ და ცილინდრის დიამეტრი უდრის დაახლოებით 150 % საჰაერო ხრახნის დიამეტრისა. როტაციის ზონაში ისე უნდა მოთავსდეს საჰაერო ხრახნის მოდელი რომ მათი ცენტრალური წერტილები (მასათა ცენტრი) ერთმანეთ ემთხვეოდეს და მაქსიმალურად თანაბარი დაშორება იყოს ცილინდრის კედლებსა და საჰაერო ხრახნს შორის. ბრუნვა სრულდება Z ღერძის გარშემო ჰაერის ნაკადის მიმართულება არის -Z.

ზემოთხსენებული სამუშაოების შემდეგ უნდა ჩატარდეს “boolean”- მოცულობათა გამოკლების ოპერაციები, ანუ გარემოს მოცულობას უნდა გამოაკლდეს როტაციის ზონის სივრცული მოცულობა და როტაციის ზონის მოცულობას უნდა მოაკლდეს საჰაერო ხრახნის სივრცული მოცულობა (ნახ.7.2). ამის შედეგად უნდა დაგვრჩეს მხოლოდ ორი სოლიდური სხეული, რომლებიც მოგვიანებით მეშით შეივსება და წარმოდგება გარემოს და როტაციულ ზონებად. გამოთვლები ჩატარდება მხოლოდ ამ 2 ზონაში. ასევე უმჯობესია აქვე განისაზღვროს ზედაპირები, რომლებსაც შემდგომ გამოთვლებისას სასაზღვრო

პირობებად გამოვიყენებთ. ეს ხდება “create named selection” ბრძანებით (ნახ.2.3.2). კვლევისას ვიყენებდით შემდეგ ზედაპირებს:

- Inlet-შესასვლელი
- Outlet-გამოსასვლელი
- საჰაერო ხრახნი
- როტაციის ზონის და გარემოს კონტაქტური რეგიონები
- გარემოს დანარჩენი არა იდენტიფიცირებული კედლები

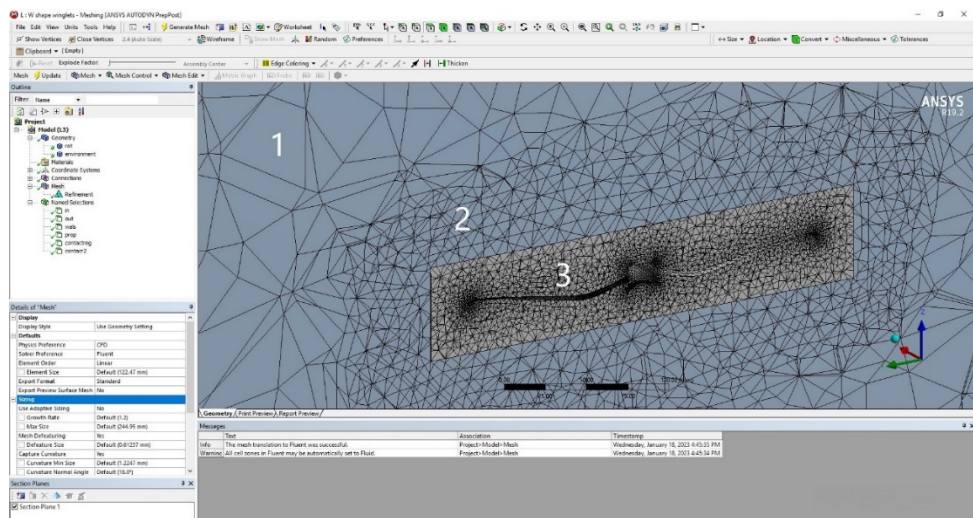


ნახ.2.5 Ansys design modeler-ში გეომეტრიის მომზადება სიმულაციისთვის სურათზე ვხედავთ: 1) გარემოს; 2) როტაციული ზონა; 3) საჰაერო ხრახნი; 4) named selection ბრძანება preasur inlet-ისთვის

ზოგადად, პრაქტიკიდან გამომდინარე, შეიძლება ითქვას, რომ უმჯობესია მომხმარებლის მიერვე იქნეს იდენტიფიცირებული მაქსიმალურად ყველა ზედაპირი, ვიდრე თავად გამომთვლელმა მოდულმა მოახდინოს მათი იდენტიფიცირება და არასწორი სასაზღვრო პირობა მიანიჭოს.

გეომეტრიის სათანადოდ მომზადების შემდგომ, საჭიროა მოხდეს ამ გეომეტრიაში სასრულ ელემენტთა ბადის აგება, რათა fluent-მა მოახდინოს გამოთვლების ჩატარება მასზე. ამ სასრულ ელემენტთა ბადეს “mesh” - მეშის სახით წარმოადგენენ, სიმულაციის წარმატებით დასრულებისთვის და გამოთვლების მაღალი სიზუსტისთვის სასრული ელემენტების ბადი სწორ განსაზღვრას გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს. მნიშვნელოვანია შესასრულებელი ამოცანიდან

გამომდინარე სწორად იქნეს არჩეული ზადის ტიპი (სასრული ელემენტების ფორმა), მაღალი სიზუსტისთვის მნიშვნელოვანია საჭირო ადგილებში გამოყენებული იყოს მცირე ზომის სასრული ელემენტები (ანუ საპასუხისმგებლო ადგილებში გამოვიყენოთ წმინდა მეში და პირიქით), ასევე მნიშვნელოვანია მოსაზღვრე სასრულ ელემენტებს შორის არ იყო ზომებში მკვეთრი სხვაობები, ამისთვის გამოვიყენეთ საჰაერო ხრახნისა და როტაციის ზონის გარშემო ზადის “დაგლუვების” - mesh refinement ფუნქცია (ნახ.2.6), რის მეშვეობითაც მივიღეთ გლუვი გადასვლა როტაციის ზონის წმინდა მეშიდან გარემოს უხემ მეშხე. სასრულ ელემენტთა ზადის მომზადების შემდეგ შესაძლებელია დავიწყოთ სიმულაციის მომზადება.



ნახ.2.6 სასრულ ელემენტთა ზადის მომზადება Mesh editor-ით: 1. სასრულ ელემენტთა ზადე გარემოსთვის შედარებით მსხვილი; 2. Refinement- გარდამავალი ზონა წვრილი ზადიდან გარემოს მსხვილ ზადეში; 3. როტაციის ზონის და საჰაერო ხრახნის წვრილი-წმინდა სასრულ ელემენტთა ზადე

უნდა აღინიშნოს, რომ საჰაერო ხრახნთა ყველა მოდელის სიმულაცია მოვახდინეთ ერთნაირ პირობებში: საჰაერო ხრახნის გამოსაცდელი გარემო და როტაციული ზონა ერთნაირი იყო ყველა შემთხვევაში; სასაზღვრო ზედაპირები მითითებული იყო ერთნაირად; სასრულ ელემენტთა ზადე აგებული იყო საერთო პარამეტრებით: სასრული ელემენტის ზომა მინიმუმ 0.5 მმ მაქსიმუმ 100მმ (ნახ.2.6), სასრული ელემენტის ტიპი პოლიჰიდრული, refinement ზონის კოეფიციენტი 1.

2.3.1. სიმულაციის მომზადება და მიმდინარეობა

საჭაერო ხრახნების კომპიუტერული სიმულაციისთვის Ansys Workbench-ის CFD - გამოთვლითი სითხეთა მოძრაობის მოდულთაგან ერთ-ერთი ყველაზე სანდო და გავრცელებული მოდულია (Fluid flow) Fluent-ი [13], ამიტომ გადაწყდა კვლევისათვის საჭირო ჰიდროდინამიკური სიმულაციები ამ მოდულში განხორციელებულიყო.

ზემოთ განხილული პროცესების შემდეგ, რაც კომპიუტერული გამოთვლებისათვის საჭირო სასრულ ელემენტთა ბადე გვექნება, შეგვიძლია დავიწყოთ სიმულაციის მომზადება (Setup-ი): Fluent-ში შესვლის შემდეგ, პირველ რიგში, უნდა ავირჩიოთ სიმულაციის ტიპი, ანუ ეს იქნება steady (დროის განზომილების გარეშე) თუ transient (დროის გარკვეულ მონაკვეთში გაწერილი) სიმულაცია. ჩვენ ავირჩიეთ სიმულაციისთვის steady ტიპი ვინაიდან ამ ტიპის სიმულაციას სჭირდება გაცილებით ნაკლები დრო ვიდრე transient-ს და მიღებული შედეგები ერთმანეთისგან დიდად არ განსხვავდება. სიმულაციის transient ტიპის გამოყენება უმჯობესია მაშინ, როდესაც გვინტერესებს რაიმე პროცესის დროში მიმდინარეობა, ჩვენ შემთხვევაში კი გვინტერესებდა მხოლოდ შედეგი. სიმულაციის ტიპის არჩევის შემდეგ ვუთითებთ გრავიტაციის მახასიათებელს შესაბამისი საკოორდინატო ღერძის გასწვრივ და ვირჩევთ გამოთვლით მოდელს. ჩვენი კვლევისთვის ვიყენებთ K-epsilon ტურბულენტურ მოდელს (ნახ.2.6), რომელიც ერთ-ერთი გავრცელებულია გამოთვლით ჰიდროდინამიკაში (CFD) ჰაერის ან სითხის პარამეტრების დახასიათებისთვის მათი ტურბულენტური მოძრაობისას[13], იგი წარმოადგენს 2 განტოლებიან მოდელს, რომელიც გვამღვეს სითხის ტურბულენტობის ზოგად დახასიათებას 2 ტრანსპორტირების განტოლებიდან გამომდინარე: პირველი ტრანსპორტირებული ცვლადი არის ტურბულენტური კინეტიკური ენერჯია turbulent kinetic energy (k); მეორე ტრანსპორტირებულ ცვლადს კი წარმოადგენს ტურბულენტური კინეტიკური ენერჯიის გაფანტვის სიხშირე rate of dissipation of turbulent kinetic energy (ϵ).

ეს განტოლებები შემდეგნაირად ჩაიწერება:

ტურბულენტური კინეტიკური ენერჯისთვის (turbulent kinetic energy) (k) ექნება სახე:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon ; \quad (2.4.1)$$

ხოლო გაფანტვისთვის (dissipation) (ϵ) კი ექნება შემდეგი სახე:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} ; \quad (2.4.2)$$

სადაც:

- u_i არის სიჩქარის კომპონენტი შესაბამისი მიმართულებით
- E_{ij} წარმოადგენ დეფორმაციის კომპონენტის სიხშირეს
- μ_t - წარმოადგენს eddy სიბლანტეს (ტურბულენტობის შესაფასებელი კრიტერიუმი) და გამოისახება შემდეგნაირად:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} ; \quad (2.4.3)$$

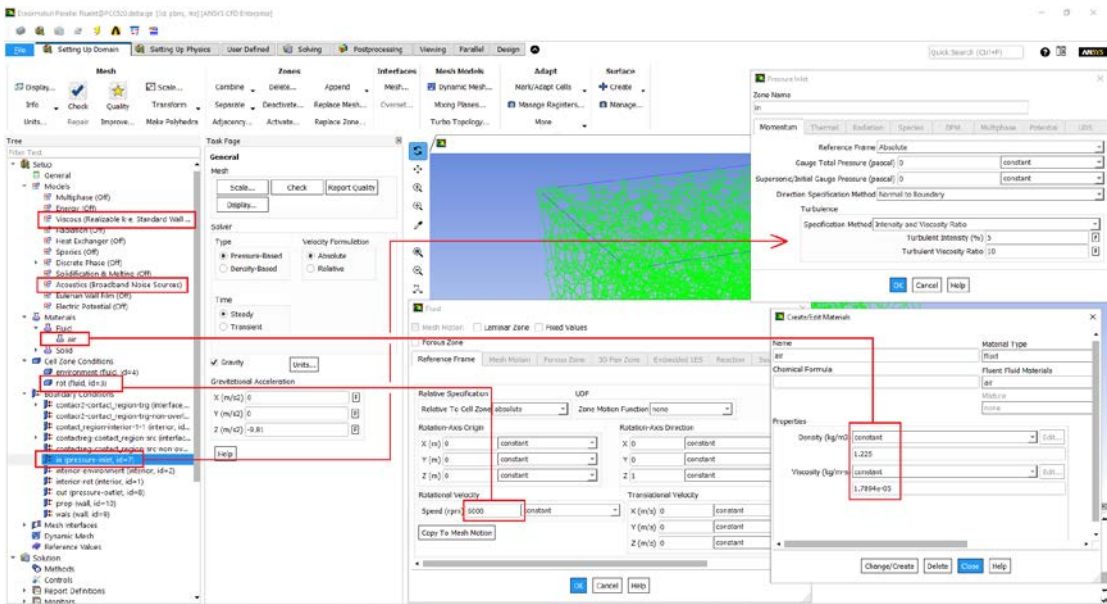
განტოლება ასევე მოიცავს რამდენიმე რეგულირებად მუდმივებს: σ_k ; σ_ϵ ; $C_{1\epsilon}$; $C_{2\epsilon}$ ამ მუდმივათა მნიშვნელობები გამომდინარეობს დიდი ოდენობის ტურბულენტურ დინებათა მონაცემთა საშუალო მრუდის (data fitting) იტერაციული ანალიზებიდან, და მოცემულია შემდეგი სახით:

$$C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.00 \quad \sigma_\epsilon = 1.30 \quad C_{1\epsilon} = 1.44 \quad C_{2\epsilon} = 1.92$$

ტურბულენტობის მოდელის არჩევის შემდგომ, სურვილისამებრ, შეგვიძლია ავირჩიოთ მოდელი აკუსტიკური გამოთვლებისათვის ხმაურის მნიშვნელობის დასადგენად. ჩვენი კვლევისთვის ვიყენებთ “ხმაურის ფართოხოლოვანი წყაროების” მოდელს (broadband noise sources) (ნახ.2.7), აღნიშნული მოდელი თავსებადია steady-state სიმულაციის ტიპთან და მარტივად ითვლის სიმულაციისას გამოთვლილი პარამეტრებიდან ხმაურის საწყის კერებში მის მნიშვნელობას. უნდა აღინიშნოს, რომ broadband noise sources მოდელის მეშვეობით არ არის ხმის გავრცელების პროგნოზირება შესაძლებელი და იგი მხოლოდ ხმაურის წყაროებს გვიჩვენებს, ანუ ხმაურის მნიშვნელობა (მაგ dB-ში) შეგვიძლია დავაფიქსიროთ

მხოლოდ უშუალოდ ეპიცენტრის წყაროზე და ვერ შევძლებთ საჰაერო ხრახნის მიერ წარმოებული საერთო საშუალო ხმაურის რაიმე მანძილზე დაფიქსირებას.

სიმულაციისთვის ასევე აუცილებელია განსაზღვრული იქნეს მასალები, ანუ სითხე ან აირი და სოლიდური სხეული. ვინაიდან ჩვენ სიმულაციისთვის არ ვიყენებთ სოლიდურ სხეულს (მას ანაცვლებს საჰაერო ხრახნის ფორმის სიცარიელე) ამიტომ განვსაზღვრავთ მხოლოდ აირის პარამეტრებს, რომელიც შემდეგია: სიმკვრივე 1.225 კგ/მ³; სიბლანტე 1.7894e-05 კგ/მ^{წმ}.



ნახ.2.7 Fluent-ის მოდულში სიმულაციის მომზადების სქემა: გამოთვლითი მოდელების არჩევა; ჰაერის პარამეტრების განსაზღვრა; როტაციული ზონის მახასიათებლების განსაზღვრა; სასაზღვრო პირობების განსაზღვრა (inlet-ის მაგალითი)

ხსენებული პარამეტრების არჩევის შემდგომ უნდა მიეთითოს ზონების (გარემო და როტაციული ზონის) მდგომარეობა: გარემოს ზონაში მნიშვნელოვანი მისათითებელი პარამეტრები არ არის უბრალოდ უნდა განვსაზღვროთ როგორც ჰაერი; როტაციის ზონაში კი უნდა მივუთითოთ ჰაერის ბრუნვის ღერძის კოორდინატი და მიმართულება, სასრულ ელემენტთა ბადე, ამ ბრუნვითი მოძრაობის დატანის მეთოდი და ჰაერის ბრუნვის სიჩქარე: ჩვენი სიმულაციის შემთხვევაში ბრუნვის ღერძად ვირჩევთ Z ღერძის დადებით მიმართულებას, რომელიც მოთავსებულია საჰაერო ხრახნის ცენტრში (ანუ X=0 Y=0

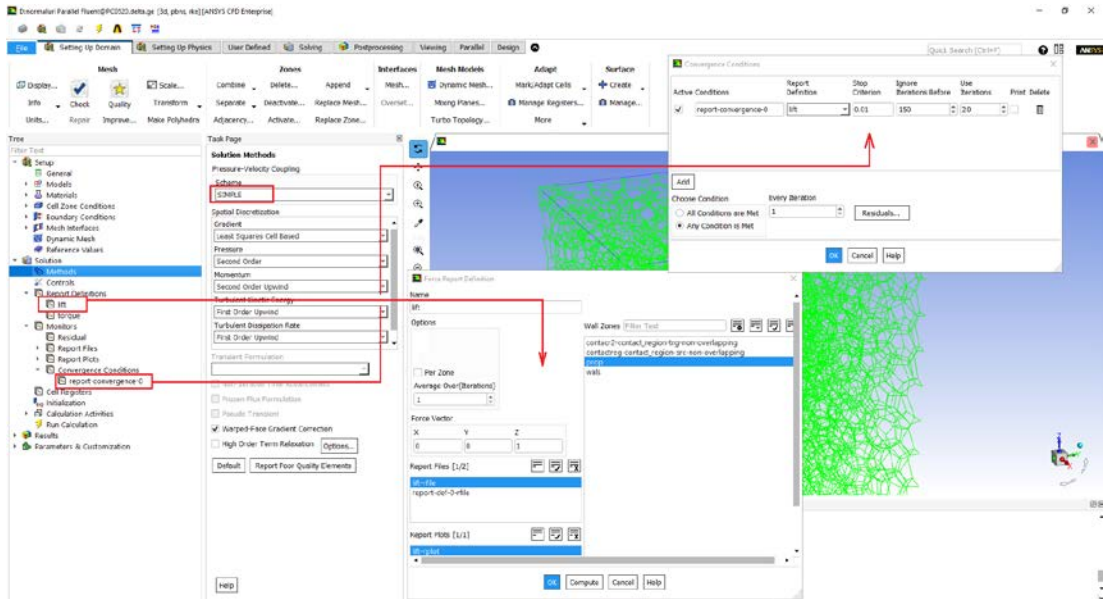
კოორდინატებზე), ბრუნვის სიჩქარედ განვსაზღვრავთ 6000 ბრუნი წუთში და სასრულ ელემენტთა ბადეზე მოძრაობა გადაიტანება უშუალოდ სასრულ ელემენტთა ჩარჩოზე (ნახ.2.7).

ზონების მდგომარეობის განსაზღვრის შემდეგ მოდის ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი საფეხური, სასაზღვრო პირობების განსაზღვრა. აქ უნდა გამოვიყენოთ წინასწარ Ansys-ის გეომეტრიულ მოდულში “named selection”-ით მონიშნული ჩვენს მიერ განსაზღვრული ზედაპირები, ასევე თავად fluent-ი გვთავაზობს მოცულობათა ინტერიერის სასაზღვრო პირობათა განსაზღვრას (ნახ.2.7). ჩვენი სიმულაციისთვის სასაზღვრო პირობებიდან განვსაზღვრეთ[13]:

- pressure inlet - წნევის მიმღები (გარემო ზონაში წნევის შესასვლელი ზედაპირი) უნდა მიეთითოს შემავალი ჰაერის წნევის მნიშვნელობა, რაც განსაზღვრავს გარემოს შიდა წნევის მნიშვნელობას, თუ არ გვსურს წნევა განსხვავდებოდეს ატმოსფერული წნევისგან, მაშინ პირობაში მოცემულ მნიშვნელობებს დავტოვებთ 0-ის ტოლად.
- pressure outlet - წნევის გამშვები (გარემო ზონიდან გამომავალი წნევის ზედაპირი).
- interior - ინტერიერი გარემოსთვის (შიდა სივრცე-ჰაერი) ინტერიერად განსაზღვრის შემდეგ ამ ზონის პარამეტრებზე ზეგავლენას მოახდენს დანარჩენი სასაზღვრო პარამეტრები.
- interior - ინტერიერი როტაციის ზონისთვის (ჰაერი რომლის ბრუნვა განვსაზღვრეთ ზონის პარამეტრების არჩევის დროს).
- wall - კედელი საჰაერო ხრახნისთვის (სასაზღვრო პირობის კედლად განსაზღვრა იწვევს ამ ზედაპირსა და გარემოს შორის ურთიერთქმედებას). საჰაერო ხრახნის ფორმა განისაზღვრება გარკვეული სისუფთავის (სიმქისის) მქონე კედლად და იგი, მხოლოდ ამის შემდეგ იმოქმედებს გარემო ჰაერზე.

სასაზღვრო პირობების შერჩევის შემდეგ გადავდივართ უშუალოდ სიმულაციის გადამწყვეტ ეტაპებზე და პირველ რიგში ვირჩევთ გადაწყვეტის მეთოდს (ალგორითმს) და სივრცითი დისკრეტიზაციის პარამეტრებს. გადაწყვეტი

მეთოდების (solution methods) სქემის არჩევისას გვაქვს რამდენიმე ვარიანტი (ნახ.2.8): SIMPLE; SIMPLEC; PISO და Coupled



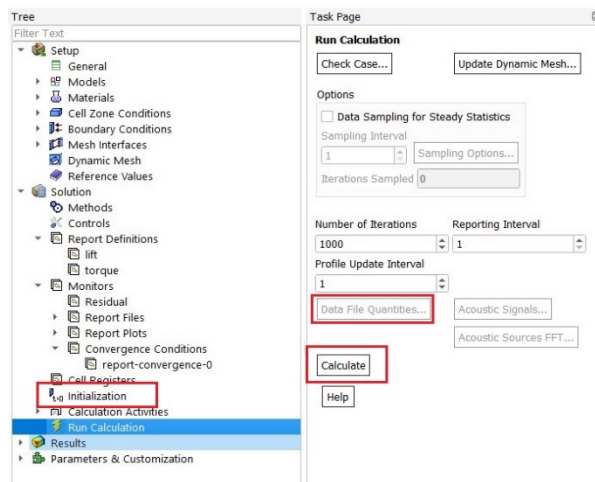
ნახ.2.8 მოდულში სიმულაციის მომზადების მეორე ეტაპი: სიმულაციის სქემის შერჩევა; საკონტროლო პარამეტრები არჩევა; გადაფარვის პირობების არჩევა

სიმულაციის ჩასატარებლად ძირითადად ვიყენებთ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) ალგორითმს, რომელიც ზემოთ მოყვანილ თავში 2.2.3-ში დაწვრილებით არის განხილული. ასევე ორმაგი კონტროლისთვის სიმულაციების გარკვეული რაოდენობა გავიმეორეთ Coupled ალგორითმის გამოყენებითაც, ვინაიდან უფრო ზუსტ ალგორითმად ითვლება, თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ დიდი განსხვავებები არ მიგვიღია SIMPLE ალგორითმთან შედარებით, პარამეტრთა ურთიერთდამოკიდებულებები კი დაახლოებით ერთი და იგივე იყო. სივრცითი დისკრეტიზაციის პარამეტრების მეშვეობით შესაძლებელია სპეციფიური მოთხოვებიდან გამომდინარე გამოთვლების შედეგების მეტი სიზუსტის მიღება, თუმცა ჩვენ ასეთი საჭიროება არ გვქონია და ამიტომ არ განვსაზღვრეთ ისინი.

სიმულაციის მომზადების დასკვნით ეტაპებზე ვახდენთ სასურველი დამატებითი პარამეტრების არჩევას მონიტორინგისთვის და მათი ანგარიშის (რეპორტების) წარმოდგენისთვის (ნახ.2.8). სიმულაციის ას მონიტორინგს ვახორციელებთ საჭირო ხრახნის ამწევ ძალასა და მის მატრუნ მომენტზე. შემდეგ

ვირჩევთ გადაფარვის პირობებს. ამ პირობის მიღწევის შემთხვევაში სიმულაცია შეწყდება და წარმატებით შესრულებულად ჩაითვლება. აღნიშნული მნიშვნელოვნად ამცირებს გამოთვლების დროს, იტერაციების რიცხვის მნიშვნელოვნად შემცირებით. გადაფარვის პირობად ვუთითებთ საჰაერო ხრახნის მიერ წარმოებულ ამწევ ძალის მნიშვნელობას, შემდეგნაირად: პირველი 150 იტერაციის შემდეგ, მომავალი 20 იტერაციის განმავლობაში თუ ამწევი ძალის მნიშვნელობა დასტაბილურდება მეასედებამდე (0.01) სიმულაცია შეწყდება და წარმატებით დამთავრდება (ნახ.2.8).

სიმულაციის მომზადებისთვის საჭირო ყველა ზემოთხსენებული პუნქტის მომზადების შემდგომ უკვე შეგვიძლია მოვახდინოთ გადაწყვეტის ინიციალიზაცია (ნახ.2.9). ამისთვის ვიყენებთ სტანდარტულ ინიციალიზაციის ფუნქციას და გამოთვლის საწყის პირობად ვუთითებთ სისტემაში შემავალი წნევის სასაზღვრო პირობას.

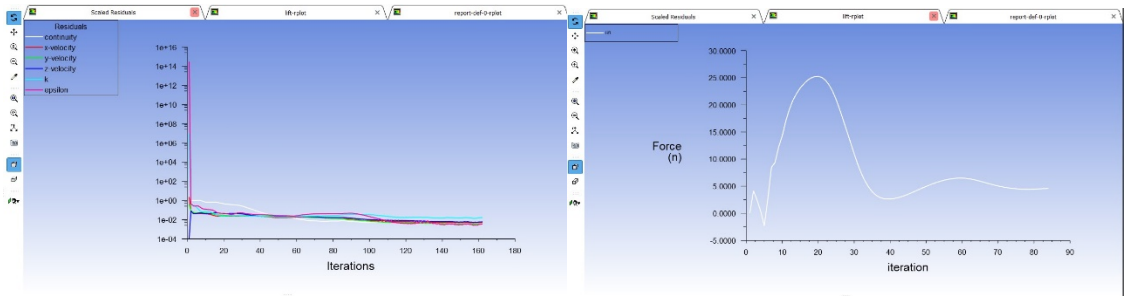


ნახ.2.9 Fluent-ში პარამეტრების ინიციალიზაცია და სიმულაციის დაწყება

ინიციალიზაციის გავლის შემდეგ გადავდივართ გამოთვლის გამშვებ გვერდზე ვირჩევთ სასურველ იტერაციათა რიცხვს და შედეგების ანგარიშის (რეპორტის) სიხშირეს (ნახ.2.9). დამატებითი პარამეტრების პოსტპროცესორისთვის მიწოდების აუცილებლობის შემთხვევაში ამას ვახდენთ 'Data File Quantities' (ნახ.2.9) ბრძანებით, სადაც ავირჩევთ არასტანდარტულ საჭირო პარამეტრებს, რათა პოსტპროცესორმა მათი აღქმა მოახერხოს. მაგალითად, ასეთი პარამეტრია

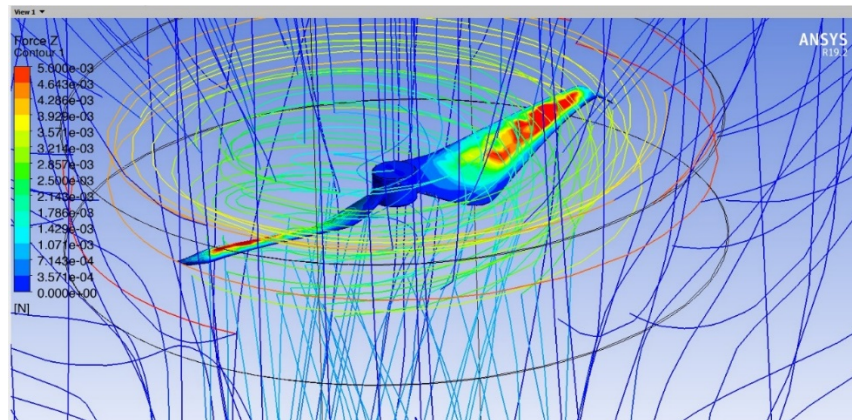
აკუსტიკური პარამეტრები. ყველა საჭირო მონაცემის მითითების შემდეგ შეგვიძლია დავიწყოთ სიმულაცია Calculate ღილაკზე ბრძანების მიცემის შემდეგ (ნახ.2.9).

