

ჰაერსატარ სისტემებში მყარი ნაწილაკების დეტექტირებისა და რაოდენობის შეფასების გაუმჯობესებული მოდელი ულტრაბგერითი მეთოდის გამოყენებით

ბიძინა აბესაძე¹, გიორგი თაყაძე²

¹ საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

² ალტე უნივერსიტეტი, უნივერსიტეტის ქუჩა №2, 0177 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: წარმოდგენილი ნაშრომი ეხება ჰაერსატარ სისტემებში უცხო მყარ ნაწილაკებთან დაკავშირებული პრობლემების შესწავლას და მათ აღრიცხვაზე დაფუძნებული ულტრაბგერითი მეთოდის განვითარებას. თანამედროვე ინდუსტრიული და საავიაციო სისტემების გამართულობა მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია ჰაერის ნაკადის სისუფთავესა და სტაბილურობაზე. გარემოდან სისტემაში მოხვედრილი მტვერი, ქვიშა, ფერფლი ან ლითონის მიკრონაწილაკები იწვევენ აბრაზიულ ცვეთას, ზედაპირების ეროზიას, ტურბინებისა და კომპრესორების დეფორმაციას, რაც ამცირებს დანადგარის ენერგოეფექტურობას და ზრდის ავარიული მწყობრიდან გამოსვლის რისკს. ამ ფონზე, აუცილებელია შეიქმნას არაინვაზიური მეთოდი, რომელიც რეალურ დროში შეძლებს ჰაერსატარ არხებში მყარ ნაწილაკთა აღმოჩენასა და რაოდენობრივ შეფასებას სისტემის მუშაობის შეჩერების გარეშე.

კვლევის ფარგლებში შემოთავაზებულია ულტრაბგერითი სენსორული სისტემა, რომელიც იყენებს გამგზავნი და მიმღები ტრანსდუსერების წყვილს. მათ შორის გამავალი ტალღა რეაგირებს გარემოს არაერთგვაროვნებაზე, უცხო ნაწილაკებზე, რაც იწვევს ტალღის გაფანტვას, შთანთქმას ან ფაზურ ცვლილებას. სისტემის მუშაობის პრინციპი ეფუძნება ტალღის გავრცელების დროისა და ამპლიტუდის ცვლილებების ანალიზს, რაც შესაძლებელს ხდის ნაწილაკების ზომისა და კონცენტრაციის განსაზღვრას. მოყვანილია თეორიული მოდელები, რომლებიც აღწერს ულტრაბგერის გავრცელების სიჩქარის, ტალღის სიგრძისა და გარემოს სიმკვრივის ურთიერთდამოკიდებულებას, აგრეთვე მყარ ნაწილაკებთან გაფანტვის ეფექტებს Rayleigh-ისა და Mie-ის მოდელების საფუძველზე.

მიღებული შედეგები ადასტურებს, რომ ულტრაბგერითი მეთოდი წარმოადგენს ეფექტურ, ეკონომიურ და ეკოლოგიურად უსაფრთხო საშუალებას ჰაერსატარ სისტემების მდგომარეობის კონტროლისთვის. შემოთავაზებული მოდელის დანერგვა მნიშვნელოვნად გააუმჯობესებს სისტემების სანდოობასა და ექსპლუატაციის ხანგრძლივობას როგორც საავიაციო, ისე ენერგეტიკულ ინდუსტრიაში.

საკვანძო სიტყვები: ულტრაბგერა, ჰაერსატარი სისტემა, მყარი ნაწილაკები, სენსორული დიაგნოსტიკა, აკუსტიკური მონიტორინგი.

შესავალი

თანამედროვე ინდუსტრიაში, განსაკუთრებით საავიაციო და ენერგეტიკულ სფეროში, ჰაერსატარ სისტემებს განსაკუთრებული დატვირთვა აქვთ. ეს სისტემები უზრუნველყოფს ჰაერის ნაკადის რეგულაციას, გაგრილებას, წნევის ბალანსს, აგრეთვე საწვავის წვის ხარჯის კონტროლს. ასეთი სისტემები მგრძნობიარეა გარემოსა და მასში მოხვედრილი ნაწილაკების მიმართ. უცხო მყარ ნაწილაკებზე დაკვირვება და მათი დროული იდენტიფიკაცია არა მხოლოდ ტექნიკური პრობლემების პრევენციისთვის, არამედ ადამიანთა სიცოცხლისა და უსაფრთხოების დასაცავადაც არის კრიტიკულად მნიშვნელოვანი. ჰაერსატარ სისტემაში მოხვედრილი მყარი ნაწილაკები შეიძლება იყოს მტვერი, ქვიშა, ფერფლი, სეტყვა, ბეტონის საფარის ნამსხვრევი, ლითონის მიკრონაწილაკები, გამხმარი ზეთის წვეთები ან თუნდაც ლითონის მინიატურული ფრაგმენტები, რომლებიც წარმოიქმნება სისტემის შიდა კომპონენტების ცვეთის შედეგად. მათი არსებობა ჰაერში შესაძლოა გამოწვეული იყოს როგორც ბუნებრივი პირობებით (მაგალითად, უდაბნოში მოქმედი ქვიშის ქარები, ვულკანური ფერფლი ან ატმოსფერული მტვერი), ისე ტექნოგენური ფაქტორებით (ტექნიკური ცვეთა, ძრავის ან ფილტრების ხარვეზი, არასწორი მოვლა-შენახვა). მიუხედავად იმისა, რომ ეს ნაწილაკები ვიზუალურად უმნიშვნელოა, რეალურად, მაღალი წნევისა და ტემპერატურის პირობებში მოქმედებენ როგორც აბრაზიული მასალა და იწვევს მექანიზმის ნაწილების ეროზიას, კოროზიასა და სისტემური არასტაბილურობის ეფექტებს. თვითმფრინავის რეაქტიულ ძრავებში ჰაერსატარი სისტემები შემადგენელი მთავარი კომპონენტებია. აქ ჰაერი გადის კომპრესორებსა და ტურბინებს შორის, სადაც წნევა და ტემპერატურა ატმოსფეროსთან შედარებით მკვეთრად იზრდება. ამ პირობებში ჰაერში მოხვედრილი მყარი ნაწილაკები აზიანებს კომპრესორის და ტურბინის ნიჟებს, რაც იწვევს მათ დეფორმაციას, ეფექტურობის შემცირებასა და წვის პროცესის არათანაბარ გადანაწილებას; ადგილი აქვს ეროზულ დაღლას, რაც იწვევს მიკრობზარების წარმოქმნას და შემდგომად მეტალის ფრაგმენტაციას; აზინძურებს სენსორებს, რაც ართულებს რეალურ დროში მექანიკური პარამეტრების კონტროლს. იწვევს არაპროგნოზირებად ვიბრაციებს და ძრავის გადახურებას, რაც შესაძლოა დასრულდეს ძრავის მწყობრიდან გამოსვლით.