სიმულაციის მიმდინარეობისას შევამჩნევთ, რომ სასურველ პარამეტრთა მნიშვნელობები იქნება ძალზედ არასტაბილური და ნელ-ნელა დაიწყებს დასტაბილურებას. ამ ყველაფერს თვალყურს ვადევნებთ სიმულაციის მიმდინარეობის ამსახველ გრაფიკზე სადაც გამოსახულია შემდეგი პარამეტრების ამსახველი წირები: კრებადობის; x -სიჩქარის; y -სიჩქარის; z -სიჩქარის; k ; და ε (ეპსილონ) (ნახ.2.10). გარდა ამისა, ასევე თვალყურს ვადევნებთ ჩვენს მიერ არჩეულ პარამეტრებს: საჰაერო ხრახნის ამწევ ძალას (N) და მაბრუნ მომენტს (Nm) (ნახ.2.10). იტერაციების გარკვეული რიცხვის შესრულების შემდგომ შევამჩნევთ, რომ წირები პულსირებული უსწორმასწორო სტადიიდან, ნელ-ნელა დასტაბილურდება და გასწორდება შესაბამის პარამეტრის გარკვეული მნიშვნელობის გასწვრივ. ეს ნიშნავს იმას, რომ სიმულაციამ მიაღწია გადაფარვის კოეფიციენტს და შესაძლებელია მისი წარმატებით დასრულება. თუ წირები არ დასტაბილურდა და არ გასწორდა ეს ნიშნავს, რომ გამოთვლები სწორად არ მიმდინარეობს და საჭიროა გარკვეული შესწორებების შეტანა რომელიმე წინამორბედ ეტაპზე. გადაფარვის მიღწევის შემდეგ სიმულაცია დასრულდება წარმატებით, დაახლოებით 170-200 იტერაციის შემდეგ და შეგვიძლია მიღებული შედეგებს გავეცნოთ პოსტპროცესორების მეშვეობით.



ნახ.2.10 სიმულაციის მიმდინარეობის მონიტორინგი ნარჩენების-residuals და ამწევი ძალის მნიშვნელობის ამსახველი გრაფიკი იტერაციების მიხედვით

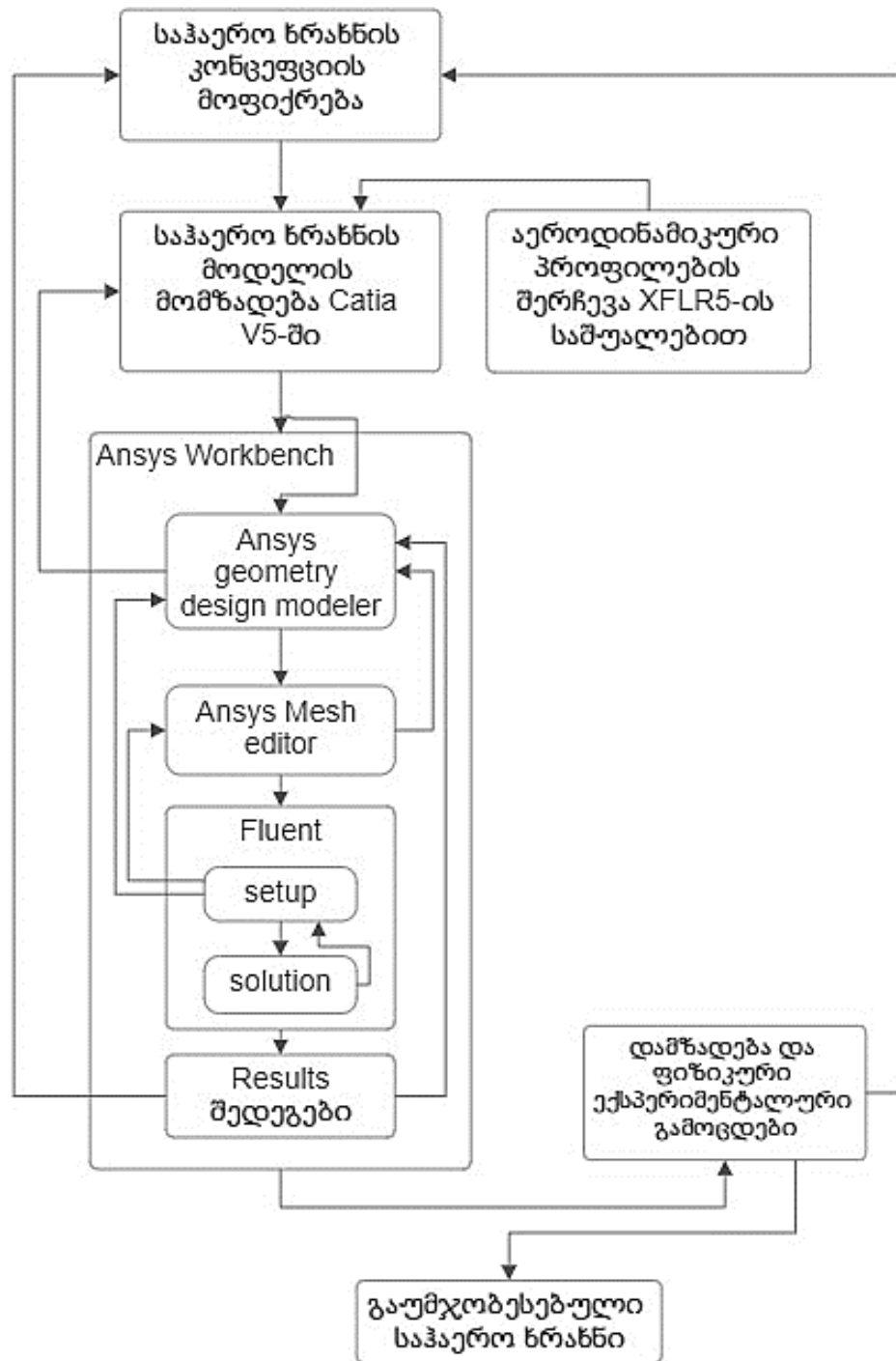
fluent-ს გააჩნია საკუთარი პოსტპროცესორი, სადაც შესაძლებელია გავეცნოთ ზოგად მახასიათებლებს, შემოვიტანოთ სიბრტყეები და დავიტანოთ მათზე სასურველ პარამეტრთა გრადიენტები, ავავოთ სასურველი გრაფიკები და დავამუშაოთ ანიმაციები. თუმცა fluent-ის გარეთ ansys-ის cfd პოსტპროცესორი შედეგთა შეფასების გაცილებით დიდ შესაძლებლობებს გვაძლევს და უმჯობესია იქ მოხდეს მათი დამუშავება (ნახ.2.11).



ნახ.2.11 სიმულაციის შედეგების ვიზუალიზაცია პოსტ პროცესორში

2.3.2. საჰაერო ხრახნის სიმულაციური კვლევის ალგორითმი

კვლევის განმავლობაში სიმულაციები ტარდებოდა ბლოკ სქემაზე წარმოდგენილი ალგორითმის მიხედვით, ნახ.2.12-ზე: პირველ რიგში ავირჩიეთ საჰაერო ხრახნის აეროდინამიკური პროფილები შესაბამისი სიჩქარეებისთვის XFRLR5-ის გამოყენებით; მეორე ეტაპზე ხდება საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას კონსტრუქციის/კონცეფციის შერჩევა, რის მიხედვითაც მის მოდელს ვამზადებდით catia v5 ში; შემდეგ მოდელი გადაგვაქვს ansys workbench-ში და ვახდენდით გამოთვლებისათვის შესაბამის გეომეტრიულ ოპტიმიზაციას. მოდელში გეომეტრიული ხარვეზის აღმოჩენის შემთხვევაში ვასწორებდით catia v5-ში და კვლავ ვბრუნდებოდით იგივე ადგილზე; მომდევნო ეტაპზე ვახდენდით გეომეტრიიდან სასრულ ელემენტთა ბადის მომზადებას, ხარვეზის შემთხვევაში ვბრუნდებოდით ერთი საფეხურით უკან ansys-ის გეომეტრიულ მოდულში ან catia v5. ხარვეზის გამოსწორების და სასრულ ელემენტთა ბადის მომზადების შემდგომ ვიწყებთ სიმულაციის მომზადებას. მეშვიდე ან სასაზღვრო პირობების ზედაპირებში უზუსტობების აღმოჩენის შემთხვევაში ვბრუნდებოდით ერთი საფეხურით უკან მეშვიდის კონტროლის მოდულში, ან ansys ის გეომეტრიულ მოდულში. უზუსტობების გამოსწორების შემდგომ ვამზადებთ და ვახდენთ სიმულაციას. წარუმატებლად დასრულების შემთხვევაში ვბრუნდებით სიმულაციის მომზადების ეტაპზე, წარმატებით დასრულების შემთხვევაში გადავდივართ; შედეგების შეფასების ეტაპზე. მისაღები შედეგის შემთხვევაში ექსპერიმენტი წარმატებულად ითვლება. მიუღებელი შედეგის მიღების შემთხვევაში საჭიროა კონსტრუქციის დახვეწა, ამიტომ ვბრუნდებოდით საწყის ეტაპზე catia v5-ში, ვხვეწავთ კონსტრუქციას და ვიწყებთ იგივე პროცესს.



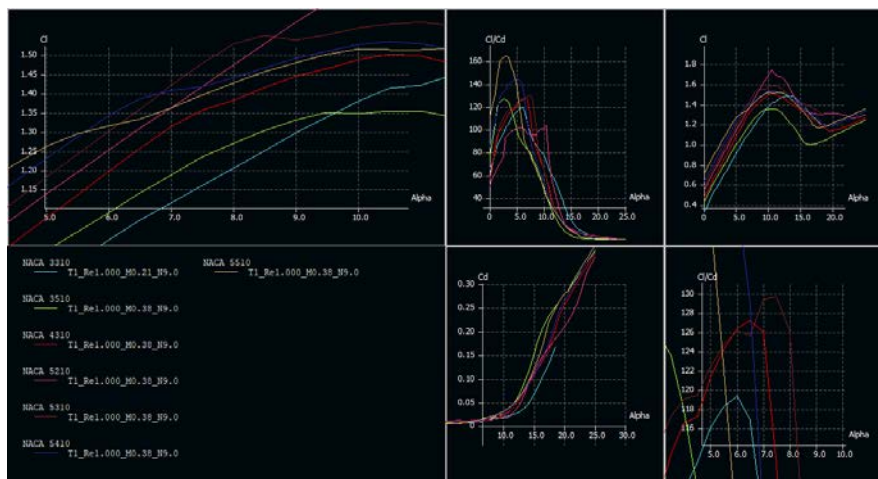
ნახ.2.12 სადოქტორო კვლევის სიმულაციური ნაწილის დამახასიათებელი ბლოკ სქემა

2.4. საჰაერო ხრახნის პარამეტრების შერჩევა

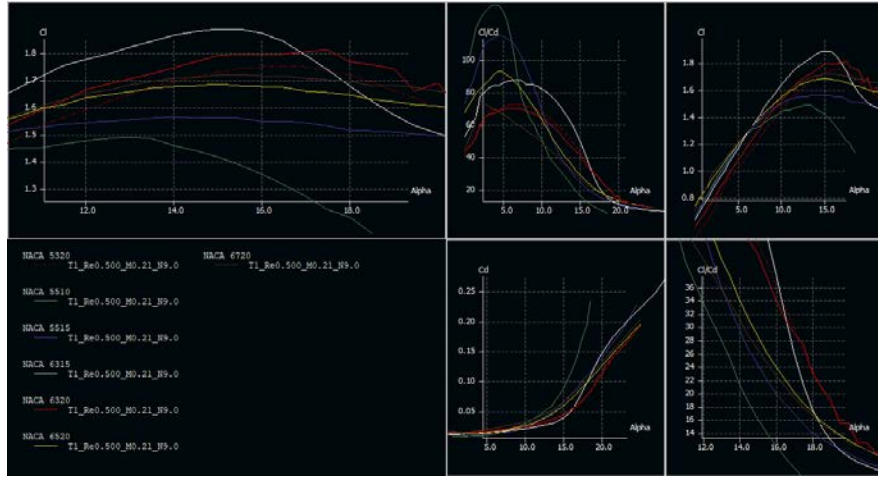
კვლევის საწყისი ეტაპზე საჰაერო ხრახნის პარამეტრების (კერძოდ აეროდინამიკური პროფილების) შესარჩევად ვიყენებდით, გამოთვლით პროგრამას XFLR5. აღნიშნული პროგრამა ძირითადად გამოიყენება ორ განზომილებიანი აეროდინამიკური გამოთვლებისათვის თვითმფრინავის ფრთის პროფილზე და იყენებს XFOIL პირდაპირი ანალიზის მოდულს, რომელიც თავის მხრივ დაფუძნებულია ლაპლასის განტოლების ამოხსნაზე. აღნიშნული მოდული გამოსადეგია ბგერამდელ სიჩქარეებზე გამოთვლების ჩასატარებლად და საჭიროებს შემდეგ პარამეტრებს: მოდულისთვის მიწოდებული უნდა იქნეს ორ განზომილებიანი აეროდინამიკური პროფილის განმსაზღვრელი კოორდინატები, მახის რიცხვი და რეინოლდსის რიცხვი. საჰაერო ხრახნის პროტოტიპისთვის პარამეტრების შერჩევისთვის, პირველ რიგში, უნდა შევარჩიოთ რა ტიპის საფრენ აპარატზე გვსურს მისი გამოყენება. მაგალითად, ცენტრიდანული ძალის ზემოქმედების თავიდან ასაცილებლად მიზანშეწონილი იქნება აღნიშნული საჰაერო ხრახნის მცირე ზომის საფრენ აპარატზე გამოყენება, ასეთ აპარატად შეიძლება ჩავთვალოთ საშუალო ზომის კვადროკოპტერი, რომელთათვისაც საჰაერო ხრახნის ყველაზე გავრცელებული ზომა (დიამეტრი) წარმოადგენს 10 ინჩს (25 სმ). ასეთი ზომის საჰაერო ხრახნი, თეორიულად, მაღალ ბრუნებზე მოგვცემს ცენტრიდანული ძალის მნიშვნელობას დამაკმაყოფილებელ ზღვრებში. ფრთოვანების აეროდინამიკური სქემად შევარჩიოთ სწორი ფორმის ფრთოვანა.

ფრთოვანების აეროდინამიკური პროფილების შერჩევისთვის ვიყენებდით ზემოთხსენებული ორ განზომილებიანი გამოთვლითი პროგრამა XFLR5-ს, რომელსაც აქვს საშუალება თავად დააგენერიროს NACA-ს 4 და 5 ნიშნიანი აეროდინამიკური პროფილები, რაც პროცესს საგრძნობლად ამარტივებს. გამარტივებისთვის, აეროდინამიკური პროფილი შევარჩიოთ საჰაერო ხრახნის რადიუსის გასწვრივ 3 მონაკვეთისთვის, კიდურა 12 სმ დაშორება ცენტრიდან, შუა ნაწილი დაშორება 7 სმ ცენტრიდან და ცენტრალური ნაწილი 2 სმ დაშორებით ცენტრიდან. მაქსიმალური ბრუნთა რიცხვი საჰაერო ხრახნისთვის წარმოადგენდეს 10000 ბრუნს წუთში, ეს გვამღებს განსაზღვრული მონაკვეთებისთვის ჰაერის

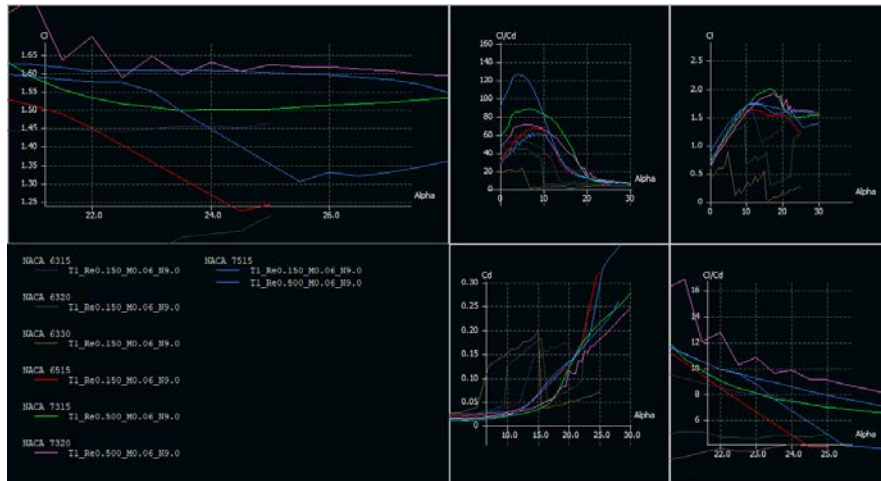
სიჩქარეების განაწილების შემდეგ სახეს: ფრთოვანას კიღურა ნაწილზე ჰაერის სიჩქარე გვექნება 0.38M (მახი), შუა ნაწილზე გვექნება 0.21M და ცენტრალურ ნაწილზე გვექნება 0.06M. რეინოლდსის რიცხვი გამოთვლებისათვის გავითვალისწინეთ 500000-1000000 ზღვრებში. აღნიშნული პარამეტრების გათვალისწინებით, კომპიუტერული სიმულაციებისას მივიღეთ საკვანძო მონაკვეთებისთვის ოპტიმალური აეროდინამიკური პროფილები (NACA 4 ნიშნიანი) და შეტევის კუთხეები. (ნახ.2.13) კიღურა მონაკვეთისთვის შეტევის კუთხე $\alpha=7^\circ$ ოპტიმალური აეროდინამიკური პროფილი არის NACA 5310, (ნახ.2.14) შუა ნაწილისთვის შეტევის კუთხე $\alpha=16^\circ$ პროფილი არის NACA 6315, და (ნახ.2.15) ცენტრალური ნაწილისთვის შეტევის კუთხე $\alpha=25^\circ$ პროფილი კი შეირჩა NACA 7320. საკვანძო მონაკვეთებისთვის აეროდინამიკური პროფილების შერჩევა მოხდა ემპირიულად, სიმულაციისას ერთმანეთთან შედარებული იქნა რამდენიმე პროფილი და მათი ამორჩევა მოხდა დამაკმაყოფილებელი Cl ამწევი ძალის და Cd წინააღობის ძალის კოეფიციენტების მიხედვით.



ნახ.2.13 ფრთოვანას კიღურა R=12 სმ ($V_\infty=452.4$ კმ/სთ) მონაკვეთისთვის დათვლილი აეროდინამიკური პროფილების გრაფიკები



ნახ.2.14 ფრთოვანას შუა R=7 სმ ($V_{\infty}=264$ კმ/სთ) მონაკვეთისთვის დათვლილი აეროდინამიკური პროფილების გრაფიკები

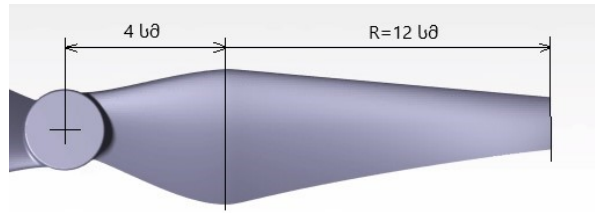


ნახ.2.15 ფრთოვანას ვენტრალური R=2 სმ ($V_{\infty}=75.4$ კმ/სთ) მონაკვეთისთვის დათვლილი აეროდინამიკური პროფილების გრაფიკები

2.5. საჰაერო ხრახნის კონსტრუქციის შემუშავება

სადოქტორო კვლევის განმავლობაში ფრთოვანას შესასწავლი ზონებიდან გამომდინარე შევიმუშავეთ რამდენიმე კონსტრუქცია იმ პარამეტრების გათვალისწინებით, რომ შესასწავლ ზონაში მოქმედი აეროდინამიკური მოვლენები მაღალი ხარისხის ყოფილიყო, რათა მათზე დაკვირვება და ცვლილებების შეფასება უკეთ შეგვეძლებოდა. მაგალითად კვლევების საწყის ეტაპზე ფრთოვანას ბოლოებში აეროდინამიკური მოვლენების შესწავლისთვის შევიმუშავეთ ხრახნი რომელსაც მაქსიმალური ქორდა აქვს ფრთოვანას ბოლოსთან ახლოს. ამ შემთხვევაში ზედაპირებს შორის წნევათა დისბალანსის მაქსიმალური მნიშვნელობა გვექნება ფრთოვანას ბოლოებში და დაგრიგალებული ჰაერის ნაკადით გამოწვეული უარყოფითი ეფექტებზე დაკვირვებასაც უკეთ შევძლებთ.

მომდევნო ეტაპისთვის საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას ცენტრალურ ნაწილში კონსტრუქციული მანიპულაციების ჩასატარებლად შევიმუშავეთ საჰაერო ხრახნის სრულიად განსხვავებული, მეტად სტანდარტული მოდელი, ვიდრე ეს კვლევის პირველ ეტაპზე იყო. ამჯერად საჰაერო ხრახნი მეტწილად მიმსგავსებულია, დღესდღეობით ყველაზე გავრცელებული სამოქალაქო კომერციული უპილოტო საფრენი აპარატების, მწარმოებელი კომპანიის DJI-ს, მიერ თავის მოწინავე “phantom”-ის ხაზის დრონებში გამოყენებულ საჰაერო ხრახნებთან. მოკლედ რომ დავახასიათოთ, ამ საჰაერო ხრახნის ფრთოვანა წარმოადგენს რომბისებრ-ტრაპეციულ კონსტრუქციას (ნახ.2.16), ანუ აეროდინამიკური პროფილის მაქსიმალური ქორდა მოთავსებულია ფრთოვანას ცენტრალურ ნაწილში და იგი შესამჩნევად მცირდება ფრთოვანას კიდურა ნაწილისკენ. საჰაერო ხრახნის ასეთი კონსტრუქცია ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებულია თანამედროვე მცირე ზომის ვერტიკალურად აფრენა-დაფრენად დისტანციურად პილოტირებად საფრენ აპარატებში, გამომდინარე მათ მიერ წარმოქმნილი ამწევი და წინაღობის ძალების ოპტიმალური თანაფარდობისა.

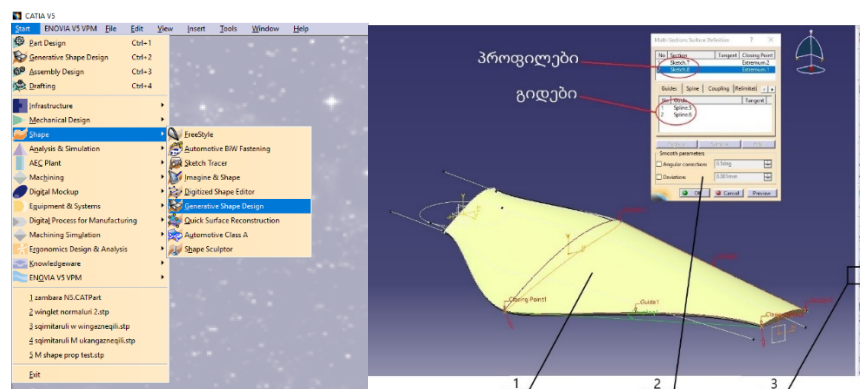


ნახ.2.16 ფართოდ გავრცელებული საჰაერო ხრახნის მოდელი ფრთოვანას რომბისებრ ფორმით

კვლევის ამ ეტაპზე გამოყენებული ჩვენეული საჰაერო ხრახნის ძირითადი გეომეტრიული პარამეტრები შემდეგია: ხრახნის დიამეტრი - 24 სმ; ფრთოვანას კონფიგურაცია - რომბისებრი

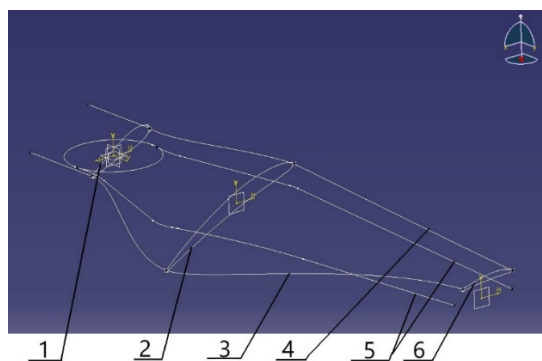
აღნიშნული გეომეტრიული პარამეტრები დაცვით შევიმუშავეთ რამდენიმე კონცეპტუალური საჰაერო ხრახნის მოდელი, რომლებიც შემდგომ კომპიუტერული სიმულაციების მეშვეობით შევამოწმეთ ჩვენთვის სასურველი პარამეტრების მნიშვნელობაზე. კვლევას ძირითადად ჰქონდა ემპირიული სახე და ძირითად მიზანს, ადრინდელივით, წარმოადგენდა საჰაერო ხრახნის პარამეტრების: ამწევი ძალის, წინაღობის ძალის და ხმაურის დამაკმაყოფილებელი შედეგების მიღწევა.

კვლევისას გამოსაყენებელი მოდელების მომზადება მოვახდინეთ საინჟინრო პროგრამა Catia V5- ის გამოყენებით. კერძოდ, ამისთვის გამოყენებული იქნა პროგრამის generative shape designe მოდული, რომელიც გამოირჩევა რთულ მრუდ ზედაპირებთან მუშაობის შესაძლებლობით.



ნახ.2.17 „generative shape design“ მოდული: 1) ზედაპირი 2) „multy-section surface“- ის ხელსაწყოები 3) „multi-section surface“

საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას გეომეტრიის ასაგებად გამოყენებული იქნა 2 ტიპის ძირითადი აეროდინამიკური პროფილი, ფრთოვანას ცენტრალური და კიდურა ნაწილებისთვის და ერთი დამხმარე გარდამავალი აეროდინამიკური პროფილი, რომელიც ფრთოვანას ცენტრალურ ნაწილის ხრახნის ცენტრალურ ნაწილთან დასაკავშირებლად იქნა გამოყენებული (ნახ.2.18). ფრთოვანას ცენტრალურ ნაწილში გამოვიყენეთ NACA-ს 6409 აეროდინამიკური პროფილი, ქორდის სიგრძე დაახლოებით 3,7 სმ, შეტევის კუთხე 24° და მდებარეობა $R=4$ სმ რადიუსზე. ხოლო კიდურა ნაწილში გამოვიყენეთ NACA 5408 აეროდინამიკური პროფილი, ქორდის სიგრძე 1.3 სმ, შეტევის კუთხე 7° , მდებარეობა $R=12$ სმ. საჰაერო ხრახნის ცენტრალურ ნაწილში გამოვიყენეთ არასტანდარტიზებული სიმეტრიული აეროდინამიკური პროფილი, ვინაიდან ხრახნის ამ ნაწილში წვევის ძალა არ წარმოიქმნება და შესაბამისად დახვეწილი აეროდინამიკური ფორმის აუცილებლობაც არ არის. აღნიშული პროფილები განლაგებული იქნა შესაბამის კოორდინატებზე და “multy section surface” ბრძანებით მოხდა მათი შეერთება, ფრთოვანას რომბისებრი ფორმის შესანარჩუნებლად გამოყენებული იქნა ორი მიმმართველი მრუდი მონაკვეთი, ეგრეთ წოდებული გიდები. შედეგად მივიღეთ საჰაერო ხრახნის ციფრული მოდელი, რომელზეც მარტივად მოვახდენდით სხვადასხვა კონსტრუქციული სახეცვლილებების შეტანას ისე, რომ საჰაერო ხრახნის საერთო სახე არ შეცვლილიყო.

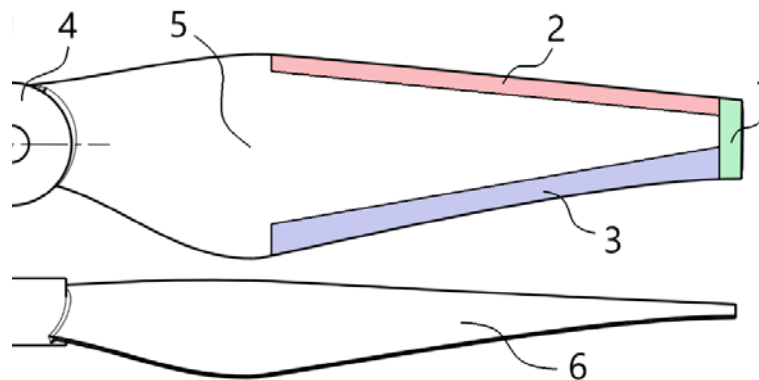


ნახ.2.18 საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას მოდელის ასაგებად საჭირო სტრუქტურები: 1. ცენტრალური პროფილი; 2. NACA-ს 6409 პროფილი $R=4$ სმ; 3. და 4. ზედაპირის ფორმის მიმცემი გიდები; 5. გიდების მაფორმირებელი წირები; 6. NACA 5408 აეროდინამიკური პროფილი $R=12$ სმ

2.6. საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას მნიშვნელოვანი ზონები და მათი

ანალიზი

სადოქტორო კვლევის მიზნების მისაღწევად მიზანშეწონილად მივიჩნიეთ მოგვეხდინა საჰაერო ხრახნების ფრთოვანების უბნებად დაყოფა და ჩავღრმავებოდით იმ უბნებს, სადაც ზემოთხსენებული აეროდინამიკური დანაკარგები და ხმაურის პრობლემების გამოკვლევა მნიშვნელოვანია. ფრთოვანაზე ასეთ უბნებს და გეომეტრიულ პარამეტრებს, რომელთა ოპტიმიზაციის დიდი შესაძლებლობაა წარმოადგენს: ფრთოვანას ბოლოები, ქიმი, კუდა ნაწილი, ზოგადი გეომეტრიული ფორმა და განივი დიჰედრალური ორიენტაცია.



ნახ.2.19 საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას მნიშვნელოვანი ზონები 1-ფრთოვანას ბოლო; 2-ფრთოვანას ქიმი/წინა კიდე (leading edge); 3-ფრთოვანას კუდა ნაწილი/უკანა კიდე(trailing edge); 4-საჰაერო ხრახნის ცენტრალური სხეული(propeller hub); 5-ფრთოვანას ფორმა ზედა გეგმილში; 6-ფრთოვანას ფორმა წინა გეგმილში

1. საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას ბოლო ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი უბანია, ვინაიდან აქ ხდება ჰაერის დაგრიგალება, რის შედეგადაც იზრდება ფრთოვანას აეროდინამიკური წინაღობა, მცირდება ამწევი ძალა და იზრდება წარმოშობილი ხმაური. თვითმფრინავის ფრთის მსგავსად, საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას შემთხვევაშიც, მის ბოლოში გრიგალის წარმოქმნის მიზეზი შემდეგში მდგომარეობს: როგორც ვიცით ფრთაზე ამწევი ძალა წარმოიქმნება ჰაერის ნაკადში

მოძრავი ფრთის არასიმეტრიული აეროდინამიკური პროფილის მეშვეობით, ანუ ფრთის პროფილის ზედა ზედაპირზე აქვს უფრო მეტი სიმრუდე ქვედა ზედაპირთან შედარებით. რის გამოც ფრთის ზედა ზედაპირზე ჰაერს უწევს უფრო გრძელი ტრაექტორიის გავლა და მისი სიჩქარეც მეტია ვიდრე ქვედა ზედაპირზე. ბერნულის თეორიიდან კი ცნობილია, რომ სითხის ან აირის მოძრაობისას რაც მეტია სიჩქარე მით უფრო მცირეა წნევა. გამომდინარე აქედან ფრთის ზედა ზედაპირზე გვაქვს მაღალი სიჩქარე და დაბალი წნევა, ქვედა ზედაპირზე კი ჰაერის შედარებით დაბალი სიჩქარე და მაღალი წნევა. ესენი შეიძლება განისაზღვროს როგორც დაბალი და მაღალი წნევის არეები. გამომდინარე აქედან, ფრთის შემთხვევაში, ქვედა მაღალი წნევის არიდან ჰაერი ცდილობს გადავიდეს და შეავსოს ზედა, დაბალი წნევის არე, მაგრამ მათ შორის ფრთის არსებობის გამო ჰაერი ზემოქმედებს ფრთაზე და ეს ქმედება გამოიხატება ამწევ ძალაში. მაგრამ ფრთის ბოლოში, სადაც მაღალ და დაბალ წნევის არეებს შორის ფიზიკური ბარიერი აღარ არის, ჰაერი ფრთის ბოლოზე შემოვლით გადაადგილდება ფრთის ქვედა ზედაპირიდან ზედა ზედაპირზე. იმის გათვალისწინებით, რომ ფრთა მოძრაობს ჰაერის ნაკადის შემხვედრი მიმართულებით, მის ბოლოში ჰაერის ეს წრიული ტრაექტორია გადადის ფრთის უკან წარმოქმნილი სპირალურ ტრაექტორიაში (დაგრიგალებაში). ამ მოვლენას გააჩნია ორი სახის უარყოფითი ეფექტი: ერთი ის, რომ გრიგალის წარმოქმნა ამცირებს ამწევ ძალას და მეორე კი ის, რომ აღნიშნული გრიგალი ფრთის უკან მდებარე ჰაერის ნაკადს უცვლის ტრაექტორიას, ხრის ქვედა მიმართულებით (ამას მოვლენას უწოდებენ downwash-ს), რის შედეგადაც იცვლება აეროდინამიკური პროფილის გარსშემომდენი ნაკადის ტრაექტორია - იხრება ქვემოთ. ეს, თავის მხრივ, იწვევს ამწევი ძალის ვექტორის გადახრას ფრენის მიმართულების პერპენდიკულარული ღერძიდან უკანა მხარეს. მის შესაბამის ღერძებზე დაგეგმარებით კი ვიღებთ ორ დამატებით ძალას: პირველი მათგანი, ფრენის მიმართულების პერპენდიკულარულ ღერძზე დაგეგმარებული ვექტორი, არის რეალური ამწევი ძალა, ხოლო მეორე, ფრენის მიმართულების პარალელურ ღერძზე დაგეგმარებული ვექტორი, წარმოადგენს ნარჩენ წინაღობის ძალას, რომელსაც ინდუქციურ წინაღობას უწოდებენ. უნდა აღინიშნოს, რომ ინდუქციური

წინააღმდეგობა გარდაუვალი მოვლენაა აეროდინამიკური ამწევი ძალის წარმოშობისას, მაგრამ ზემოთხსენებული ჰაერის დაგრიგალება ზრდის მის მნიშვნელობას.

საჰაერო ხრახნის აეროდინამიკური პროცესების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ფრთის ბოლოს წარმოშობილი გრიგალები აუარესებს არა მარტო აეროდინამიკურ წინააღმდეგობას და ეფექტურობის მახასიათებლებს, არამედ მათ დიდი გავლენა აქვთ ხმაურის წარმოშობაზე, ვინაიდან დაგრიგალებულ ჰაერში დიდია ჰაერის მოლეკულათა ფლუქტუაციის (რყევის) ხარისხი ანუ ასეთ ზონებში წარმოიქმნება მრავლობითი ბგერითი ტალღები, რის შედეგადაც მიიღება მაღალი დონის ხმაური.

2. საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას წინა კიდე/ქიმი ფრთოვანას საკმაოდ საპასუხისმგებლო უბანს წარმოადგენს. დიდი მნიშვნელობა აქ მის ორიენტაციას შემხვედრი ჰაერის ნაკადის მიმართულებით და ზედაპირის სისუფთავეს. ზოგადად ფრთოვანას ქიმი უმნიშვნელოვანესი და ძალზედ საფრთხილო უბანია, ვინაიდან იგი პირველი ზედაპირია რომელიც ჰაერთან კონტაქტში მოდის და განაპირობებს ჰაერის შემდგომ გადანაწილებას ფრთოვანას დანარჩენ ზედაპირებზე. სწორად შერჩეული ფრთოვანას ქიმის კონსტრუქციის საშუალებით შეიძლება მოხდეს შეტევის კუთხის მნიშვნელობის გაზრდა და ჰაერის მოწყვეტის თავიდან აცილება. ეს კი საბოლოოდ მოგვცემს ამწევი ძალის გაზრდის საშუალებას.

მეორეს მხრივ, ფრთიდან ჰაერის მოწყვეტის თავიდან აცილება და ტურბულენტობის ხარისხის შემცირება თავისთავად ამცირებს მაღალი ხმის წარმოშობის კერასაც.

ფრთოვანას ქიმის ორიენტაცია დიდწილად განისაზღვრება ფრთოვანას გეომეტრიული ფორმით, თუმცა შესაძლებელია მასში მცირეოდენი ცვლილებების შეტანა.

3. საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას კუდა ნაწილი ასევე არანაკლებ მნიშვნელოვანია. ქიმისგან განსხვავებით კუდი განაპირობებს ფრთოვანას უკან დარჩენილი ჰაერის ნაკადის მახასიათებლებს ვინაიდან ფრთოვანას ამ უბანში ხდება პროფილის გარსშემომდენი ჰაერის ნაკადების შეერთება და პროფილის სიმრუდის და შეტევის კუთხის გამო მათი დაცურება. ასევე, გარსშემომდენ ნაკადთა წნევების სხვაობის გამო, ფრთოვანას უკან ხდება გრიგალური ზონების ფორმირება. გამომდინარე

აქედან, ფრთოვანას ამ უბანში კონსტრუქციული ცვლილებების შეტანით შესაძლებელია ჰაერის ნაკადის ხსენებული ზონის მანიპულირება და საჰაერო ხრახნის ეფექტურობის და ხმაურის მახასიათებლებში ცვლილებების შეტანა.

გამომდინარე იქიდან, რომ ფრთოვანას უკან გატყორცნილი ტურბულიზებული-აგრიგალეზული ჰაერის ნაკადი აფერხებს ფრთოვანას წინ გადაადგილებას, შედეგად, იგი ასევე ზრდის მის მიერ წარმოქმნილ ხმაურსაც.

4. ფრთოვანას ფორმა და ორიენტაცია გარდა ფრთოვანების ზემოთაღნიშნული ზონებისა, საჰაერო ხრახნის მახასიათებლებზე არანაკლებ მნიშვნელოვანი გავლენა აქვს თავად ფრთოვანას გეომეტრიულ ფორმას და ორიენტაციას. იგი მოიცავს მრავალ პარამეტრს და მათი ვარირებით შესაძლებელია მნიშვნელოვანი ცვლილებების შეტანა, როგორც თავად საჰაერო ხრახნის, ასევე საფრენი აპარატის მახასიათებლებში.

2.7. კონცეპტუალური საჰაერო ხრახნები ფრთოვანების ბოლოებში

პროპლექტებით

კვლევის საწყის ეტაპზე საჰაერო ხრახნის მახასიათებლების გაუმჯობესებისათვის გადაწყვეტიტ კონსტრუქციული ცვლილებები შეგვეტანა ფრთოვანას ბოლოებში, ვინაიდან როგორ ვიცით აღნიშნულ უბანში აგრესიული ტურბულენტური გარემოდან გამომდინარე საკმაოდ დიდი დანაკარგები გვაქვს, როგორც ამწევი ძალის, ასევე ენერგო ეფექტურობის თვალსაზრისით. გარდა ამისა ამ უბნებში გამოწვეული ხმაურიც დიდი მნიშვნელობისაა.

აღნიშნული უარყოფითი მოვლენების შესასწავლად შევიმუშავეთ ტრადიციული საჰაერო ხრახნის სპეციფიური კონსტრუქცია, რომელსაც ფრთოვანას მაქსიმალური ქორდა გააჩნდა ბოლოსთან ახლოს. ამის შედეგად უფრო მეტად შევძლებდით ფრთოვანას ბოლოში აგრიგალების გამოკვეთას და უფრო ობიექტურად მოვახდენდით გატარებული ღონისძიებების დადებითობის შეფასებას.

ამისათვის აუცილებელი იყო განგვესაზღვრა საჰაერო ხრახნის გარკვეული გეომეტრიული მახასიათებლები, რომლებიც მათი ერთმანეთთან შედარების საშუალებას მოგვცემს, ესენია:

- საჰაერო ხრახნის დიამეტრი
- საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას ფორმა (ტიპი)
- საჰაერო ხრახნის ბიჯი

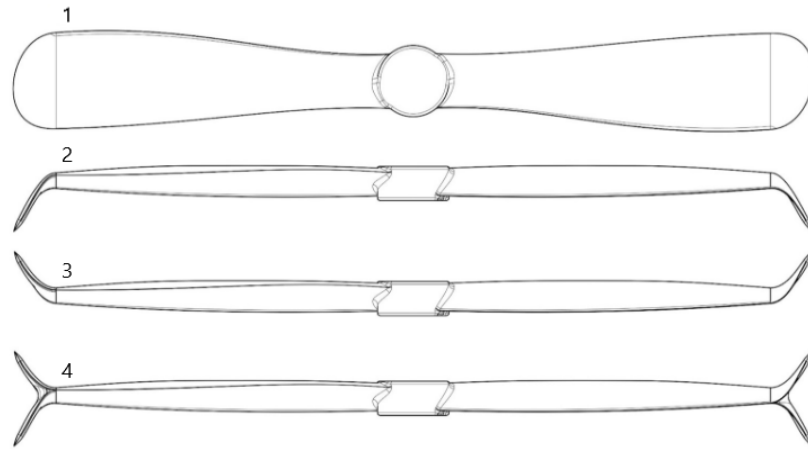
ზედა და ქვედა ზედაპირებს შორის წნევათა სხვაობით გამოწვეული ჰაერის დაგრიგალება საჰაერო ხრახნის ყველა მნიშვნელოვან პარამეტრზე უარყოფით ზეგავლენას ახდენს: ფრთოვანას ბოლოში ჰაერის დაგრიგალების გამო იკარგება ადგილობრივი ჰაერის წნევათა დისბალანსი და შესაბამისად იკარგება ამწევი ძალა; ასევე ჰაერის გრიგალური მოძრაობით იცვლება ფრთოვანას აეროდინამიკურ პროფილზე გარსშემომდენი ჰაერის ნაკადის ვექტორი, რაც აეროდინამიკური ამწევი ძალის ვექტორის გადახრას იწვევს და ამით წარმოქმნის ფრთოვანას ინდუქციურ წინაღობას; და ბოლოს, ჰაერის ტურბულენტური მოძრაობა საჰაერო ხრახნის მიერ გამოწვეული ხმაურის ერთ-ერთი ძირითადი წყაროა და, გამომდინარე იქიდან, რომ ფრთოვანას ბოლოებში ჰაერი მაღალ ტურბულენტურია, შესაბამისად აქ ხმაურის

მაღალი მნიშვნელობა გვაქვს. ზემოთხსენებულიდან გამომდინარე ვივარაუდეთ, რომ ფრთოვანას ბოლოებში ჰაერი დაგრიგალების შემცირებით მნიშვნელოვნად გავაუმჯობესებდით საჰაერო ხრახნის პარამეტრებს. ამის განსახორციელებლად ყურადღება უნდა მიგვექცია საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას ბოლოს ისეთნაირ ცვლილებისთვის, რაც ოპტიმალური იქნებოდა. ამისათვის ძირითად მაგალითად ავიღეთ თვითმფრინავის ფრთის ბოლოებისათვის, იგივე პრობლემის შესამცირებლად გამოყენებული ეგრეთწოდებული ვინგლეტები. ვინგლეტი წარმოადგენს ფრთის ბოლოს მდორედ მიღევად წაგრძელებას, რომელიც გადახრილია მართობულად ფრთის ზედა ზედაპირისკენ. აღნიშნული, არამხოლოდ ამცირებს ფრთის ბოლოში ჰაერის დაგრიგალებას, არამედ გრიგალის სათავეს წევს ფრთისაგან შედარებით მოშორებით. გარდა ამისა, საჰაერო ხრახნებისთვის ცნობილია ეგრეთწოდებული Q-tip პროპლეტის კონსტრუქცია, რომელიც ძალზედ მსგავსია ფრთის ვინგლეტისა იმ განსხვავებით, რომ ამ შემთხვევაში ფრთოვანას წაგრძელება შეუმჩნევლადაა გადახრილი ფრთოვანას ქვედა ზედაპირისკენ.

აღნიშნული მაგალითების მიხედვით გადავწყვიტეთ შეგვემუშავებინა საჰაერო ხრახნის ოთხი ტიპი რომლებზეც მოვახდენდით კომპიუტერული და პრაქტიკული ექსპერიმენტების ჩატარებას და მათ ერთმანეთთან შედარებას.

საჰაერო ხრახნის ეს ოთხი ტიპის მოდელი იყო (ნახ.2.20):

1. ნორმალური ტრადიციული კონსტრუქციის მქონე საჰაერო ხრახნი
2. Q-tip საჰაერო ხრახნი
3. საჰაერო ხრახნი ზედა ზედაპირისკენ გადახრილი პროპლეტით
4. საჰაერო ხრახნი ორმაგი (T-სებრი) პროპლეტით



ნახ.2.20 ფრთოვანას ბოლოებში დაგრიგალების შემცირებისთვის შემუშავებული საჭაერო ხრახნები

აღნიშნული მოდელების შემუშავებისას გასათვალისწინებელი ფაქტორები იყო: მათ უნდა ჰქონოდათ აბსოლუტურად იდენტური გეომეტრიული პარამეტრები, გარდა ფრთოვანების დაბოლოებებისა (ხრახნის დიამეტრი, შეტევის კუთხეები და ძირითადი ფართობი); საჭაერო ხრახნები უნდა ყოფილიყო ერთმანეთთან შედარებადი. ასევე, შედარებით კომპლექსური გასათვალისწინებელი ფუნქციონალური ფაქტორი იყო, ტრადიციული საჭაერო ხრახნის ფრთოვანას ბოლოს, შეიძლება ითქვას, უმტკივნეულოდ გადაკეთება სასურველი გაუმჯობესების მისაღებად. გამომდინარე იქიდან, რომ აეროდინამიკურ ზედაპირებზე ფორმის უმნიშვნელო ცვლილებამაც კი შესაძლოა საგრძნობლად გააუარესოს მისი პარამეტრები, ამიტომ კრიტიკული იყო ფრთოვანას ბოლოს სახეცვლილების ოპტიმალურ საზღვრებში მოქცევა, წინააღმდეგ შემთხვევაში, ერთი რომელიმე პარამეტრის გაუმჯობესებისას უნებლიედ რომელიმე მეორე პარამეტრი ორმაგად გაგვეუარესებინა. ამის მიღწევისთვის დაგვჭირდა საჭაერო ხრახნის მოდელის უამრავი გეომეტრიული კომბინაციის შემუშავება და მათზე უამრავი კომპიუტერული სიმულაციის ჩატარება.

სიმულაციებმა მეტნაკლებად მოულოდნელი შედეგები გვიჩვენა, მიუხედავად იმისა რომ ლოგიკურად T-სებრ პროპლეტებიან საჭაერო ხრახნს წესით ყველაზე უკეთესი შედეგები უნდა ეჩვენებინა, ეს ასე არ მოხდა და, შეიძლება ითქვას კვლევის ამ ეტაპზე გაცილებით საინტერესო მონაცემები ზემოთ გადახრილ

პროპლექტიანმა საჭაერო ხრახნმა მოგვცა. მისი სიმულაციების შედეგად მივიღეთ 7-10% გაუმჯობესებული წნევის ძალა და მცირედად გაზრდილი წინალობა, რაც საერთო ჯამში ტრადიციული კონსტრუქციისგან, ენერგოეფექტურობის თვალსაზრისით, დიდ განსხვავებას არ გვაძლევდა. თუმცა კვლევების ამ ეტაპზე დავაფიქსირეთ, რომ ჰაერის შეწოვის მხარეს გადახრილი ზედაპირები აუმჯობესებენ საჭაერო ხრახნის ამწევ მახასიათებლებს. ამ შედეგებიდან შეიძლება გამოვიტანოთ გარკვეული სახის ვარაუდები: წარმოვიდგინოთ რომ ხრახნის მოქმედებისას ფრთოვანას ქვედა და ზედა ზედაპირებზე წარმოიქმნება მაღალი და დაბალი წნევის ბალიშები, ამასთან სიმულაციები გვიჩვენებენ, რომ ფრთოვანას ზედა ზედაპირზე წარმოქმნილ დაბალი წნევის ბალიშის მოცულობა გაცილებით დიდია ვიდრე მაღალი წნევის ბალიშისა და ამასთან დაბალი წნევის არეში არსებული ჰაერის წნევასა და ატმოსფერულ ჰაერის წნევას შორის სხვაობა გაცილებით დიდია, ვიდრე მაღალი წნევის არესა და ატმოსფეროს წნევას შორის. შესაბამისად, აქედან შეგვიძლია ვივარაუდოთ, რომ საჭაერო ხრახნის ფრთოვანაზე აეროდინამიკური ამწევი ძალი წარმოქმნილი არა მხოლოდ ფრთოვანას ზედაპირებს შორის წნევათა სხვაობა და რეაქციის ძალაა, არამედ ასევე ამწევი ძალის ერთ-ერთი წყაროა გარემო ატმოსფერული ჰაერში შეწოვილი დაბალი წნევის არის ზედაპირი. ანუ ფრთოვანას ზედა ზედაპირზე წარმოქმნილი დაბალი წნევის ბალიში შთაინთქმება/შეიწოვება ატმოსფერული წნევის მიერ და შესაბამისად დაბალი წნევის ბალიშზე მოდებული ფრთოვანას ზედა ზედაპირიც მიჰყვება მას და გადაადგილდება შესაბამისი მიმართულებით.

აქედან გამომდინარე ვვარაუდობთ, რომ ზემო გადახრილი პროპლექტების მქონე ხრახნი, სწორედ იმ ზედა ზედაპირისკენ გადახრილი დაბოლოებების წყალობით მეტად სტაბილურად ინარჩუნებს და ხელს უწყობს უფრო მოზრდილი დაბალი წნევის ბალიშის ფორმირებას, რაც შემდგომში ამწევი ძალის ნაზრდში გამოიხატება. რაც შეეხება Q-tip საჭაერო ხრახნს, ამ თეორიის მიხედვით, მისი ქვედა ზედაპირისკენ გადახრილი დაბოლოებებზე ხდება დაბალი წნევის ბალიშის კიდევები დაშლა და იგი შეიწოვება ატმოსფერულ ჰაერში, არა მხოლოდ ზედა

ზედაპირის მხრიდან, არამედ ქვედა ზედაპირის და გვერდების მხრიდან, შესაბამისად, ეს უნდა იყოს მიზეზი ასეთ ხრახნებში წვევის ძალის კლებისა.

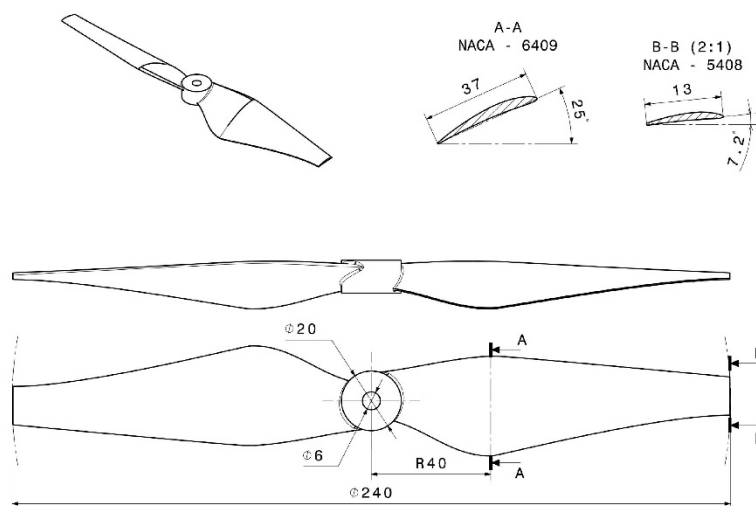
აღნიშნული ექსპერიმენტები ტარდებოდა კომპიუტერული სიმულაციების გამოყენებით და, შესაბამისად, მათმა რეალურ გარემოში გადმოტანამ შესაძლოა გარკვეულწილად განსხვავებული შედეგები მოგვცეს. თუმცა, წესით, პარამეტრთა შორისი ურთიერთდამოკიდებულებები იგივე მნიშვნელობისა უნდა იყოს. ასე რომ, ეს მაინც გვაძლევს საშუალებას გამოვიტანოთ გარკვეული სახის დასკვნები ამა თუ იმ კონსტრუქციის აკვარგიანობაზე და კვლევის შემდგომი ეტაპებისთვის დავისახოთ მიმართულება. ასეთ მიმართულებად განხორციელებული ექსპერიმენტებიდან ზევით გადახრილი პროპლეტების მქონე საჰაერო ხრახნი გამოიკვეთა, ვინაიდან ამ უკანასკნელის მეშვეობით შევძელით მიგველო როგორც ამწევი ძალის ნაზრდი, ასევე შემცირებული ხმაური. ასე რომ, მის კომბინირებას მომდევნო კონსტრუქციულ გადაწყვეტილებებთან შესაძლოა დადებითი შედეგები მოჰყვეს.

2.8. კონცეპტუალური საჰაერო ხრახნების კონსტრუქციები

კვლევის წინა ეტაპებმა და მათზე დაკვირვებებმა დაგვანახა, რომ საჰაერო ხრახნებში მათი კუთრი წვეის ძალის კოეფიციენტის და წარმოებული ხმაურის დონის გაუმჯობესებისთვის, ფრთოვანების ბოლოებში წარმოქმნილი ჰაერის დაგრიგალები შემცირება ერთად ერთი გზა არ არის (მიუხედავად იმისა რომ მათი სიდიდის და მდებარეობის კონტროლით გარკვეული შედეგების მიღწევა შესაძლებელი) და მრავალი ფაქტორია გასათვალისწინებელი. მაგალითად საჰაერო ხრახნის ფრთოვანას ცენტრალური ზონა, რაც ხრახნზე წარმოქმნილი საერთო ამწევი ძალის ძირითად შემადგენლად ითვლება, ერთი შეხედვით ფრთოვანას ამ ნაწილში თითქოს კონსტრუქციის ვარიანტების დიდი არჩევანი არ გვაქვს და იგი დამოკიდებულია საჰაერო ხრახნის ცენტრალურ და კიდურ ნაწილებზე, როგორც ერთგვარ გარდამავალი ნაწილი, თუმცა სინამდვილეში აქაც შეიძლება გარკვეული მანიპულაციების ჩატარება, ამის მაგალითები ბუნებაშიც მრავლად გვხვდება. მაგალითად შეგვიძლია მოვიყვანოთ კუზა ვეშაპი, მას ფარფლებზე, დინების შემხვედრი მიმართულებით, გააჩნია ერთგვარი წამონაზარდები/კოპები, რომლებიც მეცნიერთა და მკვლევართა თქმით მას მანევრულობაში ეხმარება, თეორიულად ამ ფარფლით წყლის გაკვეთისას კოპებზე ხდება მიკრო გრიგალური ზონების წარმოქმნა, რაც ასტაბილურებს ფარფლის მოსაზღვრე გარსშემომდენ წყლის შრეს და ვეშაპს საშუალებას აძლევს ფარფლები გაცილებით მაღალი შეტევის კუთხეებით მიმართოს, ვიდრე ეს ხსენებული წამონაზარდების გარეშე იქნებოდა შესაძლებელი. გარდა ამისა, უნდა აღინიშნოს თოლიასებრთა ჯიშის ფრინველთა ფრთების თავისებურებები, მათ ფრთებს დამახასიათებელი და განსხვავებული ფორმა აქვს. კერძოდ, თოლიას აქვს წვრილი და დიდი გაქანის მქონე ფრთები, რომლებიც გაქანის დაახლოებით 50% ის შემდეგ იცვლიან განივი მიმართულების კუთხეს და M ასო ბგერის მაგვარ სილუეტს ქმნიან. ფრთების ასეთი კონფიგურაცია იძლევა პლანირების მაღალ ხარისხს, ეს კი გადამწყვეტია მათი საცხოვრებელი პირობებიდან გამომდინარე. ვინაიდან თოლიებს დიდი ხნის განმავლობაში დიდ მანძილებზე უწევთ ზღვის თავზე გადაადგილება და სჭირდებათ რომ რაც შეიძლება მეტი ხანი დაჰყონ ჰაერში. აღნიშნული ფრთების კონსტრუქცია

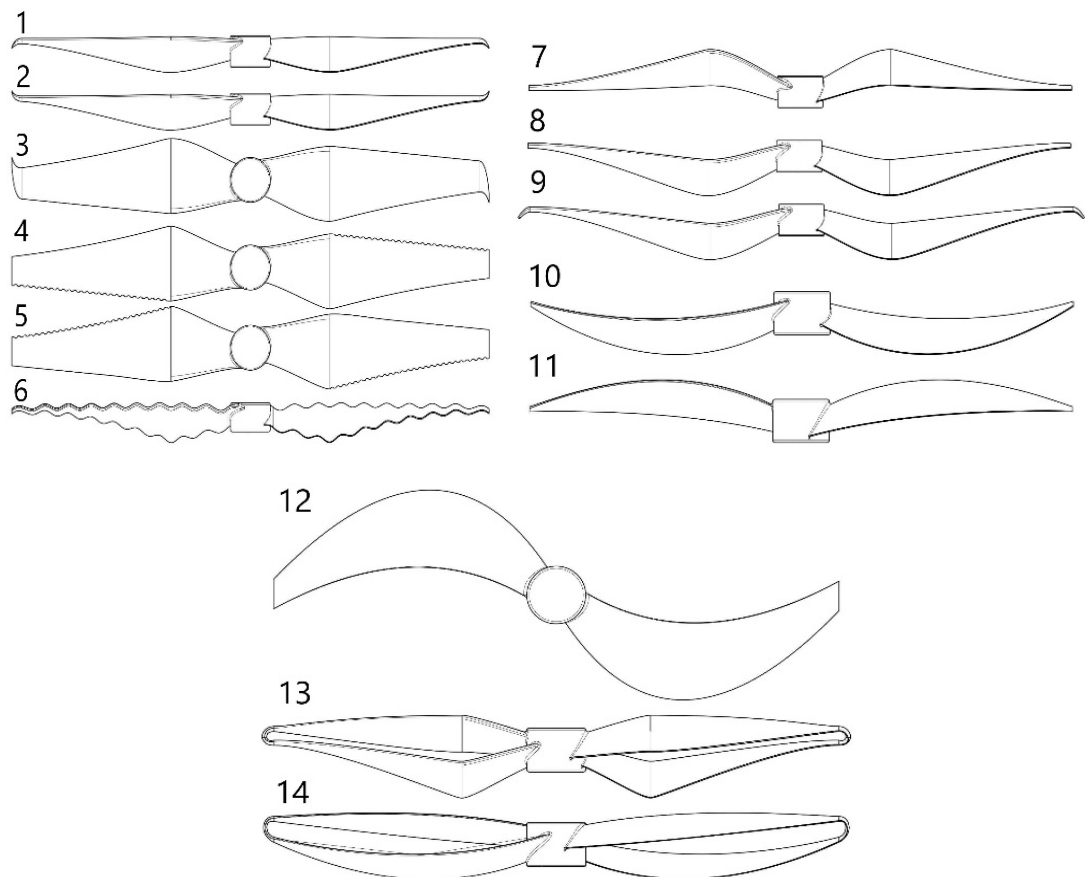
თვითმფრინავებში ხშირად გვხვდება. მაგალითად პლანერებში სადაც ფრთების მაღალი აეროდინამიკური ხარისხის ქონა გადამწყვეტია. ბუნების ამ მაგალითებით და მრავალი სამეცნიერო ნაშრომებისა თუ უბრალო აეროდინამიკური კონცეფციების გაანალიზების შემდგომ გადავწყვიტეთ შეგვემუშავებინა საჰაერო ხრახნის რამდენიმე კონცეპტუალური ვარიანტი და მათზე მოგვეხდინა კვლევების ჩატარება კომპიუტერული სიმულაციების გზით, რათა ზუსტად გაგვეგო თუ ფრთოვანას როგორი კონფიგურაცია იქნებოდა მიზანშეწონილი პერსპექტიული კვლევების შემდგომ ეტაპებზე ფოკუსირებისათვის. ამისათვის შევიმუშავეთ საჰაერო ხრახნის სრულიად განსხვავებული მეტად სტანდარტული მოდელი ვიდრე ეს კვლევის პირველ ეტაპზე იყო.