ამ ფაქტთან დაკავშირებით ერთ-ერთი ფართოდ ცნობილი შემთხვევა იყო 2010 წელს, როდესაც ისლანდიის ვულკანური ფერფლის გამო ევროპის თითქმის ყველა რეისი გაუქმდა. აღსანიშნავია, რომ ვულკანური ფერფლი რეაქტიულ ძრავში მოხვედრისას არ დნება, არამედ გაღებობასა და ხელახლა გამყარებასთან ერთად ქმნის შუშის მსგავს მყარ ფენას, რომელიც ლითონურ ზედაპირებს ედება და აფუჭებს სისტემას. ენერგეტიკაში, განსაკუთრებით გაზის ტურბინებში, ჰაერსატარი სისტემის ფუნქციური მუშაობა გადამწყვეტია მისი სტაბილური მუშაობისთვის. მყარ ნაწილაკებს შეუძლია გამოიწვიოს: მილების ან არხების დახშობა, რაც იწვევს აირების წნევის არათანაბარ განაწილებას; გაგრილების სისტემაში წყლის/ჰაერის ნაკადის დაბრკოლებას, რის გამოც იზრდება მოწყობილობათა ტემპერატურა და ხდება მათი დაზიანება; წვის კამერაში დაუწველი მასალის დაგროვება, ზრდის CO და NOx-ის გამოყოფას და ამცირებს მისი მუშაობის ეფექტურობას. გარდა ტექნიკური პრობლემებისა, მყარ ნაწილაკებთან დაკავშირებული გაუმართაობები ხშირად იწვევს მექანიზმების ავარიულ გაჩერებებს, რითაც ირღვევა საწარმოო გრაფიკი, იზრდება ფინანსური დანახარჯი მათი

რემონტისთვის და შესაძლოა გამოიწვიოს მათი კრიტიკული დაზიანება, რომელიც საჭიროებს ძვირადღირებულ შეკეთებას ან კომპონენტის სრულ გამოცვლას.

თანამედროვე ინდუსტრიული ინფრასტრუქტურა სულ უფრო მეტად დამოკიდებულია ისეთ კომპლექსურ სისტემებზე, რომლებიც ახორციელებენ გაზის, ჰაერის ან სხვა ნაკადების ტრანსპორტირებას (როგორც მაგისტრალური ასევე სტაციონალური რეზერვუარების მილსადენები) მაღალი წნევისა და ტემპერატურის პირობებში. ამ დროს მცირე გადაცდომაც კი, მაგალითად მყარი ნაწილაკის მოხვედრა ჰაერსატარ მილში, შეიძლება გახდეს სისტემის მუშაობის მოშლის ან ენერგოეფექტიანობის სერიოზული შემცირების მიზეზი. უფრო კრიტიკულია მდგომარეობა საავიაციო და ენერგეტიკულ სექტორში, სადაც ასეთმა პროცესებმა შეიძლება გამოიწვიოს არა მხოლოდ ტექნიკური ზიანის მატება, არამედ ადამიანური უსაფრთხოების პირობების მნიშვნელოვანი გაუარესება. სწორედ აღნიშნული ფაქტორების გათვალისწინებით გაიზარდა მოთხოვნა მეთოდების მიმართ, რომლებიც უზრუნველყოფს ჰაერსატარ სისტემების მონიტორინგს არაინვაზიური გზით, სისტემის მუშაობის შეჩერების გარეშე. ამ კონტექსტში ულტრაბგერითი მეთოდი გამოიკვეთა როგორც პერსპექტიული და ეფექტური მეთოდოლოგია [5, 6].

ულტრაბგერითი დიაგნოსტიკა ეფუძნება მაღალი სიხშირის ბგერითი ტალღების გამოყენებას, რომლებიც ვრცელდება ერთგვაროვან გარემოში შეფერხების გარეშე და აირეკლება შეუსაბამოებზე არაერთგვაროვანი ჩანართების სახით, როგორიცაა სხვა სიმკვრივის მცირე ზომის სხეულები. ასეთი მიდგომა საშუალებას იძლევა, დროულად იქნეს აღმოჩენილი როგორც სტრუქტურული დეფექტები, ასევე უცხო მყარი ნაწილაკები, რომლებიც შესაძლოა აკუმულირდეს სისტემის შიგნით. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია იმ მოწყობილობებისთვის, რომლებიც მუდმივად ექვემდებარება აეროდინამიკურ, თერმულ ან ქიმიურ დატვირთვებს. ენერგეტიკულ სექტორში, მაგალითად გაზის ტურბინებში ან კომპრესორებში, მიკროსკოპულმა დაზიანებებამაც კი შეიძლება გამოიწვიოს ნაკადის სიმძლავრის კლება, წვის რეჟიმის დარღვევა ან საბოლოოდ ტურბინის დაზიანება [7]. ულტრაბგერითი მეთოდის საშუალებით კი შესაძლებელია რეალურ დროში სისტემის მუშაობაზე მონიტორინგი და შედეგად დადგინდეს, სად და რა სახის ცვლილებები მიმდინარეობს. აღნიშნული მიდგომა მნიშვნელოვნად ამცირებს არაგეგმიური გაჩერებების საჭიროებას და ზრდის სისტემის ექსპლუატაციის ხანგრძლივობას. ავიაციის შემთხვევაში საკითხი კიდევ უფრო კომპლექსურია. თვითმფრინავის ძრავებში უცხო ნაწილაკების შეწოვამ, განსაკუთრებით ქვიშის ან სხვა წვრილი მყარი ნაწილაკების სახით, შეიძლება გამოიწვიოს ძრავის შიდა ელემენტების აბრაზიული ცვეთა. ეს პროცესი ხშირად შეუმჩნეველი რჩება ვიზუალური ინსპექტირების დროს. თუმცა ულტრაბგერითი სკანირებით შესაძლებელია განისაზღვროს ცვეთის ლოკაცია, სიღრმე და გავრცელების დინამიკა ასევე შესაძლებელია მოხდეს სისტემაში გამავალი უცხო ნაწილაკების იდენტიფიკაცია და მათი მასური ხარჯის განსაზღვრა. გარდა ამისა, ულტრაბგერითი მეთოდი გამოირჩევა ტექნოლოგიური მოქნილობით, ის არ საჭიროებს რთულ სამონტაჟო მოწყობილობებს. ეს ნიშნავს, რომ შესაძლებელია მათი ინტეგრირება უკვე არსებული სისტემების ზედაპირზე, როგორც ფიქსირებული, ისე პორტატული მოწყობილობების სახით. ამასთანავე, თანამედროვე ავტომატიზირებული ულტრაბგერითი მოწყობილობები აღჭურვილია მონაცემთა დამუშავების სისტემებით, ის რაც არა მხოლოდ მონაცემების შეგროვების საშუალებას იძლევა, არამედ მათზე რეაგირების ავტომატიზაციასაც. ამრიგად, ულტრაბგერითი მეთოდი დანერგვის საჭიროება არა მხოლოდ

ტექნიკური პრიორიტეტი, ასევე ეკონომიკური და უსაფრთხოების თვალსაზრისით აუცილებელი სტრატეგიაა. მაღალი სიზუსტით დაფიქსირებული პრობლემები საშუალებას იძლევა, ოპერატორებმა მიიღონ ინფორმირებული გადაწყვეტილებები სისტემის შეკეთებისა ან ექსპლუატაციის გაგრძელების თაობაზე, რაც საბოლოო ჯამში ზრდის ოპერაციულ საიმედოობას, ამცირებს ავარიული გაჩერებების რისკს და უზრუნველყოფს ადამიანური უსაფრთხოების მაღალ სტანდარტს [10, 11, 12].

ძირითადი ნაწილი

1. ულტრაბგერითი მეთოდის ფიზიკური პრინციპები და უპირატესობები

ულტრაბგერითი ტალღა არის მექანიკური ტალღა, რომლებიც ვრცელდება მატერიალურ გარემოში და მათი სიხშირე აღემატება ადამიანის სმენის ზღვარს (>20 kHz). განსხვავებით ელექტრომაგნიტური ტალღებისგან, ულტრაბგერითი ტალღების გავრცელებისთვის აუცილებელია მატერიის არსებობა, რადგან ისინი ეფუძნება მოლეკულებს შორის მექანიკური ბიძგების გადაცემას.

ტალღების გავრცელების მექანიზმი დამოკიდებულია გარემოს ელასტიკურობაზე, სიმკვრივეზე და სტრუქტურაზე. ტალღის სიჩქარე განისაზღვრება ფორმულით:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

სადაც v – ტალღის სიჩქარე, E – გარემოს დრეკადობის (იუნგის) მოდული და ρ – გარემოს სიმკვრივე.

ულტრაბგერა ვრცელდება როგორც მყარ გარემოში ასევე სითხეებსა და აირებში. ტალღები იყოფა ორ კატეგორიად გრძივი და განივი. გრძივი ტალღა წარმოადგენს ისეთი ტიპის ელასტიურ ტალღას, რომელშიც გარემოს მოლეკულური გადაადგილება ტალღის გავრცელების მიმართულების პარალელურად ხდება. ასეთ ტალღებში პერიოდულად წარმოქმნილია შეკუმშვის და განშლის ზონები, რაც ქმნის წნევის მერყეობას. გრძივი ტალღები გავრცელების უნარს ინარჩუნებს როგორც მყარ, ისე თხევად და აირად გარემოში, რაც მათ განსაკუთრებით ეფექტურს ხდის სამრეწველო და ბიოსამედიცინო გამოყენებებში.

ტალღის სიჩქარე გრძივი ტალღისთვის დამოკიდებულია გარემოს ელასტიკურობაზე და სიმკვრივეზე:

$$v_L = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (2)$$

სადაც K – მოცულობითი მოდულია (bulk modulus), G – შერობის მოდული (shear modulus) და ρ – გარემოს სიმკვრივე.

განივი ტალღა ისეთი ტიპის ტალღაა, რომელშიც გარემოს მოლეკულები ოსცილირებენ ტალღის გავრცელების მიმართულების მართობულად. ეს ტალღები ვრცელდება მხოლოდ მყარ გარემოში. განივი ტალღის სიჩქარე განისაზღვრება ფორმულით:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3)$$

განივი ტალღა უფრო მგრძნობიარეა მასალის შიდა დეფექტების მიმართ, განსაკუთრებით, წვრილი ბზარებისა და ძნელად აღმოსაჩენი შეღწევების შემთხვევაში.

პრაქტიკაში ურღვევი კონტროლის NDT სისტემებში ყველაზე გავრცელებული ფორმაა ულტრაბგერითი მეთოდი, ხოლო ზემოთ აღნიშნული მიზეზით, დეტალური დეტექტირებისათვის ხშირად განივი ტალღები გამოიყენება.

2. ულტრაბგერითი მეთოდის ეფექტურობა ნაწილაკების დეტექტირებაში

ულტრაბგერითი დეფექტოსკოპიის ეფექტურობის მთავარი ფაქტორი ტალღის სიგრძესა და უცხო სხეულის ზომას შორის დამოკიდებულებაა. ტალღის გაფანტვის ან შთანთქმის უნარი ნაწილაკზე დამოკიდებულია იმაზე, რამდენად შეესაბამება ტალღის სიგრძე კონკრეტული სხეულის გეომეტრიულ პარამეტრებს. როგორც წესი, სისტემა მაღალი ეფექტურობით აფიქსირებს ისეთ მყარ ნაწილაკებს, რომელთა ზომა შედარებულია ან აღემატება ტალღის სიგრძის ნახევარს.

ტალღის სიგრძე, თავის მხრივ, დაკავშირებულია სიხშირესთან შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (4)$$

სადაც λ — ტალღის სიგრძეა, v — ტალღის გავრცელების სიჩქარე კონკრეტულ გარემოში, ხოლო f — მისი სიხშირე. მაგალითად, ჰაერში, სადაც ტალღის სიჩქარე დაახლოებით 343 მ/წმ-ია, 40 კჰც სიხშირის ტალღის სიგრძე იქნება დაახლოებით 8.5 მმ. შესაბამისად, ასეთი პარამეტრებით, ულტრაბგერითი სენსორი ეფექტურად დააფიქსირებს ისეთ ნაწილაკებს, რომელთა ზომა 4–8 მმ-ზე მეტია. უფრო მაღალი სიხშირეების გამოყენება (მაგ. 500 კჰც – 1 მჰც) ტალღის სიგრძეს ამცირებს და შესაძლებელს ხდის მიკრონული ზომის ნაწილაკების დეტექტირებას, თუმცა ასეთ შემთხვევაში ტალღა ჰაერში უფრო ადვილად იბნევა და საჭირო ხდება სიგნალის მნიშვნელოვანი გაძლიერება ან უფრო მგრძნობიარე მიმღებების გამოყენება.