ეტალონური საჰაერო ხრახნის კონსტრუქცია მაქსიმალურად მიმსგავსებულია დღესდღეობით ბაზარზე წარმოდგენილ ხრახნებთან. იგი წარმოადგენს ორ რომბისებრ სწორ ფრთოვანიან კონსტრუქციას. ხრახნის დიამეტრი არის 24 სმ-ს შეტევის კუთხეები $R=4$ სმ არის 25 გრადუსი, $R=12$ სმ არის 7.2 გრადუსი. ფრთოვანას აეროდინამიკური ფორმა შედგება $R=4$ სმ-ზე NACA 6409 და $R=12$ სმ-ზე NACA 5408 აეროდინამიკური პროფილებით. ფრთოვანას მაქსიმალური ქორდა მდებარეობს რადიუსის $R=4$ სმ-ზე მნიშვნელობაზე და შეადგენს 37 მმ-ს (ნახ.2.21).



ნახ.2.21 ეტალონური ტრადიციული საჰაერო ხრახნი

ახალი მოდელის საჭაერო ხრახნი მეტწილად მიმსგავსებული იყო, დღესდღეობით ყველაზე გავრცელებული სამოქალაქო კომერციული უპილოტო საფრენი აპარატების, მწარმოებელი კომპანიის DJI-ს, მიერ თავის მოწინავე დრონებში გამოყენებულ საჭაერო ხრახნებთან. სადაც ფრთოვანას აეროდინამიკური პროფილის მაქსიმალური ქორდა მოთავსებულია ცენტრალურ ნაწილში და იგი შესამჩნევად მცირდება ფრთოვანას კიდურა ნაწილისკენ. საჭაერო ხრახნის ასეთი კონსტრუქცია ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებულია თანამედროვე მცირე ზომის ვერტიკალურად აფრენა-დაფრენად დისტანციურად პილოტირებად საფრენ აპარატებში, გამომდინარე მათ მიერ წარმოქმნილი ამწევი და წინაღობის ძალების ოპტიმალური თანაფარდობისა. ახალი მოდელის მიხედვით კი შევარჩიეთ შემდეგი ტიპის საჭაერო ხრახნების კონცეფციები (ნახ.2.22):



ნახ.2.22 კონცეპტუალური საჭაერო ხრახნები

ნახ.2.22-ზე მოყვანილი საჭაერო ხრახნების კონსტრუქციები:

1. **საჰაერო ხრახნი ბრუნვის სიბრტყისგან უკან გადახრილი მცირე პროპლექტით.** აღნიშნულ კონსტრუქციას რიგ საჰაერო ხრახნებში მოიხსენებენ როგორც Q-tip ფრთოვანას დაბოლოებას. ბაზარზე არსებობს რამდენიმე დაახლოებით ასეთი კონსტრუქციის მქონე ხრახნი რომლებსაც გარკვეული პროგრესი აქვთ ტრადიციულებთან შედარებით.
2. **საჰაერო ხრახნი ბრუნვის სიბრტყისგან წინ გადახრილი მცირე პროპლექტით.** აღნიშნული შეგვიძლია მივამსგავსოთ თვითმფრინავის ვინგლეტებს. იგი წარმოადგენს კვლევის წინა ეტაპზე შემუშავებული კონცეფციის შემცირებულ დახვეწილ ვარიანტს. პროპლექტები საჰაერო ხრახნის მაქსიმალური დიამეტრის საზღვრებშია მოქცეული და შეუმჩნეველად უცვლის კუთხეს ფრთოვანას ბოლოს ასევე უფრო მეტადაა წაგრძელებული ფრთოვანას უკან, ამან ფრთოვანას ბოლოში წარმოქმნილი გრიგალი უფრო მეტად უნდა მოაცილოს მუშა ზედაპირს.
3. **საჰაერო ხრახნი ფრთოვანა ბოლოში ისრისებურობით.** ფრთოვანას ბოლოში გააჩნიათ ბრუნვის საწინააღმდეგო მიმართულებით შევიწროვებადი დაბოლოება რომელიც არ იცვლის ფრთოვანას დაყენების დიჰიდრალურ კუთხეს და წაგრძელებულია ფრთოვანას უკან.
4. **საჰაერო ხრახნი ფრთოვანას წინა კიდეზე მატურბულიზირებელი შენაზარდებით.** აღნიშნული წარმოადგენს ერთგვარ სავარცხლისებრ კონსტრუქციას ფრთოვანას წინა ნაწილში. კონსტრუქციაში ფრთოვანას წინა კიდეზე განვახორციელეთ მცირე ზომის ამოჭრები (კონსტრუქცია შეიძლება მივამსგავსოთ სავარცხელს ან ხერხს), იმ ვარაუდით, რომ აღნიშნული იმოქმედებს როგორც ტურბულიზატორი და მოგვცეს შეტევის კუთხის გაზრდისა და ფრთოვანა ზედაპირზე სტაბილური ჰაერის ნაკადის შენარჩუნების საშუალებას. აღნიშნული კონცეფცია ფართოდ გამოიყენება სხვადასხვა აეროდინამიკურ ზედაპირებში.
5. **საჰაერო ხრახნი ფრთოვანას უკანა კიდეზე მატურბულიზირებელი შენაზარდებით.** ფრთოვანას უკიდურეს უკანა კიდეზე მოვახდინეთ მცირე რადიუსის ამოჭრები (ხერხის მაგვარად), რითიც შესაძლებელი იქნება

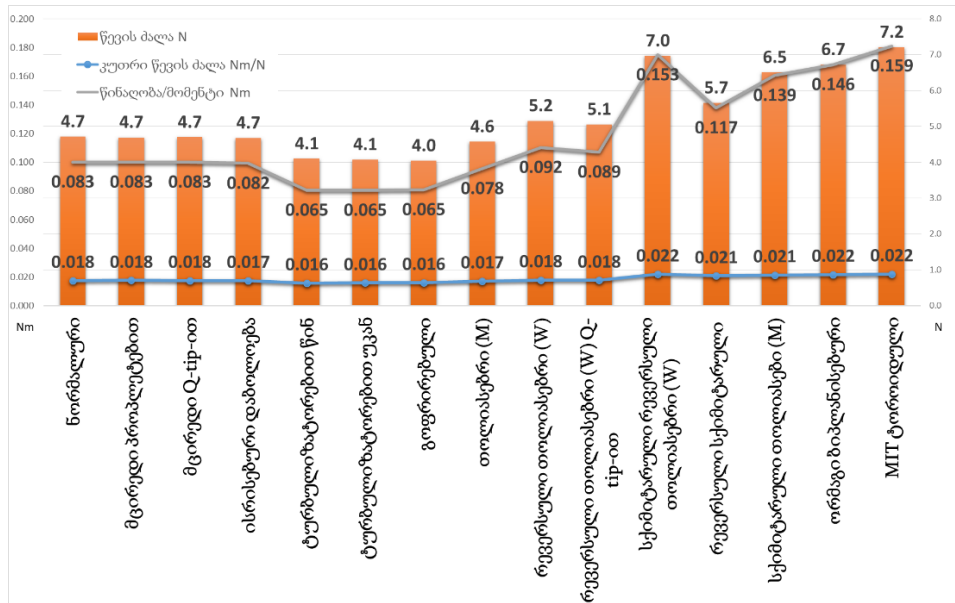
ფრთოვანას უკან მიკრო გრიგალური ზონრების წარმოქმნა და ამით ხელს შევეშლით დიდი ზომის გრიგალების წარმოქმნას.

6. **საჰაერო ხრახნი ფრთოვანას გოფრირებული (ზიგზაგური) კონსტრუქციით** ეს ერთგვარი რადიკალური ტურბულიზატორებიანი ხრახნების კონცეფციაა. საჰაერო ხრახნის ფრთოვანა წარმოადგენს გოფრირებულ (ზიგზაგისებურ) ზედაპირს წინხედში მაქსიმალური ამპლიტუდით 2 მმ. იდეის დონეზე, ასეთი ზედაპირი გვამღევს არხებს ფრთოვანას ზედაპირის გასწვრივ, რომლებშიც უნდა გადანაწილდეს ჰაერი და სტაბილური გარსშემოდენის ეფექტი მოგვცეს. აღსანიშნავია, რომ აეროდინამიკური ზედაპირის ასეთი ფორმა ინტერფერენციული წინაღობის წარმოქმნის მაღალი რისკის მატარებელია.
7. **საჰაერო ხრახნი ფრთოვანების თოლიასებრი განლაგებით.** აღნიშნული კონსტრუქცია ფართოდ გამოიყენება პლანერებშიც და დასახელება გამომდინარეობს მისი მსგავსებით თოლიას ფრთებთან. ასეთ საჰაერო ხრახნზე ფრთოვანა გარკვეული კუთხის გამოდის ბრუნვის სიბრტყიდან წინ და რადიუსის გარკვეულ მნიშვნელობაზე გარდატყდება და ბრუნდება ბრუნვის სიბრტყეში შედეგად კი ვიღებთ M-ის მაგვარ სტრუქტურას წინხედში, უნდა აღინიშნოს, რომ ფრთოვანას ასეთი გადაწყვეტა ზრდის ფრთოვანას გაქანს საჰაერო ხრახნის დიამეტრის გაზრდის გარეშე.
8. **საჰაერო ხრახნი ფრთოვანების რევერსული თოლიასებრი განლაგებით.** აღნიშნული კონსტრუქცია ხშირად გამოიყენება თვითმფრინავის ფრთებში, იგი წარმოადგენს თოლიასებრი ფრთების შებრუნებულ ვარიანტს, ისეთნაირად რომ წინხედში მოგვცეს W-ს მაგვარი სტრუქტურა. ფრთოვანას ასეთმა ფორმამ შესაძლოა მის ზედა ზედაპირზე წნევათა განაწილების განსხვავებული სურათი მოგვცეს.
9. **საჰაერო ხრახნი ფრთოვანების რევერსული თოლიასებრი განლაგებით და უკან გადახრილი პროპლეტებით.** აღნიშნულს Q-tip პროპლეტები აქვს დამატებული, ჩვენი აზრით ასეთი სინერგიული ჩანართი საჰაერო ხრახნის კუთრი წევის ძალის გაუმჯობესებას შეუწყობს ხელს.

10. **სქიმიტარული (ხმლისებრი) საჰაერო ხრახნი ფრთოვანების რევერსული თოლიასებრი განლაგებით.** აღნიშნული წარმოადგენს კარგად ცნობილი სქიმიტარული საჰაერო ხრახნის რევერსული თოლიასებრთან სინერგიის მცდელობას, გარკვეული სახეცვლილებებით. ამ შემთხვევაში, მკვეთი ტეხილები ფრთოვანას გასწვრივ არ გვაქვს და იგი გლუვად გადადის W-ს მაგვარ სტრუქტურაში. ზოგადად სქიმიტარული საჰაერო ხრახნები გამორჩეულია თავისი დადებითი ეფექტებით.
11. **სქიმიტარული საჰაერო ხრახნი ფრთოვანების თოლიასებრი განლაგებით.**
12. **რევერსული სქიმიტარული საჰაერო ხრახნი.** ამ შემთხვევაში მოხრილი ფრთოვანა მიისწრაფვის ბრუნვის მიმართულებით.
13. **საჰაერო ხრახნი ორმაგი ბიპლანისებური ფრთოვანით,** აღნიშნულ საჰაერო ხრახნზე შეიძლება ჩავთვალოთ რომ გაორმაგებული აქვს ფრთოვანების რიცხვი და ამიტომ გაორმაგებულ ამწევ ძალას მივიღებთ, თუმცა პრაქტიკიდან ვიცით, რომ ფრთოვანების რიცხვის გაზრდა იგივე პროპორციით არ ზრდის საჰაერო ხრახნის ამწევ ძალას, წინააღობის ძალისგან განსხვავებით. ასე, რომ ამ ტიპის ხრახნებისგან უნდა ველოდოთ საგრძნობ აეროდინამიკური წინააღობის ძალის მატებას. უნდა აღინიშნოს, რომ ფრთოვანების გადაბმის ადგილებში მაღალია ინტერფერენციული წინააღობის რისკი, რაც დამატებით გაზრდის საჰაერო ხრახნის წინააღობას. ხრახნის კონცეპტი მიმსგავსებულია ტოროიდული საჰაერო ხრახნის კონცეფციასთან გარკვეული გეომეტრიული განსხვავებებით.
14. **MIT მიერ შემუშავებული ტოროიდული საჰაერო ხრახნის.** მასაჩუსეტსის ტექნიკურ ინსტიტუტში შეიმუშავეს და წარმოადგენს შეკრული ფრთოვანას მქონე კონსტრუქციას. ხრახნის ძირითად უპირატესობას, მათი თქმით, დაბალი ხმაური და ამაღლებული ეფექტურობა წარმოადგენს.

კონცეფციურ საჰაერო ხრახნთა ძირითადი გეომეტრიული პარამეტრები (ხრახნის დიამეტრი; შეტევის კუთხეები; აეროდინამიკური პროფილები) ერთი და იგივე იყო ყველა მოდელისთვის.

აღნიშნულ საჰაერო ხრახნებზე ჩატარდა მრავლობითი კომპიუტერული სიმულაციები. სიმულაციები ტარდებოდა 6000 ბრ/წთ ბრუნვის სიჩქარეზე და ძირითად გასაზომ პარამეტრებს წარმოადგენდა: წვეის ძალა N-ნიუტონი; მაბრუნე მომენტი Nm- ნიუტონ-მეტრი; და მათგან წარმოებული სიდიდე ეფექტურობის გასაზომად Nm/N ანუ 1N წვეის ძალის მისაღებად დახარჯული Nm მომენტი. სიმულაციების შედეგები მოცემულია გრაფიკზე (ნახ.2.23).



ნახ.2.23 კომპიუტერული სიმულაციების შედეგად მიღებული საჰაერო ხრახნების პარამეტრების გრაფიკი

აღნიშნულ გრაფიკზე დაკვირვებით შეგვიძლია გამოვიტანოთ მარტივი დასკვნები: გრაფიკიდან ჩანს, რომ გამოცდილ ხრახნთაგან ყველაზე მაღალი წვეის ძალა დააფიქსირეს სქიმიტარულმა ხრახნმა რევერსულ თოლიასებრი ფრთოვანებით, სქიმიტარულმა ხრახნმა თოლიასებრი ფრთოვანებით, ბიკონისებურმა ხრახნმა ორმაგი ფრთოვანით და ტორიდიულმა საჰაერო ხრახნმა. მათ დაახლოებით 30% ით გაზარდეს ამწევი ძალა ტრადიციულ საჰაერო ხრახნთან შედარებით, რაც ერთი შეხედვით იმედის მომცემია, მაგრამ თუ გრაფიკს დავაკვირდებით დავინახავთ რომ ამწევი ძალის გაზრდასთან ერთა მათმა წინაღობის მაბრუნე მომენტმაც საგრძნობლად იმატა, რაც საბოლოოდ კუთრ მახასიათებლებზე და საჰაერო ხრახნის ეფექტურობაზე მოახდენს უარყოფით გავლენას. შესაბამისად გვექნება, რომ რეალურად საჰაერო ხრახნები აჩვენებენ

გარკვეული პარამეტრის გაუმჯობესებას, თუმცა მათი არაეფექტურობის გამო, ამას აზრი ეკარგება. მართლაც, თუ გადავხედავთ გრაფიკს დავინახავთ, რომ ამ უკანასკნელთა კუთრი წვევის მახასიათებელი ზედმეტად მაღალია, ანუ მათი გამოყენება არ იქნება მიზანშეწონილი, რადგან ამით გაიზრდება ენერჯის მოხმარება, შემცირდება ფრენის დრო, დაიტვირთება ძალური დანადგარი და სხვა. აღნიშნული ორმაგ ფრთოვანი და ტოროიდული საჰაერო ხრახნების ამწევი ძალის ზრდის მიზეზი ნათელია, მათ შემთხვევაში შეგვიძლია ჩავთვალოთ, რომ ფრთოვანების გაორმაგებული რაოდენობები გვაქვს და ეს, რათქმაუნდა, გამოიწვევდა ამწევი ძალის და წინაღობის მომენტის გაზრდას. თუმცა, სქიმიტარული საჰაერო ხრახნების შემთხვევაში მათი პარამეტრების ცვლილებების მიზეზი არც თუ ისე ნათელია და მომავალ გამოკვლევებს საჭიროებს.

ზემოთხსენებულ საჰაერო ხრახნთა მსგავსად, უნდა აღინიშნოს რვეერსულ თოლიასებრი (W) საჰაერო ხრახნის და მისი Q-tip-ებიანი ვარიანტის ამწევი ძალის საგრძნობი ზრდა ტრადიციულ საჰაერო ხრახნთან შედარებით, რაც დაახლოებით 20%-ს შეადგენს. თანაც, ეს იმის ფონზე, როდესაც მათი წინაღობის მომენტი წინანდელივით რადიკალურად არ გაუარესებულა და კუთრი წვევის ძალის კოეფიციენტიც არც თუ ისე საგანგაშო ფარგლებშია. შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ტრადიციულ ხრახნთან შედარებით, მათი ეფექტურობა უცვლელი რჩება. თუმცა, გაზრდილი ამწევი ძალის წყალობით ტრადიციული საჰაერო ხრახნი უკან ჩამორჩება, როდესაც ერთი და იგივე დიამეტრის ჭრილში განვიხილავთ ამ ხრახნებს. ანუ ხრახნის შეზღუდული დიამეტრის შემთხვევაში W ფორმის საჰაერო ხრახნის მეტ წვევის ძალას გვადლევს დანარჩენი პარამეტრების გაუარესების გარეშე. აღნიშნულ საჰაერო ხრახნთა ამწევი ძალის ასეთი ზრდის მიზეზი ბუნდოვანია და მეტ გამოკვლევას საჭიროებს, თუმცა ჩვენი აზრით, ფრთოვანას ასეთი ფორმა ხელს უნდა უწყობდეს დაბალი წნევის ბალიშის ფორმირებას ფრთოვანას ზედა ზედაპირზე, ამით იზრდება ამწევი ძალის მნიშვნელობა.

ასევე გრაფიკზე ყურადღება მისაქცევია ტურბულიზატორებიანი საჰაერო ხრახნების შედეგებიც: მათ სიმულაციებისას ყველაზე დაბალი ამწევი ძალის მნიშვნელობები აჩვენეს, თუმცა ასევე რადიკალურად მცირეა მათი წინაღობის

მომენტი. საბოლოოდ კი ასეთი ხრახნებს ყველაზე უკეთესი კუთრი წევის მახასიათებლები აქვთ. აღნიშნული საჰაერო ხრახნების ასეთი დაბალი წინაღობის მომენტის მიზეზი უნდა იყოს ტურბულიზატორების მიერ წარმოქმნილი მიკრო გრიგალური ზონრების მიერ დასტაბილურებული გარსშემომდენი ჰაერი ფრთოვანაზე და მის უკან. ვინაიდან, ჰაერის არასტაბილურობა-მაღალტურბულენტურობა არის გაზრდილი აეროდინამიკური წინაღობის ძალის მიზეზი.

დანარჩენი საჰაერო ხრახნების სიმულაციებიდან მიღებული პარამეტრები უარესია ზემოთ განხილულ საჰაერო ხრახნთა პარამეტრებთან შედარებით.

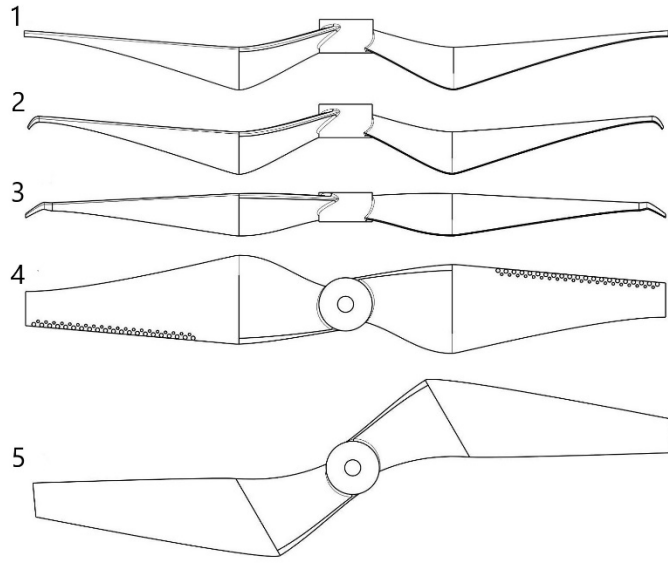
2.9. კვლევისას მიღებული საჭაერო ხრახნების პერსპექტიული

კონცეფციები

სადოქტორო კვლევის საბოლოო, დასკვნითი ეტაპი წარმოადგენდა დაგროვილი გამოცდილებით და კომპიუტერული სიმულაციებით შერჩეულ ყველაზე პერსპექტიული საჭაერო ხრახნების კონსტრუქციების სრულყოფილი ანალიზისა და გამოცდების განხორციელების საფეხურს. ამ ეტაპზე გაკეთდა დასკვნები თუ რამდენად ჩანაცვლებადი იყო დღესდღეობით არსებული, ტრადიციული კონსტრუქციის საჭაერო ხრახნები კონცეპტუალური კონსტრუქციის მოდელებით.

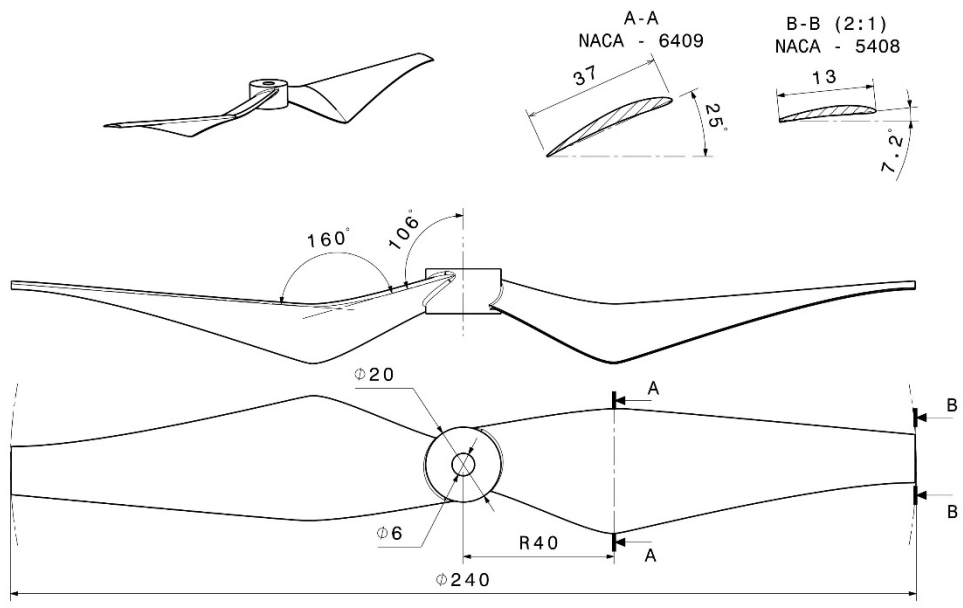
სამეცნიერო შედეგების გასამყარებლად და მათი საიმედოობის გაზრდის მიზნით კვლევის ბოლო ეტაპისთვის არჩევანი გაკეთდა საჭაერო ხრახნის 5 ძირითად კონსტრუქციაზე, რომელთა კონსტრუქციების მოდერნიზებითა და ოპტიმიზაციის შედეგად დაიგეგმა მრავლობითი კომპიუტერული სიმულაციური გამოცდები. პრაქტიკაში ფართოდ გავრცელებული საჭაერო ხრახნის გარდა საბოლოო ოპტიმიზაციის შედეგად შერჩეული კონსტრუქციები ასე ჩამოყალიბდა (ნახ.2.24):

1. რევერსულ თოლიასებრი საჭაერო ხრახნი;
2. რევერსულ თოლიასებრი საჭაერო ხრახნი პროპლეტებით (Q-tip დაბოლოებით);
3. საჭაერო ხრახნი ოპტიმიზებული პროპლეტებით;
4. საჭაერო ხრახნი ფრთოვანას წინა კიდეზე მატურბულიზებული წანაზარდებით;
5. საჭაერო ხრახნი ფრთოვანების ისრისებურობით.



ნახ.2.24 კვლევისას მიღებული საჰაერო ხრახნების ყველაზე პერსპექტიული კონსტრუქციები

2.9.1. რევერსულ თოლიასებრი საჰაერო ხრახნი



ნახ.2.25 საჰაერო ხრახნი ფრთოვანების რევერსულ თოლიასებრი განლაგებით

რევერსულ თოლიასებრი ფრთოვანების მქონე საჰაერო ხრახნს, ტრადიციულისგან განსხვავებით, გააჩნია არაწრფივი, ბრუნვის სიბრტყიდან მკვეთრად გამოწეული უბნების მქონე ფრთოვანები. ფრთოვანა ცენტრალური

სხეულიდან გამოდის გარკვეული კუთხით გადახრილი (106 გრადუსი) ბრუნვის სიბრტყის უკანა (ფრენის საწინააღმდეგო) მიმართულებით და, რადიუსის $R=40$ მმ მნიშვნელობაზე, კვლავ გადაიხრება (160 გრადუსით) ბრუნვის სიბრტყისკენ. საჰაერო ხრახნის საერთო ფორმა წინხედში წააგავს ასო W-ს (ნახ.2.25). საჰაერო ხრახნის სხვა ყველა დანარჩენი გეომეტრიული პარამეტრი (შეტევის კუთხეები; დიამეტრი და ა.შ.) ეტალონური მოდელის იდენტურია.

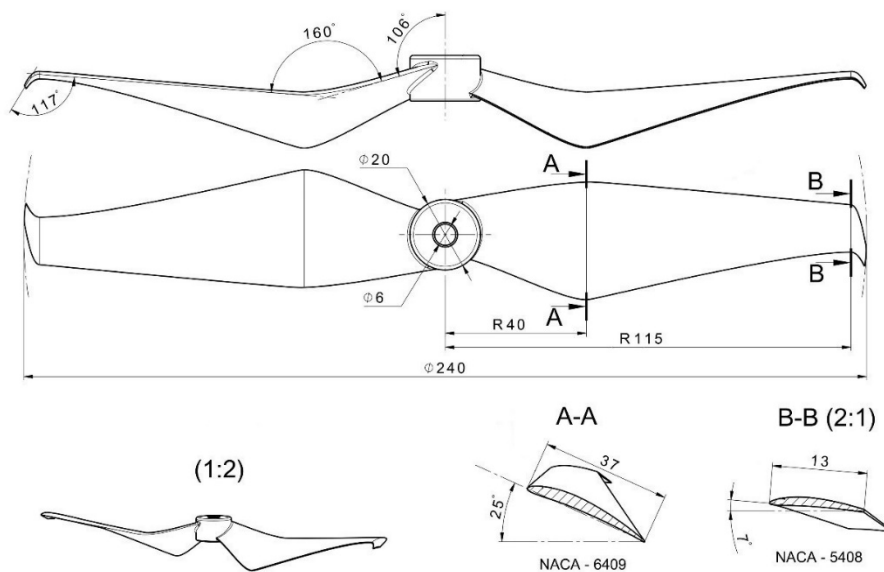
ასეთი ფორმის ფრთები თვითმფრინავებშიც გამოიყენება და მას ფრთების რევერსულ თოლიასებრ განლაგებას უწოდებენ, ვინაიდან ფრთების ტეხილი ფორმა ძალზედ წააგავს თოლიას ფრთების ფორმას. თავდაპირველად ასეთი ფრთის ფორმა გამოიყენეს მეორე მსოფლიო ომის პერიოდის თვითმფრინავებში, მაგალითად როგორც იყო F4U Corsair ერთ-ერთი გამოჩენილი თვითმფრინავი ამ დროისთვის, აღნიშნული მოდელი გამოირჩეოდა მაღალი მანევრულობით დიდ სიჩქარეებზე. თუმცა, ფრთების ასეთი კონფიგურაციის დანიშნულება თვითმფრინავებში არა თუ აეროდინამიკური მახასიათებლების გაუმჯობესებას, არამედ თვითმფრინავის ტექნოლოგიურობასთან უფრო იყო დაკავშირებული. რევერსულ თოლიასებრი ფრთების მქონე თვითმფრინავებში შასი გამოდიოდა უფრო მცირე ზომის და წონის, ხოლო საჰაერო ხრახნი კი მიწიდან უსაფრთხო მანძილზე ბრუნავდა.

იმის მიუხედავად, რომ ფრთების აღნიშნული კონსტრუქცია საწყის ეტაპზე აეროდინამიკური გაუმჯობესებისთვის არ გამოიყენებოდა, მას უამრავი დადებითი მხარე გააჩნია რომელიც შეიძლება გათვალისწინებული იქნას საჰაერო ხრახნის ფრთოვანებისთვისაც. შებრუნებულ თოლიასებრი, არაწრფივი, ფრთა განაპირობებს, ფრთის ფართობის ნაზრდს სწორ ფრთასთან შედარებით. ამ დამატებით ფართობზე შესაძლოა წარმოიქმნას დამატებითი ამწევი ძალა. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ფრთების ვერტიკალთან არაპერპენდიკულარული ორიენტაციის გამო, ბერნულის პრინციპზე დაფუძნებული, ამწევი ძალის ტრადიციული გაგებით, ფრთაზე წარმოქმნილი ამწევი ძალის ვერტიკალური გეგმილი და შესაბამისად ამწევი ძალა არ უნდა შეიცვალოს. თუმცა აღნიშნული განლაგება გაზრდილი ფართობის ხარჯზე წესით უნდა ახდენდეს ფრთის ზედა დაბალი წნევის არის მოცულობის ზრდას. ეს კი შეგვიძლია განვიხილოთ როგორც

არე, რომლის შევსებასაც (შეწოვასაც) ცდილობს ატმოსფერო. შესაბამისად ამ არესთან ერთად, წესით გადაადგილდება ფრთაც, რაც ამწევი ძალის გამოვლინებაა. შესაბამისად, ამ კუთხით შეიძლება განვიხილოთ ამწევი ძალის გაზრდის შესაძლებლობა. გარდა ამისა, ასეთი ტიპის ფრთებს განიხილავენ ეფექტურ საშუალებად ფრთიდან ჰაერის მოწყვეტის საწინააღმდეგოდ დაბალ სიჩქარეებზე, ფრთის დიჰიდრალური-დახრილი ორიენტაციის წყალობით. გარდა ამისა, განიხილება შებრუნებულ თოლიასებრი ფრთების პოტენციალი, ფრთის ბოლოებში წარმოქმნილი გრიგალების შემცირების და მათგან გამოწვეული წინაღობის შემცირების შესახებ. აღნიშნული შეიძლება მიღწეული იქნეს ფრთის ბოლოში წნევათა დიფერენციალის შემცირებით, რაც გამოწვეულია ფრთის დახრილობით. გარდა ამისა, ფრთის ასეთი ორიენტაციის გამო ხდება ფრთის ბოლოში წარმოქმნილი გრიგალის გარკვეულ წილად არიდება ფრთის უკან დაცვრებულ ჰაერის ნაკადთან, ეს კი ინდუქციური წინაღობის შემცირების საფუძველია.

ყველა ზემოთხსენებული მახასიათებელი თოლიასებრი ტეხილი ფრთებისა შესაძლოა გადმოტანილი იქნეს საჰაერო ხრახნებშიც.

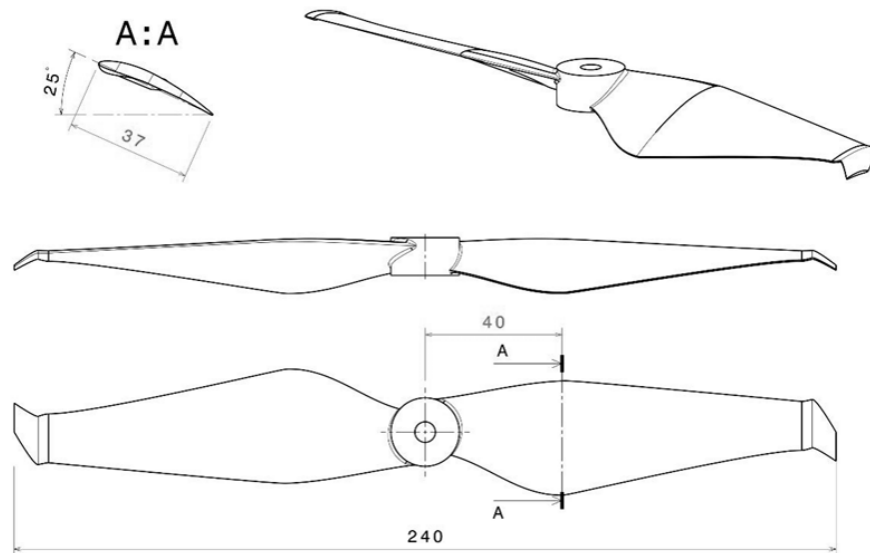
2.9.2. რევერსულ თოლიასებრი საჰაერო ხრახნი პროპლეტებით



ნახ.2.26 საჰაერო ხრახნი თოლიასებრი ფრთოვანებით და Q-tip პროპლეტებით

საჭაერო ხრახნი რევერსულ თოლიასებრი ფრთოვანებით და Q-tip პროპლეტებით წარმოადგენს ამ პერსპექტიული დამოუკიდებელი კონსტრუქციების სინერგიულ შერწყმას, სადაც თოლიასებრი ფრთოვანების ყველა დადებით თვისებას განამტკიცებს და გააუმჯობესებს Q-Tip პროპლეტი. ტერმინი პროპლეტი (proplet) გამოიყენება საჭაერო ხრახნის ფრთოვანას ბოლოვანა მოწყობილობის აღსაწერად, როგორც ეს თვითმფრინავის ფრთებშია - ვინგლეტი. საჭაერო ხრახნს დამატებული პროპლეტების მიუხედავად შენარჩუნებული აქვს საბაზისო დიამეტრი. თავად ფრთოვანას ასეთი დაბოლოება ისედაც პერსპექტიულ თოლიასებრ კონსტრუქციას დაეხმარება ხმაურის და წინალობის შემცირებაში.

2.9.3. საჭაერო ხრახნი ფრთოვანას ოპტიმიზებული დაბოლოებით



ნახ.2.27 საჭაერო ხრახნი ფრთოვანას ოპტიმიზებული დაბოლოებით

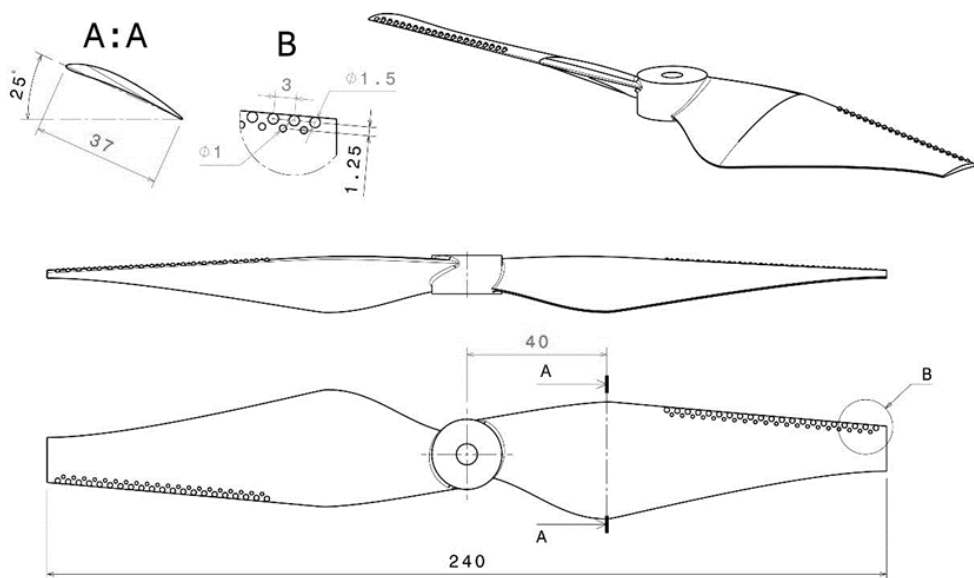
რაც შეეხება საჭაერო ხრახნი ფრთოვანას ოპტიმიზებული დაბოლოებით მოდელს, იგი შეიცავს ფრთოვანას ბოლოში დამატებულ ე.წ. პროპლეტს, რომელიც ფრთოვანას წინა კიდიდან გამოყოფილია მცირე კუთხით და შემდგომ მაღალი ისრისებურობის ხარისხი გადახრილია ბრუნვის საწინააღმდეგოდ. აღნიშნული კონსტრუქცია გარკვეულწილად ჰგავს გავრცელებულ Q-tip დაბოლოებას, თუმცა ამ შემთხვევაში ქვემოთ გადახრის ხარისხი გაცილებით დაბალია. ფრთოვანას დაბოლოების ასეთი ფორმა თეორიულად საშუალებას იძლევა Q-tip

პროპლეტებთან შედარებით შემცირებული იქნეს აეროდინამიკური წინაღობა, ზედაპირის ფართობის შემცირების ხარჯზე, რასაც მცირე გადახრის კუთხე გვაძლევს. ამავდროულად, დაბოლოების საშუალებით შესაძლებელია ბოლოებში წარმოქმნილი გრიგალების შემცირება და მოშორება ფრთოვანიდან, რასაც დაბოლოების მაღალი ისრისებურობა და ქვემოთ გადახრა უზრუნველყოფს.

აღნიშნული სახის ფრთოვანების დაბოლოებები ფართოდ გამოიყენება შვეულმფრენების საჰაერო ხრახნებში ფრთოვანას ბოლოში გრიგალების შესამცირებლად და ხრახნის ენერგოეფექტურობის გასაზრდელად.

2.9.4. საჰაერო ხრახნი ტურბულიზატორებით ფრთოვანას წინა

ნაწილში



ნახ.2.28 საჰაერო ხრახნი ფრთოვანას წინა ნაწილში ტურბულიზატორებით

საჰაერო ხრახნი ფრთოვანას წინა ნაწილში ტურბულიზატორებით. საჰაერო ხრახნს ფრთოვანა ზედა ზედაპირზე, წინა კიდის გასწვრივ გააჩნია ზედაპირიდან ამოზნექილი რეგიონები (ნახ.2.28), ერთგვარი ბუსუსები, რომლებიც ტურბულიზატორების მოვალეობას ასრულებენ. თავად ტურბულიზატორების დანიშნულებას წარმოადგენს, წარმოქმნას მიკრო გრიგალური ზონრები ფრთოვანას ზედაპირის გადასწვრივ, რაც განამტკიცებს ზედაპირის მოსაზღვრე შრეს და

თავიდან აგვაცილებს შრის განცალკევებას ან ნაკადის მოწყვეტას ფრთოვანიდან. ჰაერის ნაკადის მოწყვეტის შედეგად, ფრთის უკან წარმოიქმნება მასიური ტურბულენტური ზონა, რომელიც კარდინალურად ამცირებს ამწევ ძალას და ზრდის წინაღობის ძალას, ასევე ამ ზონის გამო იზრდება ხმაური. ამ მოვლენის ძირითადი გამომწვევი ფრთოვანაზე შეიძლება იყოს მაღალი შეტევის კუთხე და/ან მაღალი ჰაერის სიჩქარე, შესაბამისად, მისი კონტროლით საშუალება გვეძლევა გავზარდოთ ჰაერის სიჩქარე და შეტევის კუთხეები.

ტურბულიზატორები (vortex generators) აქტიურად გამოიყენება თვითმფრინავის ფრთებზეც. ამ შემთხვევაში ისინი დანიშნულებიდან გამომდინარე წარმოადგენენ სტრუქტურულ დანამატს ფრთებისთვის და, როგორც აღვნიშნეთ, გამოიყენებიან ფრთის მოსაზღვრე შრის მართვისთვის, ჰაერის ნაკადის მოწყვეტის თავიდან ასაცილებლად. თვითმფრინავებში ტურბულიზატორების საშუალებით აღწევენ: გაზრდილ ამწევ ძალას და ამწევი ძალის კოეფიციენტს, მოწყვეტის საწინააღმდეგო მახასიათებლებს და უკეთეს მართვადობას დაბალ სიჩქარეებზე.

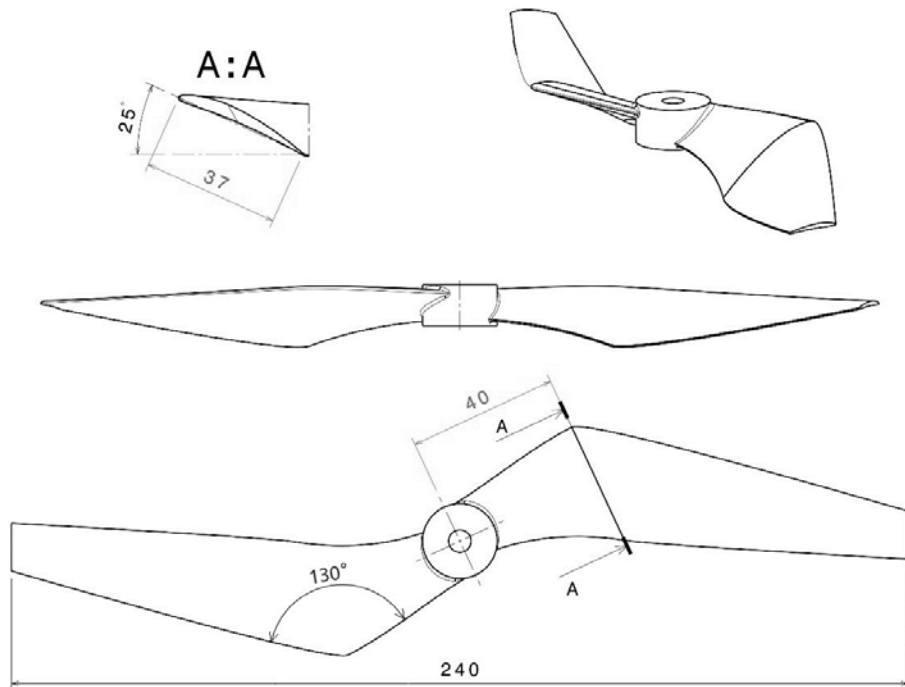
მსგავსი სახის აეროდინამიკური გადაწყვეტები ბუნებაშიც მრავლად გვხვდება, მაგალითად შეგვიძლია მოვიყვანოთ ბუ, ფრინველი რომელიც გამოირჩევა უხმაურო ფრენით. ბუს საცხოვრებელი გარემოდან და ნადირობის სტილიდან გამომდინარე, აუცილებელია ფრენისას მაქსიმალურად ნაკლები ხმა გამოიციმოდეს. იგი ნადირობს ღამის განმავლობაში რა დროსაც ძალზედ მცირე ხმაურია გარემოში და უმნიშვნელო ბგერაც კი მსხვერპლის ყურადღების მიქცევას იწვევს. მართლაც არაერთი ექსპერიმენტი ცხადჰყოფს იმას, რომ ეს ფრინველები, სხვებისგან განსხვავებით, ძალზედ ჩუმად დაფრინავენ. ამის საიდუმლო მათი ფრთების და ბუმბულების სტრუქტურაშია. ბუს ფრთის წინა და უკანა ნაწილში განლაგებულ ბუმბულებს კიდეზე გააჩნიათ სავარცხლისებული ერთგვარ ტურბულიზატორების მსგავსი სტრუქტურა, რაც იწვევს ფრთის ზედაპირზე და მის უკან მიკრო გრიგალური ზონების წარმოქმნას. ეს ზონები, თავის მხრივ, იწვევენ ფრთის მოძრაობით მიღებული აგრიგალელებული ჰაერის მასის დასტაბილურებას და პატარა სექციებად დაშლას, რას წარმოქმნილი ხმაურის შემცირებას იწვევს. ასევე

ბუს ბუმბულები ძალზედ ფაფუკი და ფოროვანი კონსტრუქციისაა, რაც ასევე ხმაურის შემამცირებელ თვისებად ითვლება.

გარდა ზემოთაღნიშნულისა, ტურბულიზატორების თვისების მსგავსი ფორმა გვხვდება კუზა ვეშაპის ფარფლებიც. ფარფლის წინა კიდეზე განლაგებულია კოპები (ბუსუსები), რომლებიც მკვლევართა აზრით მათ მანევრულობაში და ცურვაში ეხმარებიან.

გამომდინარე აქედან შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ასეთი კონსტრუქციების გამოყენებამ საჰაერო ხრახნების ფრთოვანებში შესაძლებელია მოგვცეს შემცირებული ხმოვანი და გაუმჯობესებული ეფექტურობის მახასიათებლები.

2.9.5. საჰაერო ხრახნი ფრთოვანას ისრისებურობით



ნახ.2.29 საჰაერო ხრახნი ფრთოვანას ისრისებურობით

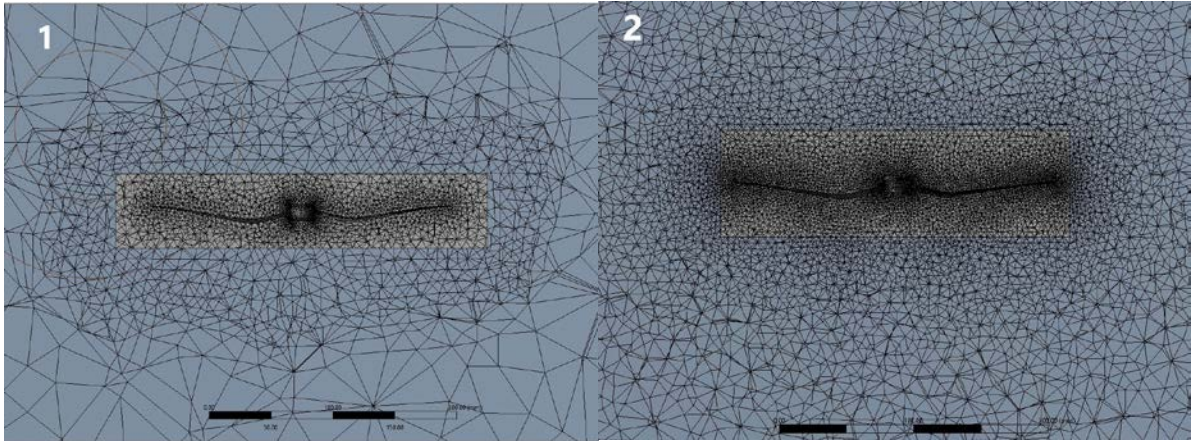
2.10. მეორე თავის დასკვნები

- გაანალიზდა და შეირჩა კვლევის პროცესისთვის საჭირო თანამედროვე პროგრამული პაკეტი. შემუშავდა საპაერო ხრახნების მოდელების აგების და დამუშავების მეთოდი.
- შეირჩა და გაანალიზდა პროგრამა კომპიუტერული სიმულაციებისთვის. შემუშავდა კვლევის პროცესზე მორგებული სიმულაციის დაგეგმარების მოდელი.
- კვლევის მიზნის მიღწევისთვის შემუშავდა საპაერო ხრახნების კონცეპტუალური მოდელები, მათზე განხორციელდა კომპიუტერული სიმულაციები და შეირჩა საპაერო ხრახნთა 5 საუკეთესო მოდელი ამაღლებული კუთრი პარამეტრებით.
- დეტალურად იქნა განხილული თავში შერჩეული საპაერო ხრახნების კონსტრუქციები და გაანალიზებული იქნა მათი გაუმჯობესებული მახასიათებლების მიზეზები.

თავი III საჰაერო ხრახნების სიმულაციური და ექსპერიმენტული კვლევა და მიღებული შედეგების ანალიზი

3.1. კომპიუტერული სიმულაციები შერჩეულ პერსპექტიულ კონსტრუქციებზე

ზემოთაღნიშნულ საჰაერო ხრახნებზე სადოქტორო კვლევის განმავლობაში განხორციელდა მრავლობით კომპიუტერული სიმულაცია, რომელთა მიზანს წარმოადგენდა, სიმულირებულ საჰაერო ხრახნთა ოპტიმიზაციისთვის, გასაუმჯობესებელი პარამეტრების დადგენა და ამ პარამეტრების ზვრების დაწესება. სიმულაციები ტარდებოდა დღესდღეობით ერთ-ერთ ყველაზე ზუსტ და სანდო ციფრულ გამოთვლით პროგრამაში Ansys workbench ვერსია 19.2, მისი გამოთვლითი ჰიდროდინამიკის მოდულის Fluent-ის გამოყენებით. აღნიშნულ პროგრამაში დიდი სიზუსტით ვახდენდით კომპიუტერული სიმულაციების ჩატარებას შერჩეული მოდელებისთვის. უნდა აღინიშნოს რომ კვლევის წინა საფეხურებთან შედარებით, სიმულაციებისთვის ვიყენებდით გამოთვლის დაგეგმარების და მომზადების, გარკვეულწილად, გაუმჯობესებულ - ოპტიმიზებულ მეთოდს, რომლის წყალობითაც მიღებული შედეგები იყო უფრო ზუსტი და გამოთვლის დროც შედარებით ნაკლები იხარჯებოდა. აღნიშნულს მივაღწიეთ სასრულ ელემენტთა ბადის განსხვავებული მეთოდით აგების საშუალებით, სადაც წინა საფეხურისგან განსხვავებით, ბადის ორი რეგიონის ნაცვლად გამოვიყენეთ მხოლოდ ერთი რეგიონი, ყველა საპასუხისმგებლო ზონის შენარჩუნების პარალელურად. ასევე სასრულ ელემენტთა ბადის სიმჭიდროვე გაცილებით მაღალი ხარისხის იყო, რაც განაპირობებს მიღებული შედეგების მაღალ სიზუსტეს (ნახ.3.1).



ნახ.3.1 1) კვლევის წინა საფეხურებზე სიმულაციებისთვის გამოყენებული სასრულ ელემენტთა ბადე; 2) ოპტიმიზებული სასრულ ელემენტთა ბადე

სიმულაციების შედეგად მეტად საინტერესო შედეგები მივიღეთ. შესადარებელ პარამეტრებს წარმოადგენდა საჰაერო ხრახნის მიერ შექმნილი წვეის ძალა, რომელსაც განვსაზღვრავდით ნიუტონებში (N), საჰაერო ხრახნის დაბრუნებისთვის საჭირო მბრუნე მომენტი, რაც შეიძლება განვიხილოთ როგორც ხრახნის მიერ შექმნილი წინაღობა, მას განვსაზღვრავდით ნიუტონ მეტრის (Nm) საშუალებით და ზედაპირზე წარმოშობილი ხმაურის მნიშვნელობები განისაზღვრებოდა დეციბელის (dB) საშუალებით. სიმულაციები ტარდებოდა 6000 ბრ/წთ ბრუნვის სიჩქარით. სიმულაციების შედეგად მიღებული შედეგები მოყვანილია ცხრილში:

ცხრ.3.1 სიმულაციებით მიღებული შედეგები

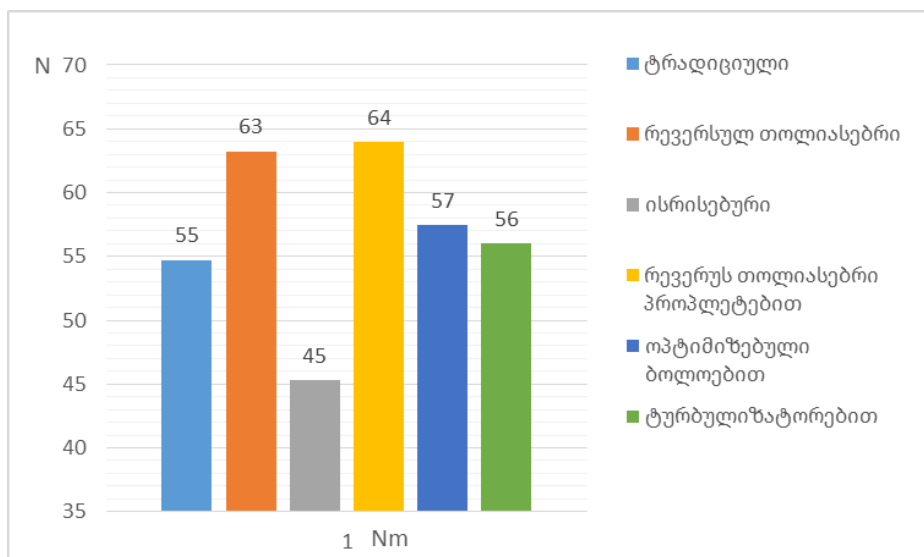
ბრ/წთ	ტრადიციული			რევერსულ თოლიასებრი			ისრისებური		
	Nm	N	dB	Nm	N	dB	Nm	N	dB
6000	0.095	5.2	100	0.068	4.3	97	0.148	6.7	95
	რევერსულ თოლიასებრი პროპლეტებით			ოპტიმიზებული პროპლეტებით			ტურბულიზატორებით		
	Nm	N	dB	Nm	N	dB	Nm	N	dB
6000	0.061	3.9	96	0.09	5	105	0.091	5.1	92

როგორც ცხრილიდან ვხედავთ, კომპიუტერული სიმულაციების შედეგად მაქსიმალური ამწევი ძალა მოგვცა საჰაერო ხრახნმა ისრისებური ფრთოვანებით, ხოლო მინიმალური კი რევერსულ თოლიასებრმა ხრახნებმა. დანარჩენებმა ამწევი

ძალის თვალსაზრისით, მეტნაკლებად ერთნაირი შედეგები დააფიქსირეს. თუმცა აქ ყურადღება გასამახვილებელია სიმულაციების შედეგად მიღებული მაბრუნის მომენტის (Nm-ნიუტონ მეტრი) მნიშვნელობაზე. ანუ ძალისა, რომელიც საჭიროა ხრახნის დასაბრუნებლად და შესაბამისად შეგვიძლია წარმოვადგინოთ როგორც წინაღობა. შესაბამისად, რაც უფრო ნაკლებია პარამეტრი მით მცირეა ხრახნის აეროდინამიკური წინაღობა და ნაკლები ძალა/ენერჯიაა მისი დაბრუნებისთვის საჭირო. აღნიშნული პარამეტრით ასევე ყველაზე დიდი მნიშვნელობა მოგვცა ისრისებური ფრთოვანების მქონე ხრახნმა და ყველაზე მცირე რევერსულ თოლიასებრმა კონსტრუქციებმა, დანარჩენებმა ამ შემთხვევაშიც მეტნაკლებად ერთნაირი შედეგები აჩვენეს.

ავიაციაში კერძოდ დრონებში, საჭაერო ხრახნების შესაფასებელ ერთ-ერთ პარამეტრს წარმოადგენს საჭაერო ხრახნის ეფექტურობა, ანუ რამდენი ენერჯია დაიხარჯა გარკვეული წევის მისაღებად, ჩვენს შემთხვევაში რა ძალა დაიხარჯა ამ წევის ძალის მისაღებად. შესაბამისად თუ მიღებულ წევის ძალას გავყოფთ დახარჯულ მაბრუნ მომენტზე (N/Nm) მივიღებთ გამოკვლეული ხრახნის ენერგოეფექტურობის მაჩვენებელს ანუ 1 Nm-ს შედეგად მიღებულ ამწევ ძალას N.

ამ თვალსაზრისით კი, იმის მიუხედავად, რომ რევერსულ თოლიასებრმა საჭაერო ხრახნებმა მცირე ამწევი ძალა მოგვცეს, მათ მიერ ამისთვის დახარჯული მაბრუნის მომენტი იმდენად მცირე იყო, რომ მიღებული ენერგო ეფექტურობის მახასიათებელი გაცილებით აჭარბებს დანარჩენ საჭაერო ხრახნებს, მათ შორის ტრადიციულსაც, რომელთან შედარებითაც პროპლეტებიანი რევერსულ თოლიასებრ ხრახნის ნაზრდი დაახლოებით 16%-ია იხ. ნახ.3.2.



ნახ.3.2 საჭაერო ხრახნების ენერგოეფექტურობის მახასიათებელი გრაფიკი 1 Nm ნიუტონ მეტრი მომენტის შედეგად მიღებული ამწევი ძალა N ნიუტონი

როგორც გრაფიკიდან ვხედავთ, ენერგოეფექტურობის მახასიათებელი (შეიძლება დავარქვათ კუთრი ამწევი ძალაც), ტრადიციულ საჭაერო ხრახნის კონსტრუქციასთან შედარებით გაცილებით მაღალი აქვს რევერსულ თოლიასებრ საჭაერო ხრახნს პროპლეტებით. უნდა აღინიშნოს რომ ამ ხრახნმა ყველაზე მცირე ამწევი ძალა გვიჩვენა განსაზღვრულ ბრუნთა რიცხვებზე. შემდეგ მოდის ნორმალური რევერსულ თოლიასებრი ხრახნი, უნდა აღინიშნოს რომ რევერსულ თოლიასებრ კონსტრუქციებს შორის ამ პარამეტრში დიდი სხვაობა არ არის და პროპლეტის დამატება მცირედად აუმჯობესებს მას. ტურბულიზატორებიანს და ოპტიმიზებულ პროპლეტებიან საჭაერო ხრახნებს მახასიათებლების ნაზრდი დიდად არ განასხვავებთ ტრადიციულისგან. ხოლო ისრისებურობის მქონე ფრთოვანებიან საჭაერო ხრახნს იმის მიუხედავად, რომ ცხრილ 1 დან გამომდინარე, გაცილებით მაღალი ამწევი ძალა წარმოქმნა მის მიერ ამისთვის დახარჯული მბრუნნი მომენტიც იმდენად მაღალი იყო, რომ მისი კუთრი წევის მახასიათებელი გაცილებით გააუარესა.