ეფექტურობა მცირდება, როდესაც ტალღის სიგრძე აღემატება დეტექტირებადი სხეულის ზომას. ასეთ შემთხვევაში ტალღა მარტივად „შემოუვლის“ სხეულს და არ ხდება არც აღქმადი შთანთქმა და არც გამოკვეთილი ანარეკლი. ამ ფაქტის ახსნა შესაძლებელია გაფანტვის თეორიით, კერძოდ Rayleigh-ს ან Mie-ის მოდელით, რომელიც აღწერს ტალღის ქცევას მცირე ზომის ნაწილაკებთან შეჯახებისას. მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როცა ნაწილაკი ქმნის ტალღისთვის საკმარის შეფერხებას. ე.ი. ხდება ტალღის მნიშვნელოვან წილად არეკვლა ან შთანთქმა, შეიძლება ჩაითვალოს, რომ შესაძლებელია ეფექტური დეტექტირება [3, 13, 14].

აღსანიშნავია, რომ ულტრაბგერითი სისტემა ასევე რეაგირებს ტალღის ფაზაში ან იმპულსის ხანგრძლივობაში მომხდარ მცირედ ცვლილებებზე, რაც საშუალებას იძლევა დეტექტირება მოხდეს ნაწილაკებზე, რომლებიც სრულად არც შთანთქმენ და არც ირეკლავენ ტალღას. მაგალითად, თუკი ტალღა გადაადგილდება ნაწილაკის მახლობლად და ხდება მისი გაფანტვა, მიკროდეფორმაციები ან ფაზური ცვლილებები შეიძლება გაშიფრულ იქნას როგორც არაერთგვაროვანი გარემოს ინდიკატორი. თუმცა, ასეთი მეთოდები მოითხოვს მაღალგარჩევად და კომპლექსურ სიგნალზე დაფუძნებულ ანალიტიკურ ალგორითმებს.

მსგავსი მიდგომების გამოყენება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია საავიაციო და ენერგეტიკულ სისტემებში, სადაც შესაძლოა ჰაერსატარ არხში მოხვდეს არა მხოლოდ მტვერი, არამედ მიკრონული ზომის ქვიშის, ვულკანური მტვრის, კლდოვანი ნამსხვრევების, ლითონის ნამსხვრევების ან სეტყვის ნაწილაკები. იმისათვის, რომ სისტემამ ეფექტურად იმუშაოს რეალურ გარემოში, მაღალი ტემპერატურით, ტურბულენტობითა და ხმაურით გამოწვეულ პირობებში, აუცილებელია ოპტიმალური ბალანსის პოვნა სიხშირეს, მგრძნობელობას და ტალღის გავრცელების დისტანციას შორის [1, 2, 4].

ამრიგად, სისტემა მაქსიმალურად ეფექტურია მაშინ, როდესაც, ტალღის სიგრძე სადარია ნაწილაკის ზომის ან ოდნავ ნაკლებია. გარემო პირობები არ შეუშლის ხელს ტალღის გავრცელებას, სიგნალის ანალიზის დროს გათვალისწინებული იქნება ფაზური და ამპლიტუდური ცვლილებები, რაც აუმჯობესებს სისტემის სიზუსტეს.

ეს კრიტერიუმები ქმნის ფიზიკურ ჩარჩოს იმისთვის, თუ როგორ უნდა იყოს დაპროექტებული და მორგებული ულტრაბგერითი სენსორები კონკრეტული გამოყენების სფეროებისთვის.

3. ჰაერსატარ სისტემებში უცხო ნაწილაკების რაოდენობის თეორიული შეფასება: მოდელი, გამოთვლები და პრაქტიკული მნიშვნელობა

3.1 ჰაერის სიმკვრივის ცვლილება უცხო ნაწილაკების არსებობისას ჰაერსატარ სისტემებში

ჰაერსატარ სისტემების მუშაობისას ჰაერის სიმკვრივე წარმოადგენს ერთ-ერთ მნიშვნელოვან პარამეტრს, რადგან იგი განსაზღვრავს ნაკადის დინამიკას, წნევის ვარდნას, ენერგომოხმარებას და მოწყობილობის ეფექტურობას. იდეალურ პირობებში, როცა ჰაერი გამჭვირვალეა და არ შეიცავს მყარ ნაწილაკებს, მისი სიმკვრივე სტანდარტული ატმოსფერული პირობების მიხედვით (25°C , 1 atm) შეადგენს დაახლოებით 1.184 კგ/მ^3 . თუმცა, როგორც კი გარემოში გაჩნდება უცხო მყარი ნაწილაკები (მტვერი, ქვიშა, მიკრო-მრავალკომპონენტიანი ფაზები), საშუალო სიმკვრივის შეფასებისას ჩნდება დამატებითი მათგან გამოწვეული დამატებითი წვლილი.

ეს ცვლილება განპირობებულია არა მხოლოდ ჰაერში დამატებითი მასის არსებობით, არამედ ამ მასის ზომით, განაწილებით და კონცენტრაციით. შედეგად, სისტემა რეალურად მუშაობს არა სუფთა ჰაერზე, არამედ ჰაერისა და ნაწილაკების ნარევიზე, ანუ მრავალფაზიან გარემოზე.

3.2 ჰაერში შერეული მყარი ნაწილაკების უარყოფითი გავლენა მექანიზმების მუშაობაზე

ჰაერსატარ არხებში უცხო მყარ ნაწილაკთა შეღწევა წარმოადგენს ტექნოლოგიურ გამოწვევას, განსაკუთრებით იმ თვალსაზრისით, თუ როგორ მოქმედებს ეს მექანიკური გავლენა სისტემის მთლიანობაზე. ერთ-ერთი პირველი და უმთავრესი შედეგი, რაც წარმოიშობა ასეთ შემთხვევაში, არის ზედაპირული დაზიანება, რომელიც ყველაზე ხშირად ვლინდება კონსტრუქციული მასალის დამცავი ფენების მთლიანობის დარღვევით.

დამცავი შრე, რომელიც სპეციალურად არის შექმნილი გარემოს აგრესიული ფაქტორებისგან კონსტრუქციის ძირითადი მასალის დასაცავად, მყარ ნაწილაკებთან შეჯახების შედეგად შესაძლოა მნიშვნელოვნად დაზიანდეს. აღნიშნული დაზიანებები ხშირად წარმოდგენილია მიკრობზარების,

ლოკალური ეროზიის ან ზედაპირული ჭრილობების სახით. მსგავსი მექანიკური დეფექტები ქმნის პირობებს, რომლებიც განსაკუთრებით ხელსაყრელია ქიმიური კოროზიული პროცესების გააქტიურებისთვის.

დამცავი შრის დაზიანების შემდგომ, ზედაპირი ხდება დაუცველი გარემოში არსებული აგრესიული ქიმიური კომპონენტების მიმართ. მაგალითად, ატმოსფერული პირობებიდან შემომავალი ტენიანობა, მარილოვანი ნაწილაკები, დამჟავებული წვეთები ან სხვა ქიმიურად აქტიური ნაერთები თავისუფლად აღწევენ ზედაპირზე და იწყებენ ლოკალურ კოროზიულ რეაქციებს. აღნიშნული პროცესი სწრაფად იწვევს ლითონის ზედაპირის ქიმიურ დეგრადაციას, რაც პოტენციურად იწვევს მიკრო სტრუქტურების დანგრევას, მექანიკური მდგრადობის შემცირებასა და გრძელვადიან პერსპექტივაში – სისტემური გაუმართაობის რისკს.

მიმდინარე კვლევები აჩვენებს, რომ ქიმიური კოროზიის გააქტიურება მჭიდროდ არის კავშირში არა მხოლოდ დაზიანების მასშტაბთან, არამედ იმ გარემოს ხასიათთანაც, სადაც სისტემა ფუნქციონირებს – მაღალი ტემპერატურა, ტენიანობა და წნევა აჩქარებს კოროზიულ მექანიზმებს. ამის გათვალისწინებით, მყარი ნაწილაკების დროული აღმოჩენა და მათი ზემოქმედების პროგნოზირება კრიტიკულად მნიშვნელოვანია სისტემის გამართულობის შენარჩუნებისთვის, რაც საბოლოოდ აისახება როგორც ფუნქციური უსაფრთხოების, ისე ეკონომიკური დანახარჯების მართვაში.

3.3 მყარი ნაწილაკებით შერეული ჰაერის ნაკადის სიმკვრივის განსაზღვრა

მყარი ნაწილაკების შემცველი ჰაერის ნაკადის საშუალო სიმკვრივე შეიძლება განისაზღვროს შემდეგნაირად:

$$\rho_{\text{შერ}} = \rho_{\text{ჰ}} + \varphi \cdot \rho_{\text{ნაწ}} \quad (5)$$

სადაც $\rho_{\text{შერ}}$ — მყარი ნაწილაკების შემცველი ჰაერის საშუალო სიმკვრივეა, $\rho_{\text{ჰ}}$ — სუფთა ჰაერის სიმკვრივე, $\rho_{\text{ნაწ}}$ — ნაწილაკების სიმკვრივე (მაგ. კვარცისათვის $\rho_{\text{ნაწ}} \sim 2600$ კგ/მ³) და φ — ნაწილაკების მოცულობითი წილი. მაგალითად, თუკი ჰაერში შერეული ნაწილაკების მოცულობითი წილი 0.5%-ია და მათი სიმკვრივე $\rho_{\text{ნაწ}} = 2500$ კგ/მ³, მაშინ ჰაერის საშუალო სიმკვრივე გამოვა $\rho_{\text{შერ}} = 1.184 + 0.005 \cdot 2500 = 13.684$ კგ/მ³. გამოვა, რომ სისტემა იმუშავებს ბევრად უფრო მკვრივ ინერციულ ნარევეზე, რაც მოითხოვს მეტ ენერგიას, ზრდის ტურბულენტობას, ნაწილების ზემოქმედებას და აჩქარებს მექანიკური ცვეთას.

ჰაერის სიმკვრივის ასეთი ცვლილებები პირდაპირ ზემოქმედებს ჰაერსატარ სისტემის მრავალ მახასიათებელზე:

- იცვლება დინამიკა და ნაკადის პროფილი – უფრო მკვრივი ნარევი განსხვავებულად გადაადგილდება მილებში ან ტურბინებში;
- იზრდება წნევის ვარდნა – საჭიროა მეტი ენერგია ნაკადის გასატარებლად;
- ზიანდება სენსორული სისტემები (მაგ. მასობრივი ნაკადის მრიცხველები) შეიძლება შეცდომით აღირიცხოს ნარევის პარამეტრები.

აქედან გამომდინარე, ჰაერსატარ სისტემებში სასურველია დამაგრებული იყოს სიმკვრივეზე მგრძნობიარე სენსორები, ან ულტრაბგერით მეთოდზე დაფუძნებული ხელსაწყოები, რომლებიც აღწერენ არაწრფივ ნაწილაკთა სტრუქტურას და აკონტროლებენ სიმკვრივის მატებას დროში. ასევე, შესაძლებელია ჰაერის განუწყვეტელი მონიტორინგი ავტომატიზებული ან ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული ანალიზით, რომელიც წინასწარ აფიქსირებს, რომ ნარევის ჯამური მასა გადაცდა დასაშვებ ზღვარს.

ჰაერის სიმკვრივის ცვლილება დაბინძურებული გარემოს პირობებში წარმოადგენს უპირატესად მნიშვნელოვან ფაქტორს ჰაერსატარ მოწყობილობათა მუშაობის უსაფრთხოებისა და რესურსების მართვის კუთხით. მასზე დაკვირვება არა მხოლოდ პრევენციული დიაგნოსტიკის საშუალებას იძლევა, არამედ ინჟინერს აძლევს ზუსტ, რაოდენობრივ სურათს სისტემის რეალური მდგომარეობის შესახებ. ულტრაბგერითი მეთოდები და შესაბამისი მოდელები ქმნიან იმ ტექნოლოგიურ საფუძველს, რომლის გამოყენებაც აუცილებელია თანამედროვე საავიაციო, ენერგეტიკულ და ინდუსტრიულ სექტორებში [6, 14].