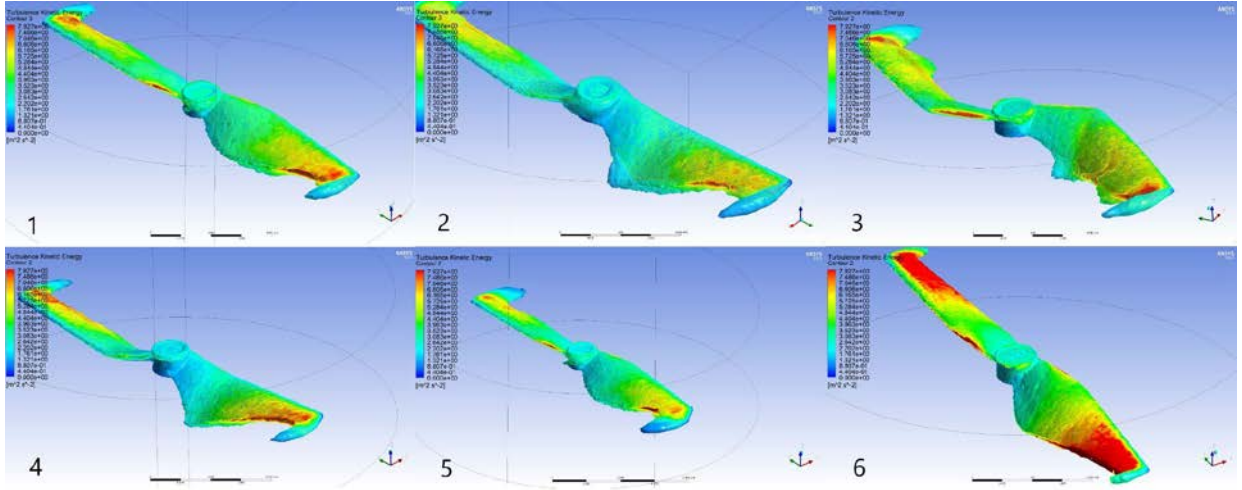
რაც შეეხება გამოკვლეული საჭაერო ხრახნების აკუსტიკურ მახასიათებლებს, ხმის წნევის დონეს (SPL-Sound Pressure Level) dB. პირველ რიგში, უნდა გავითვალისწინოთ, რომ სიმულაციებში გამოვიყენეთ broadband noise model -

ფართოზოლოვანი ხმის მოდელი, რომელიც იძლევა ხმის წნევის დონის მხოლოდ უშუალოდ კერაში დაფიქსირების საშუალებას და ამ მოდელის მიხედვით ვერ განვსაზღვრავთ ხმაური გარემოში გავრცელების დონეს. ცხრილი 1-დან ვხედავთ, რომ ყველაზე დაბალი ხმა წარმოიქმნება ტურბულიზატორებიან საჰაერო ხრახნზე. ტრადიციულს და ოპტიმიზებული პროპლექტებიანს ყველაზე მაღალი ხმაური გააჩნიათ ხოლო რევერსულ თოლიასებრ კონსტრუქციებს დამაკმაყოფილებელი ხმის წნევის დონე გააჩნიათ. კიდევ ერთხელ უნდა გავითვალისწინოთ რომ მოდელის საშუალებით მიღებული ხმის წნევის დონის მნიშვნელობები პირველადი შედარებისთვისაა და რეალურ გარემოსთვის მისი განხილვა არამიზანშეწონილია.

ზემოთხსენებული შედეგების გამოწვევის ძირითად მიზეზს, როგორც სიმულაციებიდან ჩანს წარმოადგენს, საჰაერო ხრახნების ფრთოვანების ბოლოებში ჰაერის დაგრიგალების და ფრთოვანას უკან ტურბულენტური ზონების ინტენსიურობა. ნახ.3.3- ზე ნაჩვენები ტურბულენტური ჰაერის მოცულობებიდან, შეგვიძლია ვივარაუდოთ შემდეგი: მაგალითად პროპლექტებიანი რევერსულ თოლიასებრი საჰაერო ხრახნის შემთხვევაში, რომელშიც ყველაზე ნაკლები აეროდინამიკური წინაღობა გვაქვს, ნახაზიდან ვხედავთ რომ ტურბულენტური ზონა გაგრძელებულია და მიისწრაფვის ცენტრისკენ, განსხვავებით ტრადიციული ხრახნისგან. აქედან გამომდინარე, შეგვიძლია ვთქვათ რომ ფრთოვანას სპეციფიური ფორმა ახდენს ტურბულენტური ზონის ლოკალიზებას და უბიძგებს მას ბრუნვის სიბრტყის ნაკლებ საპასუხისმგებლო, შედარებით ნელი ჰაერის სიჩქარის მქონე ზონაში. ეს ამცირებს საერთო წინაღობას და ხმაურს. ხოლო ისრისებურ ფრთოვანებიანი ხრახნის შემთხვევაში ეს პროცესი საპირისპიროდ უნდა ხდებოდეს. ამ შემთხვევაში ტურბულენტური ზონა მიისწრაფვის მეტად ჩქარი უბნისკენ და, შესაბამისად, ზრდის წინაღობის ძალას.

რაც შეეხება ნახ.3.3-ზე გამოსახულ ტურბულიზატორებიან საჰაერო ხრახნის ზედაპირზე ტურბულენტობის კინეტიკური ენერჯის მკაფიო გრადიენტს, აღნიშნული გამოწვეულია ფრთოვანას წინა ნაწილში არსებული მატურბულიზებელი “ბუსუსების არსებობით, რომლებიც წარმოქმნიან მიკრო გრიგალურ ზონებს. ეს ხელს უწყობს ზედაპირის მოსაზღვრე შრის შეტევის

კუთხეების მაღალ დიაპაზონში შენარჩუნებას და, შესაბამისად, ამცირებს ფრთოვანას უკან ჰაერის ტურბულენტური ზონის მოცულობას. აღნიშნულმა დადებითი გავლენა უნდა მოახდინოს ხრახნის აკუსტიკურ მახასიათებლებზეც.



ნახ.3.3 სიმულაციის შედეგად მიღებული ტურბულენტური ჰაერის მასები ხრახნის გარშემო, ფერთა გრადიენტით კი დატანილია ტურბულენტობის კინეტიკური ენერჯის სიდიდე ამ ზონებში

ნახ.3.3-ზე გამოსახულია სიმულაციის ვიზუალიზაცია შემდეგ ხრახნებზე: 1-ტრადიციული საჰაერო ხრახნი; 2-რევერსულ თოლიასებრი; 3-ხრახნი ფრთოვანების ისრისებურობით; 4-რევერსულ თოლიასებრი ხრახნი პროპლექტებით; 5-ოპტიმიზებული ბოლოებით; 6-ტურბულიზატორებით.

3.2. კვლევის ექსპერიმენტული მეთოდი

3.2.1. გამოყენებული დანადგარი და აპარატურა

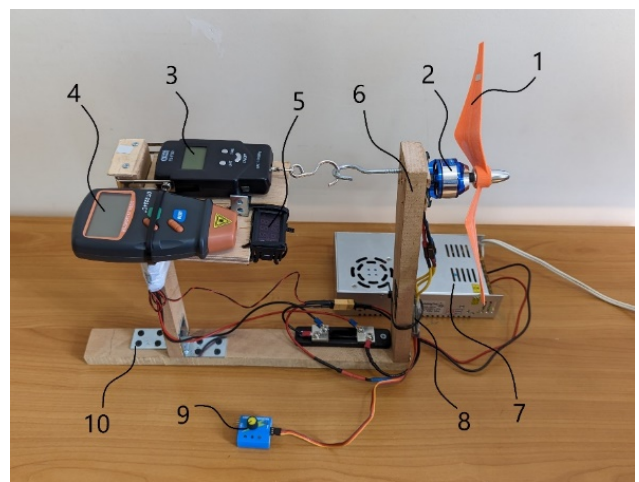
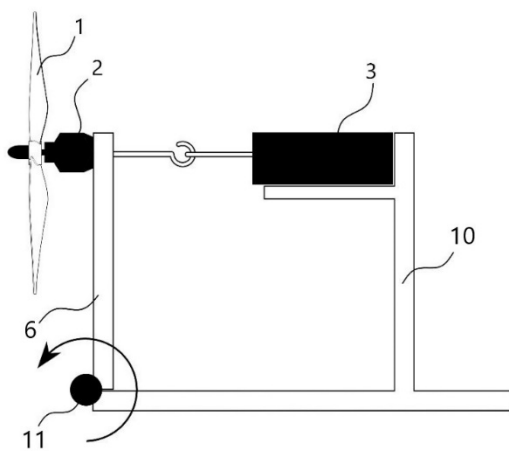
მიუხედავად იმისა, რომ კომპიუტერული სიმულაციების შედეგად მიღებული შედეგები საკმაოდ სარწმუნო და დამაიმედებელია და ასეთი მეთოდით კვლევების წარმოება მიღებული პრაქტიკაა მსოფლიოს მასშტაბით, შედეგების გადამოწმებისთვის აუცილებლად მივიჩნიეთ მათი რეალურ გარემოში განხორციელება. ამისთვის საჭირო იყო მოგვეხდინა შემუშავებული საჰაერო ხრახნების მოდელების დამზადება და მათი სტენდზე გამოცდა. გამომდინარე აქედან, გადავწყვიტეთ შეგვემუშავებინა საჰაერო ხრახნების საგამოცდო სტენდი, რომელიც დიდი სიზუსტით მოგვცემდა ჩვენთვის სასურველ პარამეტრებს. სტენდი უნდა ყოფილიყო კვლევისას შემუშავებულ საჰაერო ხრახნების ზომაზე გათვლილი და უნდა მოეწოდებინა შემდეგი პარამეტრები:

- საჰაერო ხრახნის მიერ წარმოქმნილი წევის ძალა;
- საჰაერო ხრახნის ფუნქციონირებისთვის დახარჯული ენერჯია;
- საჰაერო ხრახნის ბრუნვის სიჩქარე;
- საჰაერო ხრახნის მიერ შექმნილი ხმაური.

აღნიშნული მოთხოვნებისთვის გადავწყვიტეთ შეგვემუშავებინა შემდეგი კონსტრუქცია:

სტენდი წარმოადგენს სახსრულ სისტემაზე აწყობილ კონსტრუქციას, რომლის მოძრავ მკლავზე დამაგრებულია ელექტრული ძრავა საჰაერო ხრახნით (ნახ.3.4), სტენდის მოძრავი მკლავი კავით დაკავშირებულია სტენდის უძრავ კარკასზე დამაგრებულ დინამომეტრთან. საჰაერო ხრახნის მოქმედებაში მოსვლის შემდგომ მიღებული ხრახნზე მოქმედი ამწევი ძალა ცდილობს სტენდის მკლავი გადაადგილოს სტენდის კარკასიდან საწინააღმდეგო მიმართულებით, რის შედეგადაც იჭიმება დინამომეტრი და ეს ამწევი ძალა გამოისახება მასზე კილოგრამების მიხედვით. ხრახნის ბრუნთა რიცხვის გასაზომად, სტენდს გააჩნია თარო, სადაც დამაგრებულია ტაქომეტრი ხრახნის ბრუნვის სიბრტყის, უკან, პერპენდიკულარულად და იგი ხრახნზე დამაგრებული ამრეკლი ლენტის

დახმარებით გვაძლევს ბრუნთა რიცხვის მნიშვნელობას. მოხმარებული სიმძლავრის გასაზომად სტენდის ელექტრულ წრედში ჩართულია ვოლტ და ამპერ მეტრი, მოხმარებული სიმძლავრის მიხედვით შეგვიძლია მოვახდინოთ საჰაერო ხრახნის აეროდინამიკური წინაღობის განსაზღვრა. სტენდზე საჰაერო ხრახნების გამოცდისას მათი აკუსტიკური მახასიათებლების განსაზღვრას ვახდენთ დეციბელ მეტრის საშუალებით. აღნიშნული სტენდის საშუალებით შესაძლებელია საჰაერო ხრახნის სრულყოფილი გამოკვლევა და მისი პარამეტრების განსაზღვრა მაღალი სიზუსტით.



ნახ.3.4 საჰაერო ხრახნების პარამეტრების გამოსაცდელი სტენდის პრინციპული სქემა. 1-საჰაერო ხრახნი; 2-ელექტრო ძრავა; 3-დინამომეტრი; 4-ტაქომეტრი; 5-ვოლტ-ამპერ მეტრი; 6-მბრუნავი ძელი; 7-კვების ბლოკი; 8-ელექტრონული სიჩქარის კონტროლერი; 9-ბრუნვის კონტროლერი; 10-სტენდის კარკასი; 11-სახსარი

საგამოცდო სტენდის დასამზადებლად გამოვიყენეთ შემდეგი, ციფრული მოწყობილობები და მაღალი სიზუსტის მქონე სენსორები და გადამწოდები:

1. ბრუნთა რიცხვის გასაზომად გამოვიყენეთ ტაქომეტრი DT-2234C. აღნიშნული წარმოადგენს ფოტო ლაზერული ტიპის ბრუნთა რიცხვის საზომ ტაქომეტრს, რომელსაც შეუძლია გაზომოს 2.5 დან 100000 მდე ბრ/წთ ბრუნვის სიჩქარე. გაზომვის სიზუსტე 2.5 ბრ/წთ (ნახ.3.5).



ნახ.3.5 1)კვების ბლოკი, 2) Li-po აკუმულატორ Ovonic 3S, 50C, 4500mAh
3)ლაზერული ტაქომეტრი DT-2234C, 4)ვოლტ-ამპერ მეტრი DSN-VC288 (7271)

2. წვეის ძალის გასაზომად გამოვიყენეთ სტანდარტული დინამომეტრი, გაზომვის სიზუსტე 0.05 N (5გ)
3. მოხმარებული ენერჯის ხარჯის გასაზომად გამოვიყენეთ ვოლტ-ამპერ მეტრი DSN-VC288 (7271). გაზომვის სიზუსტე 0.1 V, 0.1 A (ნახ.3.5).
4. ენერჯის წყაროდ ვიყენებდით როგორც Li-po აკუმულატორს, Ovonic 3S, 50C, 4500mAh, 11.1V, და კვების ბლოკს 12V, 30A დენის მოწოდების შესაძლებლობით. უნდა აღინიშნოს, რომ კვების ბლოკის დახმარებით დენის ძაბვა მდგრადი იყო და გამოცდებისას მხოლოდ ამპერაჟი იცვლებოდა.
5. ძრავის ბრუნთა რიცხვის რეგულირებისთვის ვიყენებდით სერვო ტესტერს.



ნახ.3.6: 1)სერვო ტესტერი, 2)ელექტრო ძრავი Exceed RC Rocket 3010-1190kv,
3)ელექტრონული სიჩქარის კონტროლერი YEP ESC 40A

6. ელექტრო ძრავი, Exceed RC Rocket 3010-1190 kv. აღნიშნული ძრავი გამოიყენება მცირე ზომის დისტანციურად მართვად თვითმფრინავებში. შესაბამისი მაქსიმალური ძაბვა წარმოადგენს 12 ვოლტს. 1 ვოლის სამუალებით ანვითარებს 1190 ბრუნს წუთში, შესაბამისად, ძრავის მაქსიმალური ბრუნთა რიცხვი წარმოადგენს 14280 ბრ/წთ-ს. ძრავის

ეფექტურობა არის 80% მაქსიმალური დატვირთვა კი 45 A 60 წამის განმავლობაში. ხრახნის სამაგრი ღერძის დიამეტრი 6 მმ-ია.

7. ელექტრონული სიჩქარის კონტროლერი, YEP ESC 40A (2~6S). აღნიშნული წარმოადგენს მსგავსი ელექტრონული სისტემებისთვის აუცილებელ აგრეგატს და იგი გამოიყენება ელექტრო ძრავის ბრუნთა რიცხვის კონტროლისათვის.
8. სტენდზე საჰაერო ხრახნების აკუსტიკური მახასიათებლების დაფიქსირებისთვის ვიყენებდით სპეციალიზებულ პროგრამას “Sound meter HD” რომელიც დიდი სიზუსტით გვაძლევდა ხრახნის მიერ წარმოებული ხმის მნიშვნელობას. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ამ მიზნით გამოვცადეთ არაერთი პროგრამა მათ შორის კი ყველაზე სტაბილური და ზუსტი შევარჩიეთ გამოცდებისთვის. სტენდზე ხრახნების გამოცდებისას მიკროფონი ერთი და იგივე მანძილზე იყო დაშორებული თითოეული ხრახნიდან.

3.3. საჭაერო ხრახნების დამზადების მეთოდები

რაც შეეხება სტენდზე გამოსაცდელი საჭაერო ხრახნების ფიზიკური მოდელების დამზადებას. ამისთვის შეიძლება გამოყენებული იქნეს არაერთი მეთოდი. ზოგადად, კვლევისას განხილული ხრახნების ზომები მცირეა და ისინი გამოიყენება საშუალო ზომის უპილოტო საფრენ აპარატებში. მათ დასამზადებლად კი, ძირითად შემთხვევებში, პლასტმასები გამოიყენება. განვიხილოთ მცირე ზომის საჭაერო ხრახნთა დამზადების მეთოდები:

საჭაერო ხრახნების წარმოების ერთ-ერთ ყველაზე გავრცელებულ მეთოდს მათი ჩამოსხმა წარმოადგენს, სადაც გამდნარი პლასტმასის მასალა ჩამოსხმება სპეციალურ ფორმაში. ზოგადად ეს მეთოდი ფართოდ გამოიყენება რთული ფორმის პლასტმასის დეტალების წარმოებისთვის. იგი გულისხმობს მდნარი მასალის შეყვანას ღრუ ფორმაში - ყალიბში, მაღალი წნევის ქვეშ, მისი გაცივებისა და გამაგრების შემდეგ კი მიიღება სასურველი დეტალი. ჩამოსხმა გამოირჩევა წარმოების ეფექტურობით და ეკონომიურობით მასიური მასშტაბების დროს, ასევე მეთოდის უპირატესობას წარმოადგენს მიღებული დეტალის ზედაპირების სისუფთავე, რაც საჭაერო ხრახნებში ძალზედ მნიშვნელოვანი ფაქტორია.

ჩამოსხმის პროცესი შეიცავს:

- ყალიბის მომზადების პროცესს. სასურველი ფორმის მისაღებად ხდება რამდენიმე ნაწილისგან შემდგარი ყალიბის მომზადება, ალუმინისგან ან სხვა მასალისგან. უდიდესი მნიშვნელობა აქვს ყალიბის ჩამოსასხმელი ზედაპირების დამუშავების ხარისხს, ვინაიდან ეს განაპირობებს სხმულის ზედაპირის ხარისხს.
- მასალის გადნობა. თერმოპლასტიკური მასალები ისეთი როგორცაა ABS-ი, პოლიპროპილენი ან პოლიკარბონატი ფართოდ გამოიყენება პლასტმასის დეტალების ჩამოსხმისთვის.
- ჩამოსხმა. გამდნარი მასალა შეყავთ ყალიბის სიღრუეში, საშენით, მაღალი წნევის ქვეშ. მაღალი წნევა საჭიროა მასალის მიერ ყალიბის სრულად შესავსებად.

- გაცივება და გამყარება. ყალიბში მასალის შეყვანის შემდეგ იგი ყოვანდობა გარკვეული დროის განმავლობაში, რათა მასალას მიეცეს გაცივების და გამყარების საშუალება. დაყოვნების დრო დამოკიდებული მასალის ტიპზე დეტალის პარამეტრებზე და ა.შ.
- დეტალის მოხსნა. მას შემდეგ რაც ჩამოსხმული დეტალი გამყარდება შესაბამის დონემდე ყალიბი იხსნება და ხდება დეტალის ამოღება.

აღნიშნული მეთოდის დადებით მხარეებს წარმოადგენს:

- დეტალის მაღალი სიზუსტე. ჩამოსხმის მეთოდი გვთავაზობს მაღალ სიზუსტეს მცირე ზომის დეტალებშიც კი.
- ეფექტურობა მასიური წარმოებისას. აღნიშნული მეთოდი მაღალ ეკონომიურია მასიური წარმოებისას, მას შემდეგ რაც ყალიბი დამზადდება თითოეული დეტალი დასამზადებლად ძალზედ მცირე დროითი და ეკონომიური დანახარჯია საჭირო.
- კონსტრუქციული მრავალფეროვნება. ჩამოსხმით შესაძლებელია მივიღოთ ძალზედ კომპლექსური გეომეტრიის დეტალები, როგორებიცაა სიღრუეები დეტალში, ძალზედ თხელი კედლები, და ა.შ.
- მასალების ფართო არჩევანი. მეთოდით შესაძლებელია მრავალფეროვანი თერმოპლასტიკური მასალებით მათ შორის პლასტიკური, მყარი, ქიმიურად მედეგი და სხვა, დეტალების დამზადება.

ჩამოსხმის მეთოდის უარყოფით მხარეებს წარმოადგენს:

- ხელსაწყოების საწყისი ხარჯები შეიძლება იყოს მაღალი, რადგან ფორმების დაპროექტება და წარმოებაა საჭირო.
- ყალიბის დიზაინის ცვლილებები არის ძვირი და შრომატევადი პროცესი ამიტომ ყველაფერი უნდა იქნეს გათვალისწინებული.
- არსებობს ზომების შეზღუდვები, დიდი დეტალები მოითხოვს უფრო დიდ და ძვირადღირებულ დანადგარებს.

აღნიშნული პროცესი მიღებული მასიური წარმოების პირობებში და იგი ძალზედ ამცირებს წარმოების ღირებულებას, თუმცა ამ შემთხვევაში კონსტრუქციული ვარიანტების შესაძლებლობა არ გვაქვს ვინაიდან ყალიბის დამზადება საკმაოდ ძვირი

და გრძელვადიანი პროცესია. ამიტომ პროტოტიპირებისა და კონსტრუქციული შემუშავების ეტაპებზე ამ მეთოდით საჭაერო ხრახნების დამზადება მიზანშეწონილი არ არის.

3D ბეჭდვა. მცირე ზომის საჭაერო ხრახნების და მსგავსი პლასტმასის დეტალების დამზადებისთვის ერთ-ერთ ახალ მეთოდს წარმოადგენს დეტალების 3 განზომილებიანი ბეჭდვით (3D printing) მეთოდით დამზადება, მას ასევე უწოდებენ ფენოვან დატანით წარმოების მეთოდს (additive manufacturing). ეს მეთოდი სულ უფრო პოპულარული ხდება მცირე საჭაერო პროპელერების წარმოებისთვის, განსაკუთრებით პროტოტიპირების ეტაპზე. ამ მეთოდით, კომპიუტერით კონტროლირებადი პრინტერი ამატებს მასალის ფენებს, როგორცაა პლასტმასი ან რეზინი, რათა თანდათან შექმნას საჭაერო ხრახნის ან ნებისმიერი სხვა დეტალის ფორმა 3D მოდელის მიხედვით. 3D ბეჭდვა იძლევა სწრაფი პროტოტიპების და პერსონალიზაციის საშუალებას, ასევე სხვადასხვა დიზაინისა და მასალების ექსპერიმენტების შესაძლებლობას.

3D ბეჭდვით პროდუქტის დამზადების პროცესი შეიცავს შემდეგ საფეხურებს:

- დეტალის ციფრული მოდელირება. 3D მოდელი იქმნება კომპიუტერული დამხმარე დიზაინის (CAD) პროგრამით ან 3D სკანერის გამოყენებით.
- ადაპტირება-კოდის მომზადება (Slicing). 3D მოდელი სპეციალიზებული პროგრამის გამოყენებით, დაყოფა თხელ ფენებად, რომელზეც გაიწერება 3D პრინტერის მოძრაობის ტრაექტორია.
- ბეჭდვა. 3D პრინტერი არჩეულ მასალას ფენად ათავსებს ობიექტის ასაგებად. მასალა შეიძლება იყოს სხვადასხვა ფორმით, როგორცაა ძაფი, ფხვნილი, ფისი ან თხევადი, რაც დამოკიდებულია გამოყენებული 3D ბეჭდვის სპეციფიკურ ტექნოლოგიაზე.
- ფენათა შეკავშირება (Layer Bonding). დაბეჭდვის შემდგომ, ნაკეთობის მეტი სიმტკიცისთვის შესაძლებელია მისი თერმული ან ქიმიური დამუშავება. აღნიშნული პროცესი არ არის სავალდებულო ვინაიდან ნაბეჭდ დეტალს ფენათა შორის საკმარისად მტკიცე კავშირი გააჩნია.
- საბოლოო დამუშავება. ბეჭდვის პროცესის დასრულების შემდეგ, დაბეჭდილმა ობიექტმა შეიძლება გაიაროს დამუშავების შემდგომი დამატებითი ეტაპები, როგორცაა დამხმარე სტრუქტურების მოხსნა, გაპრიალება-გახეხვა ან შეღებვა, სასურველი ზედაპირის სისუფთავის ან ფუნქციონალური მოთხოვნების მისაღწევად. აღნიშნული პროცესი საჭიროა იმ შემთხვევაში თუ ბეჭდვის დაბალ ხრის ან დამხმარე სტრუქტურებს ვიყენებთ.

3D ბეჭდვის დადებით მხარეებს წარმოადგენს:

- ფორმების და დიზაინის თავისუფლება. 3D ბეჭდვა საშუალებას გვაძლევს შევქმნათ უაღრესად რთული გეომეტრიები და რთული დეტალები, რომელთა მიღწევა რთულია ან შეუძლებელია წარმოების ტრადიციული მეთოდებით.
- სწრაფი პროტოტიპირება. 3D ბეჭდვა იძლევა პროტოტიპების სწრაფ და ეკონომიურ წარმოებას საშუალებას, რაც დეტალთა დამზადების სწრაფი განმეორებითობით და დიზაინის დახვეწის საშუალებიდან გამომდინარეობს. ეს აჩქარებს პროდუქტის განვითარების ციკლებს.
- მორგება და პერსონალიზება. თითოეული ობიექტი შეიძლება ადვილად შეიცვალოს მნიშვნელოვანი დამატებითი ხარჯების გაწევის გარეშე, რაც აადვილებს პერსონალიზებული პროდუქტების შესაქმნას ან მცირე პარტიულ წარმოებას.
- მასალათა მრავალფეროვნება. 3D ბეჭდვა მხარს უჭერს მასალების ფართო სპექტრს, მათ შორის პლასტმასს, ლითონს, კერამიკას და ზოგიერთ ბიომასალასაც კი. მასალის სხვადასხვა თვისებები და მახასიათებლები შეიძლება შერჩეული იქნას კონკრეტული მოთხოვნებიდან გამომდინარე.

მეთოდის უარყოფით მხარეებს წარმოადგენს:

- ბეჭდვის დრო. 3D ბეჭდვა შეიძლება იყოს შედარებით ნელი პროცესი, განსაკუთრებით უფრო დიდი ან უფრო რთული დეტალებისთვის, ამან შეიძლება გავლენა მოახდინოს წარმოების დროზე დიდი მოცულობებისას.
- მასალათა ლიმიტაცია. თითოეულ 3D ბეჭდვის ტექნოლოგიას აქვს მასალათა კონკრეტული მოთხოვნები და შეზღუდვები. მასალის თვისებები, როგორცაა სიმტკიცე, სითბო მედეგობა ან მოქნილობა, შეიძლება განსხვავდებოდეს დაბეჭდვადი მასალებისგან.
- ბეჭდვის ხარისხი. მაღალი ხარისხის ზედაპირის სისუფთავის და პარამეტრების სიზუსტის მიღწევა შეიძლება იყოს გამოწვევა, განსაკუთრებით 3D ბეჭდვის გარკვეული ტექნოლოგიებისთვის. ამიტომ შეიძლება საჭირო გახდეს შემდგომი დამუშავება სასურველი, საბოლოო გარეგნობისა და ფუნქციონირების მისაღწევად.
- ღირებულება. მიუხედავად იმისა, რომ 3D ბეჭდვა გვთავაზობს უპირატესობებს პროტოტიპებისა და პერსონალიზაციის ეტაპებზე, უმეტეს შემთხვევაში არაა მიზანშეწონილი წარმოების დიდი მოცულობების დროს, ისეთი ფაქტორების გამო, როგორცაა მასალების დიდი ხარჯები, ადჭურვილობის შენარჩუნება და ბეჭდვის დრო.

გამომდინარე ზემოთ ხსენებულიდან, აღნიშნულ 3D ბეჭდვის მეთოდი მიზანშეწონილია საკაერო ხრახნების დამზადებისთვის პროტოტიპირების ეტაპებზე გამომდინარე იქიდან რომ საკაერო ხრახნის საბოლოო კონსტრუქციის

შერჩევა მოითხოვს მრავლობით გამოცდებს და კონსტრუქციულ ოპტიმიზაციას [49].

გარდა ამისა, 3D ბეჭდვა ფართოდ გამოიყენება სხვა ინდუსტრიებშიც, მაგალითად: არქიტექტურა, მედიცინა, ავტონდუსტრია, აერონავტიკა, განათლება და ა.შ. გამომდინარე მისი პერსონალიზაციისა და რთული ობიექტების ეფექტური წარმოების საშუალებიდან.

დღესდღეობით, მცირე ზომის საჭაერო ხრახნების დამზადებისთვის ძირითადად ზემოთ აღნიშნული მეთოდები გამოიყენება, თუმცა გარდა ამისა, სპეციფიური მასალების გამოყენების შემთხვევაში, როგორცაა ხე, კომპოზიტური მასალები, აკრილი და ა.შ. გამოიყენებენ სხვა მეთოდებსაც.

მაგალითად ხის საჭაერო ხრახნების დასამზადებლად იყენებენ სპეციალიზებულ სახარატო ჩარხებს ან კომპიუტერით კონტროლირებად ფრეზებს (CNC). საჭაერო ხრახნების დასამზადებელ სპეციალიზებულ ჩარხებზე დამზადება ხდება, ხრახნის ეტალონურ მოდელის ზედაპირზე მჭრელი პირის მიმმართველი მოწყობილების გადატარების საშუალებით. კომპიუტერით კონტროლირებად დანადგარზე კი საჭაერო ხრახნები მზადდება 3 განზომილებიანი ციფრული მოდელების საშუალებით, როგორც 3D ბეჭდვის შემთხვევაში იმ განსხვავებით რომ ამჯერად ხდება ნამზადიდან მასალის მოცილება და არა პირიქით დატანა.

კომპოზიციური მასალებით საჭაერო ხრახნები დამზადების მეთოდი მსგავსია ჩამოსხმის მეთოდისა, ვინაიდან ეს მეთოდიც საჭიროებს ფორმებს-ყალიბებს, რომელშიც ხდება კომპოზიციური მასალის და შემავსებლის მოთავსება და მისი თერმული დამუშავების და გამყარების შემდგომ მიიღება ნაკეთობა. უნდა აღინიშნოს რომ ამ მასალით დამზადებული საჭაერო ხრახნები გამოირჩევიან მაღალი სიმტკიცით და მედეგობით, თუმცა აღნიშნული მეთოდის ღირებულება მაღალია და ამიტომ მცირე ზომის ხრახნების მისი გამოყენება იშვიათად ხდება.

3.3.1 კვლევისთვის შერჩეული საჭაერო ხრახნების დამზადების

მეთოდი

საჭაერო ხრახნების ფიზიკური მოდელების მიღების ჩამოთვლილ მეთოდთაგან კვლევის და პროტოტიპირებისთვის ავირჩიეთ 3D ბეჭდვის მეთოდი, ვინაიდან როგორც აღვნიშნეთ ეს მეთოდი ყველაზე მეტად მიესადაგება პროტოტიპირების ეტაპს. გამომდინარე იქიდან, რომ ჩვენი კვლევის განმავლობაში მრავალჯერ მოგვიწევდა საჭაერო ხრახნების დიზაინის შეცვლა და ოპტიმიზება. 3D ბეჭდვის საშუალებით კი ამის მიღწევა უმოკლეს დროში იყო შესაძლებელი.

საჭაერო ხრახნების 3D ბეჭდვით დასამზადებლად ვიყენებდით 3D პრინტერს Creality Ender 3 Pro (ნახ.3.7) ხოლო მასალად PLA-ს. აღნიშნული 3D პრინტერი წარმოადგენს დღესდღეობით ბაზარზე ერთ-ერთ ყველაზე პოპულარულ მცირე ზომის პრინტერს, რომელიც გამოირჩევა კონსტრუქციული და ექსპლუატაციური სიმარტივით და დამზადებული დეტალების მაღალი სიზუსტით. აღნიშნული 3D პრინტერის საბეჭდ-სამუშაო მოცულობას წარმოადგენს 220მმ x 220მმ x 250მმ, რაც სავსებით დამაკმაყოფილებელია საკვლევი საჭაერო ხრახნების ზომებიდან გამომდინარე. Creality Ender 3 Pro კორპუსი შედგება მტკიცე ალუმინის პროფილებისაგან, რაც პრინტერს ძალზედ მყარს და მჭიდროდ შეკრულ ხდის, ეს კი განაპირობებს ნაბეჭდი დეტალების მაღალ ხარისხს და სიზუსტეს. აღნიშნულ პრინტერს გააჩნია მასალის ჩამოსასხმელი 0.4 მმ დიამეტრის საქშენი, რომელიც მაქსიმალურ 260 გრადუს ცელსიუს ტემპერატურამდე ცხელდება, ასევე მისი საბეჭდი მაგიდის მაქსიმალურ ტემპერატურას წარმოადგენს 110 გრადუსი. აღნიშნული ტემპერატურების დიაპაზონში პრინტერ შეუძლია დეტალების დამზადება მრავალი მასალით, რომელიც მას მიეწოდება 1.75 მმ-იანი დიამეტრის მქონე მავთულის-ფილამენტის სახით, ამ მასალებში შედის: PLA (პოლილაქტიდის): 190–210 °C. ABS (აკრილონიტრილ ბუტადიენ სტირინი): 220–240 °C. PETG (პოლიეთილენ ტერეფტალატ გლიკოლი): 230–245 °C. TPU (თერმოპლასტიკური პოლიურეთანი): 220–230 °C და სხვა. თავად Creality Ender 3 Pro წარმოადგენს ღია პლატფორმას და შესაძლებელია მისი მარტივი მოდიფიკაცია, საჭიროებებიდან

გამომდინარე, როგორც პროგრამული ისე კონსტრუქციული კუთხით. 3D პრინტერისთვის სამუშაო ფაილის მიწოდება ხდება micro SD ბარათით ან კომპიუტერიდან მიერთებული USB კაბელის საშუალებით.



ნახ.3.7 3D პრინტერი Creality Ender 3 Pro

აღიშნული 3D პრინტერი მუშაობს სპეციალური კოდის გამოყენებით, რომელიც წარმოადგენ მასალის გამოსაღობი საქმენის მოძრაობის ტრაექტორიის კოორდინატების ერთობლიობას და რომლის შედგენაც ხდება 3D ბეჭდისთვის სპეციალიზებულ პროგრამაში (slicer-ში).

3D პრინტერის დასაბეჭდი ფაილების დასამზადებლად ვიყენებდით ერთ-ერთ ყველაზე გავრცელებულ პროგრამას CURA-ს, აღნიშნული პროგრამა შესაბამისი ფაილების დამზადებისთვის საჭიროებს გარკვეული (STL ან OBJ) ფორმატის 3D მოდელების მიწოდებას. პროგრამას გააჩნია მარტივი ინტერფეისი, თუმა იგი გვაძლავს აბსოლუტურ კონტროლს ბეჭდვის პროცესზე, მისი საშუალებით შეგვიძლია ვაკონტროლოთ ბეჭდვის პროცესის უმნიშვნელო ასპექტებიც, რაც დამზადებული დეტალების სიზუსტეს განაპირობებს. ასევე, აღსანიშნავია პროგრამის მოდულური სტრუქტურა, რაც ნიშნავს პროგრამისთვის სასურველი

ფუნქციების დამატების შესაძლებლობას და მრავალ პრინტერთან თავსებადობის შესაძლებლობას.

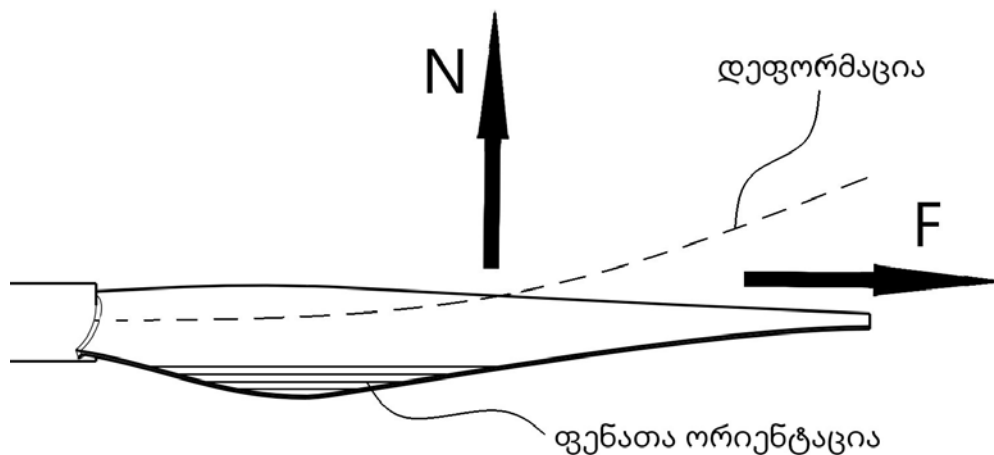
CURA-ით 3D მოდელების დამუშავება შემდეგნაირად ხდება: პროგრამაში შეგვყავს სასურველი ციფრული მოდელი, შესაბამისი პროგრამისთვის მისაღები ფორმატით, რის შემდეგაც მოვახდენთ სასურველი ორიენტაციით განთავსებას, აღნიშნული მნიშვნელოვანია გამომდინარე იქიდან, რომ დეტალის მაღალი სიზუსტის და სიმტკიცის მისაღებად სასურველია ბეჭდვის დროს მოდელი განთავსდეს ისეთი ორიენტაციით, რომ გამოყენებული იქნეს რაც შეიძლება მცირე რაოდენობის მხარდამჭერი მასალა და ნაბეჭდი ფენების მიმართულება პარალელური იყოს დეტალზე მოქმედი ძალების. ამის შემდეგ ვახდენთ ფენის სისქის ბეჭდვის სიჩქარის, ტემპერატურების და ა.შ. პარამეტრების შერჩევას. საბოლოოდ მიიღება G-code ფორმატის ციფრული ფაილი რომელიც მიეწოდება პრინტერს.

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ხრახნების დასაბეჭდად ვიყენებდით ე.წ. PLA-ს (პოლილაქტიდს). იგი არის ერთ-ერთი ყველაზე ხშირად გამოყენებული და პოპულარული ფილამენტი 3D ბეჭდვის სფეროში. ეს არის ბიოდეგრადირებადი თერმოპლასტიკური მასალა, რომელიც მიღებულია განახლებადი რესურსებიდან, როგორცაა სიმინდის სახამებელი ან შაქრის ლერწამი, ეს კი PLA-ს ეკოლოგიურად სუფთა მასალას ხდის.

მასალის ასეთი პოპულარობა განპირობებულია მისი მაღალ ბეჭდვა უნარიანობიდან და სიმარტივიდან. სხვა მასალებისგან განსხვავებით PLA არ საჭიროებს დამატებით საშუალებებს ნესტის მოსაცილებლად, მისი დნობის ტემპერატურებიც საკმაოდ დაბალია და არ მოითხოვს ძვირადღირებულ პრინტერებს, ასევე კუთრი სიმტკიცის საკმაოდ მაღალი მახასიათებელი აქვს.

საკაერო ხრახნების 3D პრინტერზე დამზადებისას უმნიშვნელოვანესია გავითვალისწინოთ მისი დაბეჭდვის ორიენტაცია ანუ ნაბეჭდი ფენების განლაგება ნაბეჭდ დეტალზე. ეს გამომდინარეობს იქიდან რომ მიღებულ დეტალში ფენების მართობულად მისი რღვევისთვის გაცილებით ნაკლები ძალაა საჭირო ვიდრე ეს ფენების პარალელურად იქნებოდა. ეს საკაერო ხრახნებზე რომ გადმოვიტანოთ

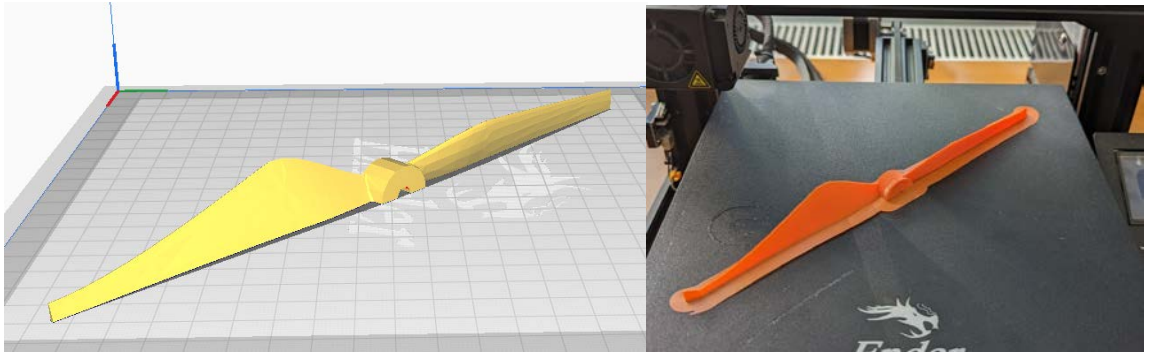
სადაც ძირითადად ორი მიმართულების ძალა მოქმედებ ესენია: ცენტრიდანული ძალა, რომელიც ხრახნს და ფრთოვანებს ექაჩება ბრუნვის ღერძიდან მართობული მიმართულებით, ცდილობს მათ გაწყვეტას და წვეის ძალა, რომელიც ხრახნს და მის ფრთოვანებს ექაჩება ბრუნვის ღერძის პარალელური მიმართულებით და ცდილობს ფრთოვანების გადახრას და გადატეხვას (ნახ.3.8). უნდა აღინიშნოს რომ გარკვეულ წილად ცენტრიდანული ძალები წვეის ძალებს აბალანსებენ და ფრთოვანას გადახრის საშუალებას არ აძლევენ. ასე რომ საჰაერო ხრახნზე მოქმედ, ძირითადად გასათვალისწინებელ, ძალად განიხილება ცენტრიდანული ძალა. ამიტომ ბეჭდვის ორიენტაციაც შესაბამისად უნდა იყოს შერჩეული, ანუ სასურველია ფენები განლაგებული იყოს ფრთოვანას გასწვრივ ცენტრიდანული ძალის ვექტორის პარალელურად (ნახ.3.8), აღნიშნული უზრუნველყოფს მაქსიმალურ მედეგობას დატვირთვისას.



ნახ.3.8 საჰაერო ხრახნი 3D ბეჭდვისთვის. N-ამწევი ძალა; F-ცენტრიდანული ძალა

ასევე ხრახნის დაბეჭდვისას აუცილებელი იყო გაგვეთვალისწინებინა დამხმარე მასალების (Supports) არ არსებობა, ანუ მასალებისა რომელზეც პრინტერი იყენებს გადმოკიდებული ჰაერში მყოფი ფენების დასაბეჭდად ასეთი მასალები ძალზედ ამახინჯებენ და აფუჭებენ დეტალების ზედაპირის, რაც აეროდინამიკური ნაკეთობებისთვის ერთობ მნიშვნელოვანია. ამიტომ გადავწყვიტეთ ხრახნები დაგვებეჭდა ორ სიმეტრიულ ნაწილად (ნახ.3.9) და შემდგომ მოგვეხდინა მათი შეწყობა. მოდელს ბეჭდვის შემდგომ მაქსიმალური სიზუსტით შეწყობებისათვის

დატანილი ჰქონდათ მიმართველი ნახვრეტები. ასეთი მეთოდით მაქსიმალურად ავარდებით თავს დამხმარე მასალებს და მივიღებდით წმინდა ზედაპირს.



ნახ.3.9 საჰაერო ხრახნის ნახევარი ნაწილის ორიენტაცია 3D პრინტერზე

ამობეჭდილი საჰაერო ხრახნების სიმეტრიული ნაწილების შეწებებისათვის გამოვიყენეთ 'ეთილ 2-ციანოაკრილატის' წებო, რომელიც თავსებადია PLA-სთან და არ იწვევს მისი სტრუქტურის რღვევას. ამის შემდგომ მოვახდინეთ შეწებებული საჰაერო ხრახნების ზედაპირების დამუშავება და გაპრიალება. კვლევის განმავლობაში შემუშავებული საჰაერო ხრახნები მზად იყვნენ სტენდზე ფიზიკური გამოცდებისთვის.



ნახ.3.10 საჰაერო ხრახნების დამზადებული მოდელები: 1)ნორმალური, 2)ოპტიმიზებული პროპლეტებით, 3)ტურბულიზატორებით, 4)ფრთოვანების ისრისებურობით, 5)რევერსულ თოლიასებრი პროპლეტებით, 6)რევერსულ თოლიასებრი

3.4. კვლევის შედეგად მიღებული პერსპექტიული საჰაერო ხრახნების

ექსპერიმენტები სტენდზე

სტენდზე საჰაერო ხრახნების ფიზიკური გამოცდებისთვის შევიმუშავეთ შემდეგი მეთოდოლოგია:

- ხარისხის კონტროლი: თითოეული საჰაერო ხრახნის აეროდინამიკური ზედაპირები უნდა ყოფილიყო მაქსიმალურად თანაბრად გასუფთავებული რათა თავიდან აგვერიდებინა აღნიშნული საკითხით გამოწვეული ცდომილებები გამოცდებისას.
- ბალანსირება: შემოწმდა თითოეული საჰაერო ხრახნის წონასწორობა ბრუნვის ღერძის გარშემო. გაუწონასწორებელმა საჰაერო ხრახნმა გარდა გაზომვების ცდომილებისა ასევე შეიძლება გამოიწვიოს კონსტრუქციის რღვევა მაღალ ბრუნთა რიცხვებზე.
- სტენდის გამართულობა: თითოეული გამოცდის წინ ვახდენდით სტენდის შემოწმებას გამართულობაზე და მაჩვენებლების კალიბრაციას, რათა ცდომილების დიდი მნიშვნელობები არ მიგველო.
- განმეორებითობა: მონაცემთა კონტროლის მიზნით ვახდენდით გამოცდების განმეორებით ჩატარებას ცდომილებების და უზუსტობების დასადგენად.
- მრავალფეროვნება: თითოეული საჰაერო ხრახნისთვის გამოცდები ჩავატარეთ 4 განსხვავებულ ბრუნთა რიცხვის მნიშვნელობაზე, რომლებზეც ძირითადად უწევთ ოპერირება მსგავსი ზომის საჰაერო ხრახნებს. ეს ბრუნთა რიცხვებია: 2000; 4000; 6000; და 8000 ბრ/წთ.
- შედარებადობა: გამოცდილი საჰაერო ხრახნების მონაცემთა ერთმანეთთან შედარებისთვის ყოველი გამოცდის წინ ვახდენდით გამზომი მოწყობილობების კალიბრაციას-განულებას და მდგომარეობის შემოწმებას. მნიშვნელოვანი იყო, რომ თითოეული გამოცდისას სენსორები ერთი და იგივე პოზიციაში ყოფილიყვნენ. განსაკუთრებით ხმის სენსორი, ეს უკანასკნელი ყოველი გამოცდისას, გარკვეული მდებარეობით, ერთი და იგივე მანძილით იყო დაშორებული საჰაერო ხრახნისგან. ვინაიდან მისი

მცირედი გადაადგილებაც კი გარკვეულ ცდომილებას მოგვცემდა შედეგების შეჯამებისას.

სტენდზე საჰაერო ხრახნების გამოცდები ტარდებოდა შემდეგი თანმიმდევრობით: 1. ტრადიციული საჰაერო ხრახნი; 2. ოპტიმიზებულ ფრთოვანას დაბოლოებიანი (პროპლექტიანი) ხრახნი; 3. ფრთოვანას წინა ნაწილში ტურბულიზატორების მქონე ხრახნი; 4. ფრთოვანების ისრისებურობის მქონე ხრახნი; 5. თოლიასებრი ფრთოვანების მქონე საჰაერო ხრახნი პროპლექტით; 6. თოლიასებრი ფრთოვანების მქონე საჰაერო ხრახნი. თითოეულ მათგანი იცდებოდა განსხვავებულ ბრუნთა რიცხვებზე თანმიმდევრულად: 1) 2000; 2) 4000; 3) 6000; 4) 8000 ბრ/წთ. ბრუნთა რიცხვის მიღწევის და შედეგების დაფიქსირების შემდეგ ვახდენდით ხრახნის გაჩერებას და თავიდან აგვყავდა მომდევნო ბრუნთა რიცხვის მნიშვნელობაზე. ბრუნთა რიცხვის გაზომვის ცდომილება წარმოადგენდა ± 50 ბრ/წთ-ს რაც საშუალოდ 1% იანი ცდომილებაა და არსებითი გავლენა არ გააჩნია შედეგებზე.

ასევე, დანარჩენი პარამეტრების დაფიქსირებაც ხდებოდა მაღალი სიზუსტით, კერძოდ: საჰაერო ხრახნის მიერ შექმნილი წევის ძალის დაფიქსირება ხდებოდა 5 გრამის სიზუსტით. მოხმარებული დენის დაფიქსირება ხდებოდა 0.01A ამპერის სიზუსტით, ხოლო ძაბვის დაფიქსირება ხდებოდა 0.1V ვოლტის სიზუსტით. აქვე აღსანიშნავია რომ გამოცდების დრო ელექტრო ძრავს მიეწოდებოდა ძაბვის უცვლელი მნიშვნელობა 12V ოდენობით და ამიტომ ხრახნის მიერ მოხმარებული ენერჯის მნიშვნელობაზე მსჯელობა შეგვეძლო მხოლოდ მოხმარებული დენის მეშვეობით.

საჰაერო ხრახნების სასტენდო გამოცდების შედეგად მივიღეთ ძალზე საინტერესო და დამაიმედებელი შედეგები. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ჩატარებული ფიზიკური გამოცდების შედეგები პროპორციულად მაღალი სიზუსტით დაემთხვა კომპიუტერული სიმულაციების შედეგად მიღებულ შედეგებს. ხრახნების კუთრი მახასიათებლების პროპორციული გადანაწილება

თითქმის იდენტური იყო კვლევის ორივე მეთოდისთვის განსხვავებას 0.5%-1% წარმოადგენდა.

სასტენდო გამოცდები ტარდებოდა 4 განსხვავებულ ბრუნვის სიჩქარეზე: 2000; 4000; 6000; და 8000 ბრ/წთ, სიჩქარეთა ასეთი დიაპაზონი განპირობებულია მიღებული პარამეტრების კანონზომიერებების დადგენისთვის და გამოცდების ცდომილებების შემცირებისთვის, რეალურ გარემოში განხილულ ზომის საჰაერო ხრახნებზე გამოიყენება 6000 დან 8000 მდე ბრ/წთ სიჩქარეები, ხოლო 2000 ბრ/წთ შეიძლება ძრავის უქმი სვლის რეჟიმად ჩაითვალოს, 4000 ბრ/წთ კი მინიმალური წევის რეჟიმად. გამოცდებისას ფიქსირდებოდა შემდეგი პარამეტრები: წევის ძალა გრამებით (გრ); მოხმარებული ენერგია (A); და ხმაური - ხმის დაწნევი დონე (dB).

სასტენდო გამოცდების შედეგები, 6 ტიპის საჰაერო ხრახნისთვის, მოცემულია ცხრილში 3.2:

ცხრ.3.2 სასტენდო გამოცდების შედეგები 6 ტიპის საჰაერო ხრახნისთვის

ბრ/წთ	ტრადიციული			ოპრიმიზებული ბოლოებით (პროპლეტებით)			ტურბულიზატორები		
	A	გრ	dB	A	გრ	dB	A	გრ	dB
2000	0.3	20	46	0.2	35	45	0.3	50	43
4000	1.9	145	54	1.8	135	50	2	150	50
6000	6.3	335	57	5.8	305	57	6.4	330	57
8000	15.1	590	69	14.1	570	68	16	590	68
ბრ/წთ	ფრთოვანების ისრისებურობით			თოლიასებრი პროპლეტებით			თოლიასებრი		
	A	გრ	dB	A	გრ	dB	A	გრ	dB
2000	0.3	60	40	0.2	40	42	0.2	20	44
4000	2.8	205	53	1.5	120	50	1.5	110	50
6000	8.9	400	59	4.4	230	55	4.5	255	53
8000	22.3	720	68	9.8	445	64	10.4	445	67

როგორც ცხრილიდან ვხედავთ, სასტენდო გამოცდებისას, განხილულ საჰაერო ხრახნთაგან მაქსიმალური წევის ძალა, ბრუნვის სიჩქარის ყველა მნიშვნელობის დროს დააფიქსირა საჰაერო ხრახნმა ისრისებური ფრთოვანებით, მის მიერ შექმნილი წევის ძალა დანარჩენ ხრახნებს საშუალოდ 20 % ით აჭარბებდა, თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ ამისთვის მოხმარებული ენერგიის ხარჯიც საკმაოდ მაღალი

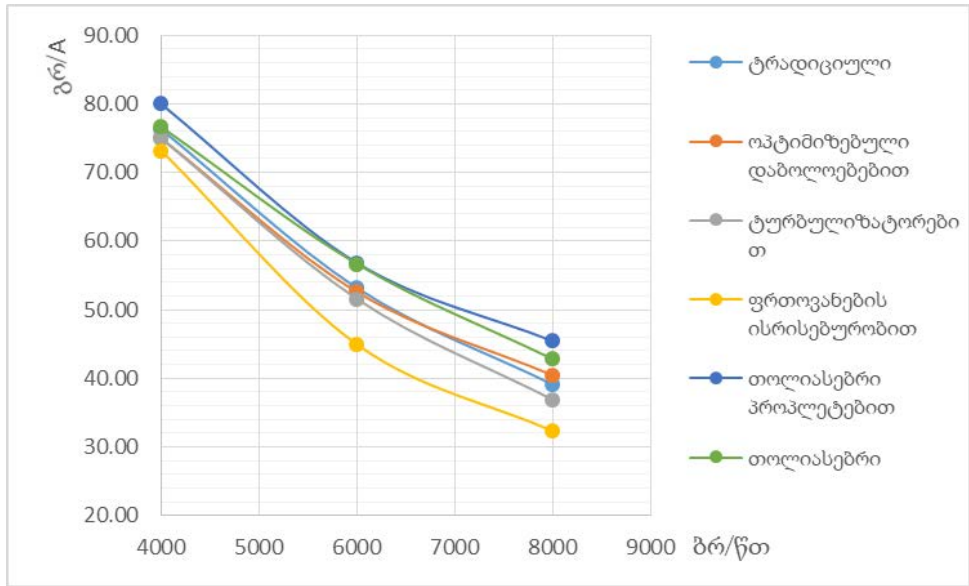
იყო. ხმაურის თვალსაზრისითაც აღნიშნულ განსაკუთრებული გაუმჯობესება არ გამოუვლენია.

ასევე ძალზედ საინტერესოა თოლიასებრ ფრთოვანებიანი საჰაერო ხრახნების შედეგები, იმის მიუხედავად, რომ მათ მიერ წარმოებული ამწევი ძალა, ერთი შეხედვით, შთამბეჭდავი არ არის. ამასთან, მათ მიერ დახარჯული ენერგია ძალზედ მცირეა რაც ამ ტიპის კონსტრუქციის მაღალ ეფექტურობაზე მეტყველებს. მართლაც, თუ შევადარებთ ენერგო ეფექტურობით (გრ/A) ტრადიციულ ხრახნთან შედარებით აღნიშნულნი 15-16% (ცხრ.3.2) უფრო ენერგოეფექტური გამოდის. გარდა ამისა, აღსანიშნია პროპლექტებიანი თოლიასებრი ხრახნის აკუსტიკური მახასიათებელი, რომელიც 5 ერთეულით ნაკლებია ტრადიციულზე.

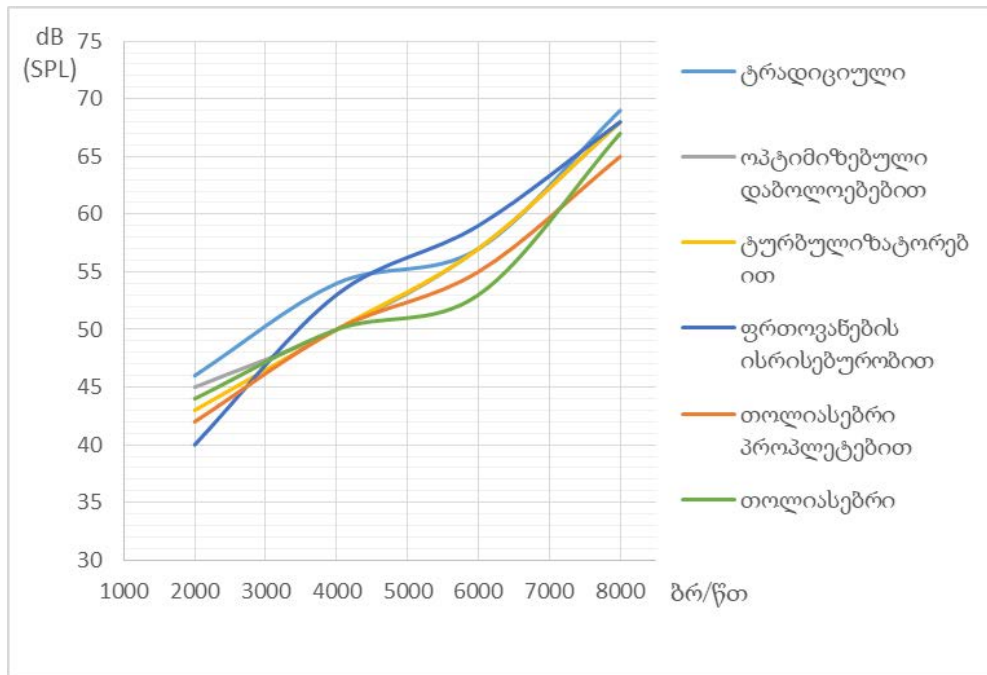
შედეგებიდან გამომდინარე, დანარჩენი ოპტიმიზებულ პროპლექტებთან და ტურბულიზატორებიანი საჰაერო ხრახნების გამოცდებმა ტრადიციული კონსტრუქციისგან დიდად განსხვავებული გაუმჯობესებული შედეგები არ გამოავლინეს. საჰაერო ხრახნების წარმოებული ენერგოეფექტურობის მახასიათებლები მოყვანილია ცხრილში 3.3:

ცხრ.3.3 ენერგოეფექტურობის მახასიათებლები

ბრ/წთ	ტრადიციული	ვინგლექტებით	ტურბულიზატორები თ
2000	66.67	175.00	166.67
4000	76.32	75.00	75.00
6000	53.17	52.59	51.56
8000	39.07	40.43	36.88
ბრ/წთ	ფრთოვანების ისრისებურობით	თოლიასებრი პროპლექტებით	თოლიასებრი
2000	200.00	200.00	100.00
4000	73.21	80.00	76.33
6000	44.94	56.27	56.67
8000	32.29	45.41	42.79



ნახ.3.11 ნახაზზე ნაჩვენებია საჰაერო ხრახნების ენერგოეფექტურობის (1 ამპერი დახარჯული ენერგიით მიღებული წევის ძალის) ბრუნთა რიცხვებზე დამოკიდებულების გრაფიკი



ნახ.3.12 საჰაერო ხრახნების აკუსტიკური მახასიათებლების ბრუნთა რიცხვებზე დამოკიდებულების გრაფიკი

მოყვანილი ცხრილებიდან და გრაფიკებიდან შეგვიძლია საჰაერო ხრახნთა განხილული კონსტრუქციები რამდენიმე კატეგორიად დავყოთ:

1. მაღალ ენერგოეფექტური
2. მაქსიმალური წვევის ძალის მქონე
3. მინიმალური აკუსტიკური მახასიათებლების მქონე

პირველ კატეგორიაში, რაც ითვალისწინებს მაღალ ენერგოეფექტურობას და რაც ერთ-ერთი მთავარი მოთხოვნაა, დღესდღეობით საჰაერო ხრახნებისთვის, სასტენდო გამოცდებიდან აშკარა უპირატესობით გამოიკვეთა თოლიასებრი ტეხილი ფრთოვანების კონსტრუქციის მქონე საჰაერო ხრახნები. კერძოდ ასეთი კონსტრუქციის Q-tip პროპლეტთან სინერგიული ვერსია, რომელმაც საექსპლუატაციო ბრუნთა რიცხვებზე ტრადიციულ კონსტრუქციასთან შედარებით 15% გააუმჯობესა ეს მახასიათებელი. ეს იმას ნიშნავს, რომ ასეთი ხრახნების გამოყენების შემთხვევაში საფრენი აპარატის ფრენის დრო გაიზრდება 15%-ით. დღესდღეობით, კომერციული კვადროკოპტერების საშუალო ფრენის ხანგრძლივობა 30 წთ-ა, აღნიშნული ხრახნით კი მისი დაახლოებით 5 წთ-ით გაზრდა გახდება შესაძლებელი.