4. ულტრაბგერის მეთოდზე დაფუძნებული მყარი ნაწილაკებით შერეული ჰაერის საშუალო სიმკვრივის განსაზღვრის მეთოდოლოგია

4.1 მეთოდის პრინციპი

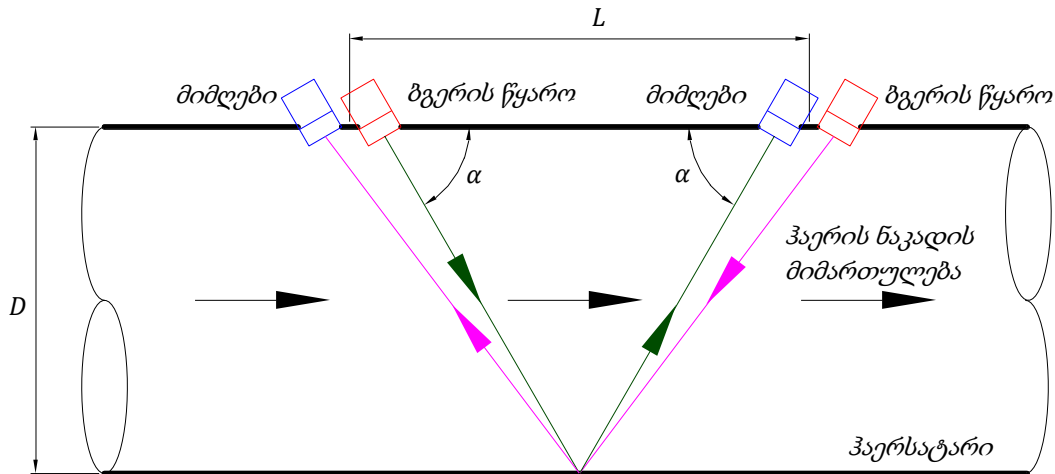
წარმოდგენილი კვლევის ფარგლებში შემოთავაზებულია ულტრაბგერითი ტალღებზე დაფუძნებული სენსორული სისტემა, რომელიც განკუთვნილია ჰაერსატარ მილებში უცხო მყარი ნაწილაკების აღმოჩენისთვის. სისტემის ძირითადი ელემენტებია გამგზავნი (emitter) და მიმღები (receiver) პიეზოელექტრონული სენსორები, რომლებიც ერთმანეთის მიმართ გარკვეული კუთხით არიან განლაგებული კონსტრუქციაზე, ერთ მხარეს (სურ. 1) ან სხვადასხვა მხარეს (სურ. 2) ორივე მხარეს. ულტრაბგერითი ტალღა, რომელსაც უშვებს გამგზავნი, გადის ჰაერში და აღწევს მიმღებამდე მანამ, სანამ არ აღმოჩნდება ნაკადში ისეთი მყარი ნაწილაკი, რომელიც ტალღას ან გაფანტავს, ან ნაწილობრივ შთანთქმავს. აღირიცხება როგორც ტალღის გაბნევის ინტენსიობა ასევე გავრცელების დრო.

ულტრაბგერითი სენსორები ტალღას აგზავნიან ჰაერის ნაკადში, რომელიც მოძრაობს მილში. თუ გარემო ჰომოგენურია და უცხო ნაწილაკებისგან თავისუფალი, ტალღა გავრცელდება წრფეზე მიმღებისკენ. ჰაერის ნაკადით გამოწვეული დროის სხვადასხვა მაჩვენებელი (ტალღის ვექტორის მიმართულებით და საწინააღმდეგოდ) გვამლევენ საშუალებას განვსაზღვროთ ნაკადის სიჩქარე. მყარ ნაწილაკთა არსებობა გავლენას ახდენს ტალღის გავრცელებაზე, განსაკუთრებით მიკრონაწილაკების შემთხვევაში, სადაც წარმოიშობა გაფანტვა, შთანთქმა ან რეფრაქცია [15, 16, 17].

4.2 მოწყობილობის კონფიგურაცია

პირველი ვარიანტის მიხედვით (სურ. 1), გადამწოდები უნდა განლაგდეს „V“ ფორმის სარკისებური ტრაექტორიის შესაბამისად, რაც უზრუნველყოფს მათი ერთ მხარეს განლაგების მაღალ

ეფექტურობას. ამ დროს გეომეტრიული პარამეტრებია ტრანსდიუსერებს შორის ჰორიზონტალური დაშორება L და ჰაერსატარი მილის დიამეტრი D .



სურ. 1 ჰაერსატარი მილის ერთ მხარეს განლაგებული გადამწოდები

ტრანსდიუსერის სარეკომენდაციო მოდელია 400EP14D, რომელიც უზრუნველყოფს 6 dB (დეციბელი), 135° სხივის სიგანეს, რაც იძლევა ტალღის ფართო დაფარვის საშუალებას.

ჰაერის ნაკადის მიმართულებით და საწინააღმდეგოდ ტალღის გავრცელების დრო იანგარიშება (6) გამოსახულებებით

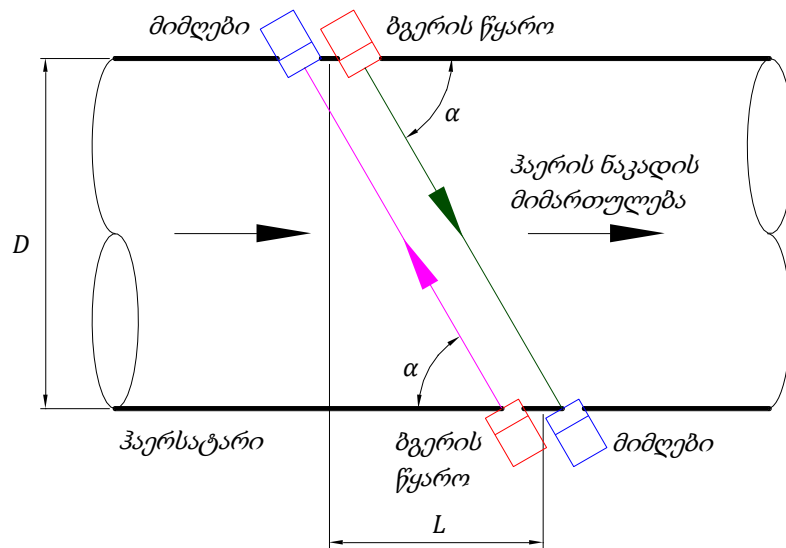
$$t_{\text{მოძ}} = \frac{L}{c+v \cos \alpha} \text{ და } t_{\text{საწ}} = \frac{L}{c-v \cos \alpha} \quad (6)$$

საიდანაც ჰაერის ნაკადის სიჩქარე (v) და ბგერის სიჩქარე (c) გამოითვლება შემდეგი ფორმულებით:

$$v = \frac{L}{2 \cos \alpha} \cdot \frac{t_{\text{საწ}} - t_{\text{მოძ}}}{t_{\text{საწ}} t_{\text{მოძ}}} \text{ და } c = \frac{L}{2} \cdot \frac{t_{\text{საწ}} + t_{\text{მოძ}}}{t_{\text{საწ}} t_{\text{მოძ}}} \quad (7)$$

სადაც L — ტრანსდიუსერებს შორის მანძილია, α — ტრანსდიუსერების დახრის კუთხე ჰაერის ნაკადის მიმართ, $t_{\text{საწ}}$ — დრო რომელიც სჭირდება ტალღას მოძრაობისთვის ნაკადის საწინააღმდეგოდ, $t_{\text{მოძ}}$ — დრო რომელიც სჭირდება ტალღას მოძრაობისთვის ნაკადის მიმართულებით.