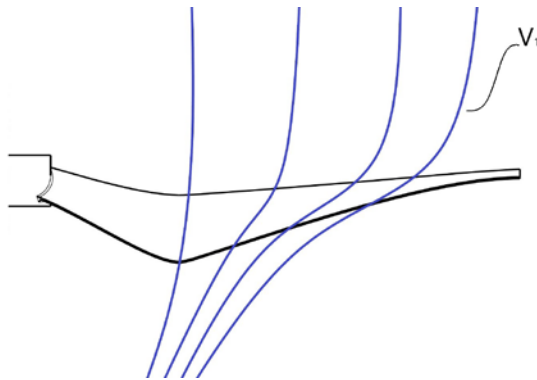
მეორე კატეგორიაში მაქსიმალური წვევის ძალის მქონე საჰაერო ხრახნი, გამოცდების ყველა რეჟიმისთვის, აშკარად გამოიკვეთა, ფრთოვანების ისრისებურობის მქონე საჰაერო ხრახნი. იმის მიუხედავად, რომ აღნიშნულმა საჰაერო ხრახნმა ენერგოეფექტურობის ძალზედ დაბალი მნიშვნელობა გვიჩვენა, ერთი დაიგივე ბრუნთა რიცხვების დროს მიღებული წვევის ძალა გაცილებით ჭარბობდა დანარჩენ საჰაერო ხრახნებს. რაც ასეთი ტიპის კონსტრუქციის მაღალ ამწევ უნარიანობაზე მეტყველებს და გამოყენებადს ხდის ისეთ შემთხვევებში, როდესაც ენერგოეფექტურობა არ გაითვალისწინება და მხოლოდ ამწევ უნარიანობაა საჭირო.

მესამე კატეგორიაში, ხმადაბლობა, რომელიც ასევე ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი მოთხოვნაა საჰაერო ხრახნებისთვის. გამოცდებმა გვიჩვენეს რომ ამ კატეგორიაშიც გამოიკვეთა თოლიასებრი საჰაერო ხრახნები, რომლებმაც დანარჩენ კონსტრუქციებთან შედარებით 2 დან 5 dB მდე შემცირებული აკუსტიკური მახასიათებლები აჩვენეს. აღნიშნული მოსალოდნელი იყო კონსტრუქციის

შესამჩნევად დაბალი აეროდინამიკური წინააღმდეგობიდან გამომდინარე, რაც ძირითადად წარმოადგენს ხოლმე ხმაურის წყაროს.

კვლევის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან შედეგს წარმოადგენს, მაღალ ენერგოეფექტური და შემცირებული ხმაურის მქონე თოლიასებრი ფრთოვანების მქონე საჰაერო ხრახნი. აღნიშნული კონსტრუქციის შედეგად მიღებული გაუმჯობესებული მახასიათებლები ძალზედ მნიშვნელოვან პარამეტრებს წარმოადგენს თანამედროვე საჰაერო ხრახნებისთვის. ამიტომ მიღებულ საჰაერო ხრახნის ტიპს რეალიზაციის და ბაზარზე დამკვიდრები დიდი პოტენციალი გააჩნია.

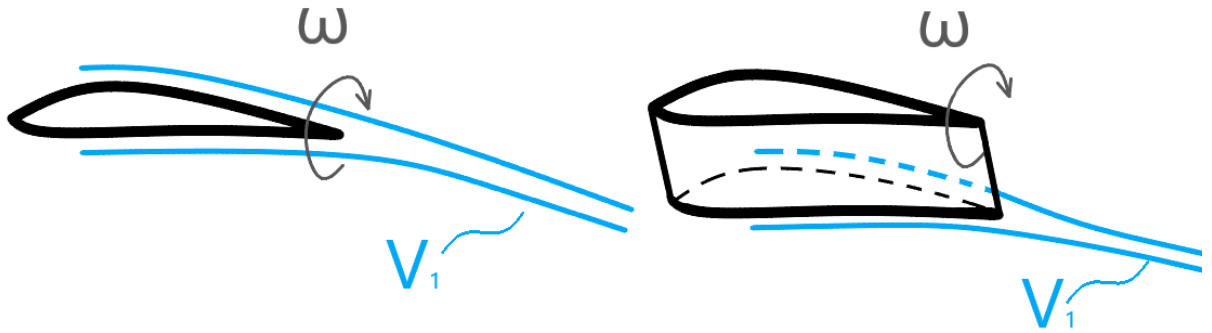
აღნიშნული საჰაერო ხრახნის მაღალი ენერგოეფექტურობის მიზეზს წარმოადგენს მისი ფრთოვანას სახეცვლილი კონსტრუქცია, რომელიც ჩვენი აზრით საგრძნობლად ამცირებს ხრახნის აეროდინამიკურ წინააღმდეგობას. ეს მიიღწევა ფრთოვანას სპეციფიური არაწრფივი, ტეხილი ფორმით, რომელიც ამცირებს ფრთოვანას უკან, დიდი მოცულობის, შეშფოთებული ჰაერის ტურბულენტური ზონის ჩამოყალიბებას, ახდენ მის ლოკალიზებას და უბიძგებს ბრუნვის სიბრტყის ნაკლებად საპასუხისმგებლო, ჰაერის დაბალი სიჩქარის მქონე ზონაში (ნახ.3.13). აღნიშნული ამცირებს როგორც წინააღმდეგობას ასევე ხრახნის მიერ წარმოებულ ხმაურს.



ნახ.3.13 თოლიასებრი საჰაერო ხრახნის ფრთოვანაზე ჰაერის გარსდენის ტრაექტორია. V1- ჰაერის ნაკადის ტრაექტორია

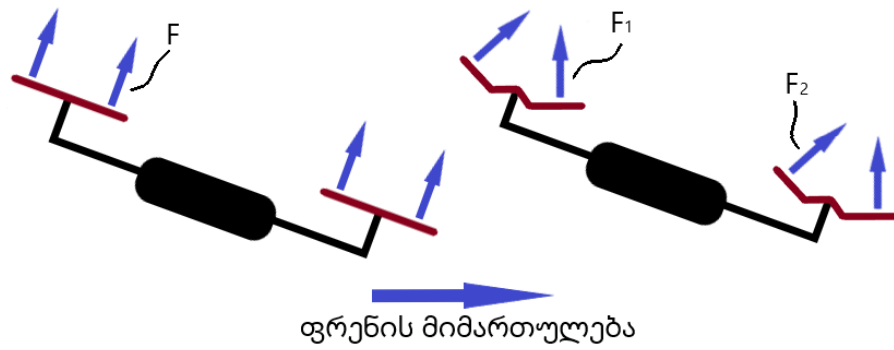
გარდა ამისა, ფრთოვანას ბრუნვის ღერძისადმი დახრილი ორიენტაციის წყალობით მცირდება ბოლოებში წარმოქმნილი გრიგალური ზონების გავლენა დანარჩენ ფრთოვანაზე, გამომდინარე იქიდან რომ ფრთოვანას ბოლო და

შესაბამისად გრიგალის წარმოქმნის კერა მდებარეობს ფრთოვანას ძირითადი ნაწილიდან მოშორებით, ზედა სიბრტყეში, ამიტომ აგრიგალეული ჰაერის გავლენა ფრთოვანას მიერ დაცვრებულ ნაკადზე შედარებით მცირეა. ეს კი ამცირებს საჰაერო ხრახნის საერთო ინდუქციურ წინაღობას (ნახ.3.14).



ნახ.3.14 ფრთოვანას ბოლოში წარმოქმნილი გრიგალის გავლენა ფრთოვანას უკან დაცვრებულ ჰაერის ნაკადზე. ω -გრიგალური ტრაექტორია; V_1 - დაცვრებული ჰაერის ტრაექტორია

ასევე, რევერსულ თოლიასებრი საჰაერო ხრახნის ფრთოვანების სპეციფიური კონფიგურაციამ თეორიულად დადებითი ზეგავლენა უნდა მოახდინოს კვადროკოპტერების და მსგავსი მრავალროტორიანი, ვერტიკალური აფრენა-დაფრენის აპარატებში. კერძოდ, ასეთი საფრენი აპარატის ჰორიზონტალურად გადაადგილებისათვის საჭიროა მოხდეს მისი მთლიანად გადახრა. ამ დროს ფრთოვანებზე მოქმედი ამწევი ძალის ვექტორი გადაიხრება ვერტიკალიდან და აპარატი დასტაბილურებას ცდილობს ასეთ დახრილ პოზიციაში. არაწრფივი გარდატეხილი ფრთოვანების შემთხვევაში, კი აპარატის ხსენებულ პოზიციაში ყოფნისას, ხრახნის ერთ ფრთოვანაზე ამწევი ძალა იქნება ვერტიკალურად მიმართული (ნახ.3.15) ხოლო მეორეზე ფრენის მიმართულებით (ნახ.3.15). საჰაერო ხრახნზე ამწევ ძალთა ასეთმა განაწილებამ მულტიროტორიან აპარატებზე უნდა მოგვცეს გაზრდილი ფრენის სიჩქარე და უფრო სტაბილური მართვა.



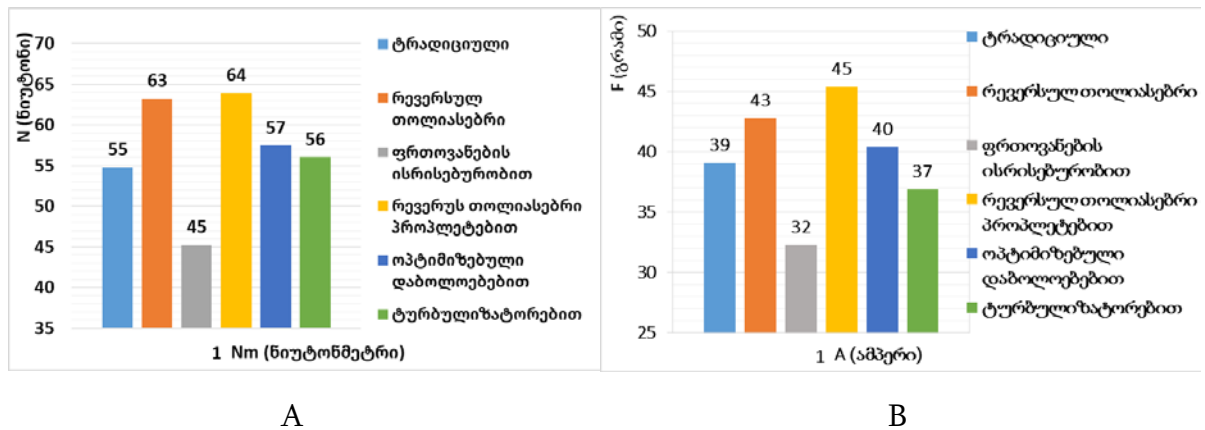
ნახ.3.15 ნორმალური და თოლიასებრი საჰაერო ხრახნებით აღჭურვილ კვადროკოპტერზე, ამწევ ძალათა გადანაწილების სქემა: F- ამწევი ძალის ვექტორი ფრთოვანაზე; F1- ვერტიკალური ამწევი ძალის ვექტორი რევერსულ-თოლიასებრ ფრთოვანაზე; F2- წვევის ძალის ვექტორი ფრენის მიმართულებით რევერსულ-თოლიასებრ ფრთოვანაზე

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე რევერსულ-თოლიასებრი საჰაერო ხრახნის გამოყენება მიზანშეწონილი იქნება მულტიროტორულ ვერტიკალური აფრენა-დაფრენის (eVTOL) აპარატებში. მისი საკმაოდ ამაღლებული ენერგოეფექტურობის, შემცირებული ხმაურის, გაზრდილი სტაბილურობის და ფრენის სიჩქარეების გამო.

ბოლოს შეგვიძლია ვთქვათ, რომ სადოქტორო კვლევისას მიღებულმა შედეგებმა სავსებით შესაძლებელია დადებითი გავლენა მოახდინოს მულტიროტორიან ვერტიკალური აფრენა-დაფრენად აპარატების მახასიათებლების საგრძნობად გაუმჯობესებაზე და მათ მუშაუნარიანობაზე.

3.5. მიღებული შედეგების უტყუარობა და რეალიზაცია

სადოქტორო კვლევის განმავლობაში საკვლევი თემატიკის გარშემო გამოყენებული იქნა ორი განსხვავებული ერთმანეთისგან დამოუკიდებელი მეთოდი, რომელთა საშუალებითაც მოხდა საჰაერო ხრახნების საკვლევ მოდელებზე გამოთვლებისა და ექსპერიმენტების განხორციელება. საჰაერო ხრახნებზე ტარდებოდა კომპიუტერული სიმულაციები და სასტენდო გამოცდები რეალურ გარემოში.



ნახ.3.16 A-კომპიუტერული სიმულაციების შედეგად მიღებული ენერგოეფექტურობის მახასიათებლები, B-რეალურ გარემოში გამოცდებით მიღებული ენერგოეფექტურობის მახასიათებლები

ნახ.3.16 ვხედავთ სიმულაციების და ნატურალური ექსპერიმენტების შედეგად მიღებული ენერგოეფექტურობის მახასიათებლების დიაგრამებს. მიუხედავად განსხვავებული პარამეტრებისა (ერთ შემთხვევაში გვაქვს N/Nm და მეორეში F/A) ორივე მათგანი გამოხატავს ხრახნის მიერ წარმოქმნილ წევის ძალას ერთეული ენერჯის დანახარჯის შედეგად, ამიტომ მათი ერთმანეთთან რიცხობრივი შედარება არა მაგრამ პროპორციული შედარება შესაძლებელია. ნახ.3.16 გამოსახული დიაგრამებიდან ვხედავთ, რომ მნიშვნელობები პროპორციულად მსგავსადაა გადანაწილებული, ანუ პროცენტულად ორივე მეთოდის შემთხვევაში ხრახნებმა დაახლოებით ერთნაირი ზრდა ან შემცირება აჩვენეს ენერგოეფექტურობისა, მაგალითად რევერსულ თოლიასებრი ხრახნი

პროპლეტებით ორივე მეთოდის შემთხვევაში 15-16%-იან გაუმჯობესებას აჩვენებს ტრადიციულ კონსტრუქციასთან შედარებით. ყოველივე ეს კი გვამბობს იმის თქმის საშუალებას რომ კვლევის შედეგები უტყუარია და შესაძლებელია რეალიზაცია.

სადისერტაციო კვლევის შედეგად მიღებული საჰაერო ხრახნის გამოყენების სფერო ძალზედ დიდია. როგორც ვიცით დღესდღეობით საზოგადოებაში ძალზე დიდი პოპულარობით სარგებლობს მცირე ზომის დისტანციურად მართვადი საფრენი აპარატები, იქნება ეს მულტიროტორიანი, ვერტიკალურად თუ ჰორიზონტალურად მფრენი დრონები. ამჟამად, ყველა მათგანისთვის სასურველია ენერგოეფექტურობის არსებული დონის ამაღლება და მათი ვიბრო-აკუსტიკური დონის შემცირება. ეს ყველაფერი კი დაკავშირებულია ძირითადად ასეთ საფრენ აპარატებში გამოყენებულ საჰაერო ხრახნების გეომეტრიული პარამეტრების გაუმჯობესებასთან.

დღესდღეობით არსებული როგორც ჰორიზონტალური ასევე ვერტიკალურად აფრენა-დაფრენის დრონებისთვის კვლევებით მიღებული რევერსულ თოლიასებრი საჰაერო ხრახნის მოდელი ყველაზე პერსპექტიულ კონსტრუქციას წარმოადგეს.

სპეციფიური დანიშნულების დრონებში არანაკლებ მნიშვნელოვანია დიდი ტვირთამწეობა. ამ მიმართულებით ყველაზე პერსპექტიულ კონსტრუქციად გამოიკვეთა საჰაერო ხრახნი ფრთოვანების ისრისებურობით. ასეთი სახის საჰაერო ხრახნი შეძლებს უზრუნველყოს შესაბამის საფრენი აპარატები მაღალი წევით ძალით.

ბოლოს უნდა აღინიშნოს ისიც რომ სადოქტორო კვლევის მიზანს წარმოადგენდა საჰაერო ხრახნის გეომეტრიული ოპტიმიზაციის და სახეცვლილების გზით მისი მახასიათებლების გაუმჯობესება, რაც მიღწეული იქნა და მოინახა ისეთი კონფიგურაციები, რომლებიც პერსპექტიულ შედეგებს გვამბობენ. თუმცა მომავალში სასურველია და აუცილებელია მოხდეს კონკრეტულად ამ კონსტრუქციებზე ფოკუსირება და მათი ოპტიმიზება მაქსიმალური შედეგების მისაღებად.

3.6. მესამე თავის დასკვნები

- გაანალიზებული და გამოკვლეული იქნა შერჩეული პერსპექტიული საჰაერო ხრახნების მოდელების თვისებები კომპიუტერული სიმულაციების მიხედვით.
- გაანალიზდა საჰაერო ხრახნების გამოცდების მეთოდები შემუშავდა დამზადდა საჰაერო ხრახნების გამოსაცდელი სტენდი.
- გაანალიზდა საჰაერო ხრახნების დამზადების თანამედროვე ტექნოლოგიები. შერჩეული და ოპტიმიზებული იქნა საჰაერო ხრახნების დამზადების 3D ბეჭდვის მეთოდი.
- ჩატარდა ექსპერიმენტალური გამოცდები შერჩეულ საჰაერო ხრახნებზე. დამუშავდა ისინი და მოხდა მათი შედარება ერთმანეთთან. შედეგად 5 პერსპექტიული ხრახნის მოდელიდან სიმულაციურ და ექსპერიმენტულ შედეგებთან თანხვედრაში შეირჩა საუკეთესო მახასიათებლების საჰაერო ხრახნის მოდელი.

ძირითადი დასკვნა

ჩატარებული სადოქტორო სამეცნიერო კვლევითი სამუშაოების ანალიზის შედეგად შეგვიძლია გამოვიტანოთ შემდეგი დასკვნა:

- საფუძვლიანად იქნა შესწავლილი დღესდღეობით არსებული საჰაერო ხრახნების კონსტრუქციები და სტრუქტურა, გაანალიზებული იქნა მათი ძირითადი მუშა ზონები, რომელთა კონსტრუქციული ცვლილებებით და მეცნიერული ანალიზის შედეგად მოხდა საჰაერო ხრახნების ეფექტური მახასიათებლების გაუმჯობესება. შესწავლილი იქნა საჰაერო ხრახნების პროექტირების და კვლევის თეორიული, კომპიუტერული და ექსპერიმენტული მეთოდები. ამისათვის გამოყენებული იქნა 3 განზომილებიანი პროექტირების, აეროდინამიკური და ვიბრო-აკუსტიკური ანალიზის კომპიუტერული პროგრამები. შესწავლილი იქნა თანამედროვე უპილოტო საფრენი აპარატების ელექტრონული სისტემები, საჰაერო ხრახნების გამოცდის მეთოდები და შემუშავდა მათი ექსპერიმენტული კვლევების სასტენდო დანადგარი. გამოკვლეული იქნა საჰაერო ხრახნების წარმოების ტექნოლოგია და დამზადების მეთოდები. შემუშავდა კვლევისთვის საჭირო კონცეპტუალური მოდელების დამზადების ყველაზე თანამედროვე, 3D ბეჭდვის ოპტიმალური ტექნოლოგია.
- დადგინდა საჰაერო ხრახნების გეომეტრიული პარამეტრები, რომელთა ვარირებით და ოპტიმიზაციით შესაძლებელი გახდა საჰაერო ხრახნის მახასიათებლების მნიშვნელოვანი გაუმჯობესება. სამეცნიერო კვლევების შედეგად შემუშავდა საჰაერო ხრახნის პერსპექტიული, მაღალ ენერგოეფექტური და ნაკლებ ხმაურიანი კონსტრუქციები, რომელსაც ტრადიციულ კონსტრუქციებთან შედარებით აქვს 15%-ით გაუმჯობესებული ენერგოეფექტურობა და 6 dB-ით შემცირებული ხმაური. აღნიშნული საჰაერო ხრახნით აღჭურვილი საფრენი აპარატი შეძლებს ფრენის დრო 15%-ით გააუმჯობესოს.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. ა. მაისურაძე. საავიაციო აირტურბინული ძრავები. საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი. 2018.
2. ო. კემულარია, თ. ოზგაძე. უპილოტო საფრენი აპარატების ავტომატიზებული პროექტირების საფუძვლები (მონოგრაფია). საქართველოს საინჟინრო აკადემია. 2022.
3. ს. ტეფნაძე, გ. სანაძე, დ. ლელაძე. აეროდინამიკა. საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი. 2010
4. თ.კაპანაძე ი.პაიჭაძე. დაგრიგალების პრობლემის გადაწყვეტის მეთოდოლოგიის ერთ-ერთი მიდგომის შესახებ. საჰაერო ტრანსპორტი. საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი. 2015.
5. ვ. ზურაბიშვილი, ბ. ნადარაია. აეროდრომების და მათთან მისასვლელი საჰაერო სივრცის მოდელირების საკითხები. საჰაერო ტრანსპორტი. საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი. 2020.
6. ს. ბლიაძე, გ. ცირეკიძე, კ. დვალისვილი. ნაკრები კონსტრუქციის ანალიზი კომპლექსური პროგრამა FEMAP-NASTRAN -ის გამოყენებით. საჰაერო ტრანსპორტი. საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი. 2019
7. J. H. Xu; W. P. Song; X. D. Yang. Effects of Proplet on Propeller Efficiency. International council of the aeronautical sciences. 2020.
8. Michael rown. Seth Schroeder. Elias Balaras. Vortex Structure Characterization of Tip-Loaded Propellers. Fourth International Symposium on Marine Propulsors. 2015.
9. E.L. Houghton; P.W. Carpenter; Steven H. Collicott; Daniel T. Valentine. Aerodynamics for Engineering Students Sixth Edition. 2012.
10. A. Ieta, M. Chirita. First thrust measurements in ionic multi-propeller rotational engines. Propulsion and Power Research. 2023.
11. T. Li, S. Sun. Numerical study on the scale effects of two-dimensional cycloidal propellers. Ocean Engineering. 2023
12. I. Kim, D. Yoo, J. Jeong, S. Kim, D. You. Domain reduction strategy for large-eddy simulation to predict underwater radiated noise from a marine propeller. Ocean Engineering. 2023
13. V. Viitanen, T. Sipil, A. Sánchez-Caja, T. Siikonen. CFD predictions of unsteady cavitation for a marine propeller in oblique inflow. Ocean Engineering. 2022
14. N. Mourousias , A. García-Gutiérrez, A. Malim , D. Domínguez Fernández , B. G. Marinus , Mark C. Runacres. Uncertainty quantification study of the aerodynamic performance of high-altitude propellers. Aerospace Science and Technology.2022
15. G. Chen, B. Chen, P. Li, P. Bai, C. Ji. Numerical Simulation Study on Propeller Slipstream Interference of High Altitude Long Endurance Unmanned Air Vehicle. Procedia Engineering. 2015

16. E. Cros , M. Roger, G. Serre. Low-frequency amplification of propeller tonal noise due to the scattering by a compact rigid cylinder. *Journal of Sound and Vibration*. 2023
17. X. Liu, D. Zhao, N. Lin Oo. Comparison studies on aerodynamic performances of a rotating propeller for small-size UAVs. *Aerospace Science and Technology*. 2023
18. G. Sun, X. Lin, X. Yi, P. Zhang, R. Liu, B. Fu, Y. Sun, J. Li, S. Jiao, T. Tian, X. Xu, K.-Wen Tseng, C.-Hsien Lin. Aircraft noise, like heat stress, causes cognitive impairments via similar mechanisms in male mice. *Chemosphere*. 2021
19. PHILIPPE R. SPALART. On the far wake and induced drag of aircraft. *Journal of Fluid Mechanics*. 2008
20. S. Monsch. A Study of Induced Drag and Spanwise Lift Distribution for Three-Dimensional Inviscid Flow Over a Wing. *Clemson University TigerPrints*. 2007
21. P. Sforza. Wing Design. *Commercial Airplane Design Principles*. 2014
22. P. Breeze. Rotors and Blades. *Wind Power Generation*. 2016
23. C. Bak. Aerodynamic design of wind turbine rotors. *Wind Energy Systems*. 2011
24. Adam M. Ragheb, Michael S. Selig. Multielement Airfoils for Wind Turbines. *Wind Energy Engineering*. 2017
25. Iñaki Armendáriz, Javier S. Millán, José M. Encinas, José Olarra. Strategies for dynamic failure analysis on aerospace structures. *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Aerospace and Automotive Industries*. 2016
26. B.C. Carter. Airscrew Blade Vibration. *The Aeronautical Journal*. 2016
27. I. Armendáriz, J. Olarra, J. García-Martínez. Parametric analysis of a highly dynamical phenomena caused by a propeller blade loss. *Engineering Failure Analysis*. 2015
28. Thomas H. Hansen, Franz Muhle. Winglet optimization for a model-scale wind turbine. *Wind energy*. 2018
29. Moble Benedict, Justin Winslow, Zohaib Hasnain and Inderjit Chopra. Experimental Investigation of Micro Air Vehicle Scale Helicopter Rotorin Hover. *Seagup*. 2015
30. Nicholas K. Borer and Michae D. Patterson. X-57 High-Lift Propeller Control Schedule Development. *NTRS - NASA Technical Reports Server*. 2020
31. M.L. PavanKishore, R.K. Behera. Determination of Optimal Stacking Sequence for Modal Characteristics Evaluation of Composite Marine Propeller Blade. *Journal of Mechanical Design and Vibration*. 2014
32. D. Kumar, S. Faruque Ali, A. Arockiarajan. Structural and Aerodynamics Studies on Various Wing Configurations for Morphing. *IFAC-PapersOnLine*. 2018
33. David L. Chandler. A new twist on airplane wing design. *MIT News Office*. 2016
34. Ruimin Sun, Daichin. Experimental investigation on tip vortices and aerodynamics. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2011
35. Low and High Speed Propellers for General Aviation. Performance Potential and Recent Wind Tunnel Test Results, *NASA Technical Memorandum 81745*

36. Завалов О.А. Башаров Е.А. Конструкция лопастей несущих и рулевых винтов 2021.
37. В. И. Шайдаков - Влияние близости земли на аэродинамические характеристики летательного аппарата с несущей системой "винт в кольце". 2006.

გამოყენებული ინტერნეტ რესურსები:

38. Wired.com - <https://www.wired.com/2007/12/gallery-helicopter/>
39. Blogspot.com - <http://okigihan.blogspot.com/p/propeller-aerodynamic-process-airplane.html>
40. copanational.org - <https://copanational.org/en/2016/12/08/a-look-at-propeller-efficiency/>
41. thaitechnics.com - http://www.thaitechnics.com/propeller/prop_intro.html
42. diydrones.com - <https://diydrones.com/profiles/blogs/a-brand-new-propeller-deisgn>
43. sustainableskies.org - <http://sustainableskies.org/eas-viii-high-efficiency-forward-swept-propellers-low-speed/>
44. bigrep.com - <https://bigrep.com/posts/bionic-propeller-nature-inspiring-innovation/#>
45. blog.modernmechanix.com - <http://blog.modernmechanix.com/propeller-ring-raises-planes-speed/> [Accessed 15.03.2023]
46. [nas.nasa.gov](https://www.nas.nasa.gov) - <https://www.nas.nasa.gov/SC18/demos/demo11.html>
47. aviastar.org - <http://www.aviastar.org/tm/vint.html>
48. uspto.report - <https://uspto.report/patent/app/20210147091>
49. 3dprinting.com - <https://3dprinting.com/news/super-quiet-drone-propeller-design-wins-contest/>