მეორე ვარიანტის მიხედვით (სურ. 2) გადამწოდები განლაგებულია კონსტრუქციის სხვადასხვა მხარეს. ნაკადის მიმართულებით და საწინააღმდეგოდ სიგნალის გავრცელების დროების განსაზღვრა იგივენაირად ხდება, როგორც პირველ შემთხვევაში, შესაბამისად, აქაც სამართლიანია (6) და (7) გამოსახულებები.



სურ. 2 ჰაერსატარი მილის სხვადასხვა მხარეს განლაგებული გადამწოდები

ჰაერის არაერთგვაროვანი შერეული ნაკადების საშუალო მაჩვენებლების განსაზღვრისთვის რეკომენდებულია მინიმუმ ორი ურთიერთმართობულ სიბრტყეში განლაგებული სენსორული სისტემის დამონტაჟება. ასევე სანდო შედეგების მისაღებად უნდა მოხდეს მცირე დროით შუალედებში მრავალჯერადი გაზომვები და მიღებული შედეგების გასაშუალოება.

ნაწილაკებით შერეული ჰაერის ნაკადში გავრცელებული ულტრაბგერის სიჩქარის სიდიდის მიხედვით უკვე შესაძლებელი იქნება შერეული ნაკადის სიმკვრივის გაზომვაც, რომელიც ხდება შემდეგნაირად: ბგერის სიჩქარე ჰაერში განისაზღვრება ფორმულით:

$$c = \sqrt{\frac{K_{\text{გვ}}}{\rho_{\text{გვ}}}} \quad (8)$$

სადაც $K_{\text{გვ}}$ არის ნაწილაკებით შერეული ნაკადის ეფექტური მოცულობითი მოდული (Bulk Modulus). თუ ნაწილაკების კონცენტრაცია მცირეა მაშინ შეიძლება ის ჩავთვალოთ სუფთა ჰაერის შესაბამისი მნიშვნელობის ტოლად

$$K_{\text{გვ}} \approx K_{\text{ჰაერი}} = \gamma P \quad (9)$$

სადაც γ არის ჰაერის ადიაბატური მაჩვენებელი ($\gamma_{\text{ჰაერი}} = C_P/C_V \approx 1.4$), ხოლო P ჰაერის წნევა. (8) და (9) გამოსახულებებიდან მივიღებთ:

$$\rho_{\text{გვ}} \approx \frac{\gamma P}{c^2} \quad (10)$$

ხოლო ჰაერში შერეული ნაწილაკების მოცულობითი წილი (5) ფორმულიდან გამომდინარე იქნება:

$$\varphi \approx \frac{\gamma P / c^2 - \rho_3}{\rho_{\text{ნაწ}}} \quad (11)$$

ამრიგად, წარმოდგენილი მეთოდიკა იძლევა საშუალებას განისაზღვროს მყარი ნაწილაკებით შერეული ჰაერის საშუალო სიმკვრივე და ნაწილაკების მოცულობითი წილი.

დასკვნა

წარმოდგენილი კვლევა აჩვენებს, რომ ჰაერსატარ სისტემებში უცხო მყარი ნაწილაკების არსებობა ერთ-ერთ მნიშვნელოვან პრობლემას წარმოადგენს, როგორც საავიაციო, ისე ენერგეტიკულ და ინდუსტრიულ დანადგარებში. აღნიშნული ნაწილაკები, მათი მცირე ზომის მიუხედავად, მოქმედებენ როგორც აბრაზიული ელემენტები, რომლებიც იწვევენ მექანიკური კომპონენტების ზედაპირის დაზიანებას, დამცავი შრეების დარღვევას და შემდგომ ქიმიური კოროზიის გააქტიურებას. შედეგად მცირდება სისტემის ენერგოეფექტურობა, იზრდება ხარჯი ტექნიკურ მომსახურებაზე და იქმნება ავარიული მწყობრიდან გამოსვლის საფრთხე. ამ ვითარების პრევენციისა და დროული დიაგნოსტიკის მიზნით, ულტრაბგერითი მეთოდი წარმოდგება როგორც ერთ-ერთი პერსპექტიული და საიმედო მიდგომა. მისი მთავარი უპირატესობა მდგომარეობს არაინვაზიურ (ურღვევ) ხასიათში. მისი გამოყენებისას არ ხდება სისტემის გაჩერების ან დაშლის საჭიროება, რაც ოპერაციულად მნიშვნელოვან უპირატესობას წარმოადგენს თანამედროვე ტექნოლოგიურ პირობებში.

შესწავლილი მოდელის საფუძველზე დასტურდება, რომ ტალღის სიგრძის და ნაწილაკის ზომის შესაბამისობა წარმოადგენს კრიტიკულ ფაქტორს დეტექტირების სიზუსტისთვის. მაღალი სიხშირის (40–500 კჰც) ულტრაბგერითი ტალღები ეფექტურად აიდეენტიფიცირებენ მიკრონული და მილიმეტრიანი ზომის ნაწილაკებს, რომლებიც ხშირად განსაზღვრავენ სისტემის საერთო დაზინძურების ხარისხს. ჩატარებული თეორიული ანალიზი ცხადყოფს, რომ ტალღის სიგრძის შემცირებასთან ერთად იზრდება გაფანტვის ეფექტურობა, თუმცა ამასთან ერთად მცირდება ტალღის გავრცელების მანძილი ჰაერში, რაც მოითხოვს სენსორების მგრძნობელობისა და გამძლეობის ოპტიმიზაციას.

მიღებული ფორმულარული დამოკიდებულებები საშუალებას იძლევა, შეფასდეს ჰაერში მყარი ნაწილაკების მოცულობითი წილი და მათ მიერ გამოწვეული სიმკვრივის ცვლილება. ეს პარამეტრი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ნაკადის დინამიკაზე, წნევის ვარდნაზე და სისტემის ენერგომოხმარებაზე. შესაბამისი სენსორული სქემის მეშვეობით შესაძლებელია რეალურ დროში ამ ცვლილებების კონტროლი და მონაცემთა ინტერპრეტაცია, რაც ინჟინერს აძლევს შესაძლებლობას დროულად შეაფასოს სისტემის დაზინძურების დონე.

კვლევის შედეგების პრაქტიკული დანერგვა მრავალმხრივ სარგებელს იძლევა. ერთი მხრივ, უზრუნველყოფილია სისტემის საიმედოობის და უსაფრთხოების ამაღლება, მეორე მხრივ კი, მცირდება ენერგომოხმარება და ტექნიკური მომსახურების სიხშირე. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მეთოდის გამოყენება საავიაციო დრავებში, სადაც უცხო ნაწილაკების შეწოვამ შესაძლოა გამოიწვიოს ტურბინის ბალანსის დარღვევა ან ნიჩბების დეფორმაცია.

ამრიგად, შემოთავაზებული ულტრაბგერითი მეთოდი წარმოადგენს ეფექტურ, ეკონომიურად გამართლებულ და ეკოლოგიურად უსაფრთხო საშუალებას ჰაერსატარ სისტემების მონიტორინგისა

და უცხო მყარი ნაწილაკების იდენტიფიკაციისათვის. მის საფუძველზე შესაძლებელია შეიქმნას ავტომატიზირებული დიაგნოსტიკური მოდულები, რომლებიც გაზრდიან ინდუსტრიული და საავიაციო მოწყობილობების ექსპლუატაციის რესურსს, შეამცირებენ ავარიული შემთხვევების ალბათობას და უზრუნველყოფენ ოპტიმალურ მუშაობას რეალურ გარემოში.

მადლიერება: კვლევა განხორციელდა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მხარდაჭერით [FR-24-4684, ჰაერსატარ მოწყობილობებში მრავალკომპონენტური მყარი ნაწილაკების შემცველი ნარევი ნაკადების მახასიათებლების კვლევა, მათი გაზომვისა და დეტექტირების ეფექტური მეთოდოლოგიის დამუშავება].

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Molaie, Saeed, et al. 2021. "Review of the Newly Developed, Mobile Optical Sensors for Real-Time Measurement of the Atmospheric Particulate Matter Concentration." *Sensors (Basel)* 21, no. 6: 1–25. <https://doi.org/10.3390/s21062236>;
2. Sánchez-Barajas, Martín Aarón, Daniel Cuevas-González, Marco A. Reyna, Juan C. Delgado-Torres, Eladio Altamira-Colado, and Roberto López-Avitia. 2023. "Development of a Low-Cost Particulate Matter Optical Sensor for Real-Time Monitoring." *Engineering Proceedings* 58, no. 1 (41): 1–6. <https://doi.org/10.3390/ecsa-10-14521>;
3. Zhang, Y., et al. 2025. "Direct Measurement Techniques for Atmospheric Aerosol: A 20-Year Review." *Atmospheric Environment* (in press);
4. Höpner, F., et al. 2019. "Investigation of Two Optical Methods for Aerosol-Type Identification." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124 (4): 2080–2095;
5. Moon, C. Y., et al. 2021. *Particle Sensing in Gas Turbine Inlets Using Optical Measurements and Machine Learning*. PhD Thesis / Technical Report. Virginia Tech;
6. Massabò, D., et al. 2021. "An Overview of Optical and Thermal Methods for Carbonaceous Aerosol Characterization." *Atmosphere* 12 (3): 316–333;
7. United States Patent Application US 20090029870 A1. "Particle Analyzing Systems and Methods Using Acoustic Resonance and Flow Measurement." Filed January 29, 2009;
8. Wang, S., et al. 2023. "Review of Ultrasonic Particle Manipulation Techniques." *Micromachines* 14 (7): 1376. <https://doi.org/10.3390/mi14071376>;
9. Tiitta, M., et al. 2020. "Air-Coupled Ultrasound Detection of Natural Defects in Wood Using Ferroelectret and Piezoelectric Sensors." *Wood Science and Technology* 54: 1471–1487;
10. Lv, N., et al. 2025. "Exploring the Progress and Challenges of Ultrasonic Technology in Environmental Remediation." *Ultrasonics Sonochemistry* 106 (105917): 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.105917>;
11. Virginia Tech / ASME Group. 2023. "Virginia Tech Optical Inlet Sensor for Particle Detection." *ASME Turbo Expo: Gas Turbine Technology Conference Proceedings*;
12. Boyce, Meherwan P., ed. *Gas Turbine Engineering Handbook*. 2nd ed. Houston, TX: Gulf Publishing Company, 2006;

13. Moon, C. Y., et al. 2020. "Particle Sensing in Gas Turbine Inlets: Optical + Machine-Learning Approaches." *Proceedings of ASME Turbo Expo 2020*;
14. Wang, Y., et al. 2023. "Current Status of Detection Technologies for Indoor Particulate Matter: Performance Evaluation and Environmental Influences." *Aerosol and Air Quality Research* 23 (9): 1–24;
15. ResearchGate Conference Paper. 2024. "A Laser Imaging Technique for Measuring Particle Distribution at a Gas Turbine Engine Inlet." *Proceedings of the 14th International Symposium on Laser Diagnostics in Combustion*;
16. Experimental Studies on Low-Cost Ultrasonic Sensors for Distance and Presence Measurement. Examples Based on HC-SR04 Modules. *IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings*, 2022;
17. Bohren, Craig F., and Donald R. Huffman. 1983. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. New York: John Wiley & Sons.

An Improved Model for Detection and Quantification of Solid Particles in Air Duct Systems Using the Ultrasonic Method

Bidzina Abesadze¹, Giorgi Taqadze²

¹ Georgian Aviation University, 16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

² Alte University, 2 University Street, 0177 Tbilisi, Georgia

Abstract: *The present study addresses the issue of foreign solid particles in air duct systems and proposes an enhanced ultrasonic-based method for their detection and quantitative evaluation. The reliability and efficiency of modern industrial and aviation systems largely depend on the cleanliness and stability of the air flow. Dust, sand, ash, or metallic microparticles entering the system from the external environment can cause abrasive wear, surface erosion, and deformation of turbines and compressors. These effects reduce the energy efficiency of the equipment and increase the risk of critical failures. Therefore, there is a pressing need for a non-invasive technique capable of detecting and quantifying solid particles within air ducts in real time, without interrupting system operation.*

Within the scope of this research, an ultrasonic sensing system is proposed, employing a pair of transmitting and receiving transducers. The acoustic wave propagated between them responds to inhomogeneities in the medium and to the presence of foreign particles, resulting in scattering, absorption, or phase shifts. The operating principle of the system is based on analyzing the variations in wave propagation time and amplitude, which enables the determination of particle size and concentration. Theoretical models are presented to describe the interrelation between the ultrasonic propagation velocity, wavelength, and medium density, as well as scattering effects based on Rayleigh and Mie theories.

The obtained results confirm that the ultrasonic method is an effective, economical, and environmentally safe approach for monitoring the condition of air duct systems. Implementation of the proposed model can significantly improve system reliability and operational lifespan in both aviation and energy industries.

Keywords: *Ultrasound, air duct system, solid particles, sensor diagnostics, acoustic monitoring.*