

ქარის ტურბინის მდგომარეობის მონიტორინგის სისტემის დანერგვა საწარმოში

გიორგი გელაშვილი

დოქტორანტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

georgegelashvili5@gmail.com

ანოტაცია

წარმოდგენილი მოდელის უპირატესობა, პირველ რიგში, მის ფუნქციურ და პრაქტიკულ მიდგომაში ვლინდება: მონაცემების მონიტორინგისთვის, დეტალური ანგარიშების თავმოყრისთვის და მონაცემთა ისტორიული ანალიზისთვის გათვალისწინებულია ქარხანაში უკვე არსებული Pxtrend სისტემა, ხოლო მონაცემების შეგროვებისა და მართვისთვის გამოიყენება SIEMENS PCS 7 რომელსაც უშუალოდ წვდომა აქვს დამონტაჟებულ მოწყობილობებთან, ხოლო ვიზუალიზაციისთვის და მყისიერი მონაცემების ასახვისთვის გამოიყენება WINCC 9.1 , აღნიშნული პროგრამები სრულად თავსებადია და მარტივად ინტეგრირდება Excel-ის ბაზაზე შექმნილ ანალიტიკურ მოდელთან. ამ კომბინაციის საშუალებით შესაძლებელი ხდება კომპიდან გამავალი ქარის სიჩქარის, ვიბრაციების, ტემპერატურისა და ტურბინის ოპერირებული საათების მონაცემების ეფექტური და გამჭვირვალე დამუშავება. შემოსული ინფორმაცია გარდაიქმნება სიგნალად და გადამუშავდება ზემოთ აღნიშნულ პლატფორმებზე, შემდგომ კი ხდება ამ ინფორმაციის კონვერტაცია ჩვენს მიერ შექმნილ Excel-ის მონიტორინგის დოკუმენტში. საბოლოოდ, აღნიშნულ მონაცემებს ვიღებთ ვიზუალურად აღსაქმელ სიგნალებად, რაც ტექნიკურ პერსონალს მისცემს საშუალებას დროულად მოახდინოს რეაგირება.

საკვანძო სიტყვები: განახლებადი ენერჯია, ცემენტის ქარხანა, გამონაბოლქვის კომპი, ვერტიკალური ღერძის მქონე ქარის ელექტროსადგური, მონიტორინგის სისტემა.

JEL: C87, O33, Q42

DOI: 10.52244/c2025.26

შესავალი

დღეს, როდესაც გლობალურად იზრდება მოთხოვნა განახლებად ენერჯიაზე, ქარის ენერჯია ერთ-ერთ მთავარ ალტერნატივად განიხილება, რადგან წარმოადგენს ეკოლოგიურად უსაფრთხო, ნაკლები მავნე ემისიის მქონე და ფინანსურად ეფექტიან ენერჯიის წყაროს (Tchakoua et al., 2014). განსაკუთრებით საინტერესო ხდება ქარის ენერჯიის ათვისება ისეთ გარემოში, სადაც უკვე ბუნებრივად არსებობს სტაბილური ჰაერის ნაკადი. უფრო კონკრეტულად რომ ვთქვათ, იგულისხმება გამონაბოლქვის კომპი, საიდანაც ჰაერის ნაკადი გაედინება ერთი, ინტენსიური მიმართულებით (Salvador Gutierrez et al., 2025).

ვინაიდან ჰაერის ნაკადი გამოედინება ერთი, უცვლელი მიმართულებით და აღნიშნული ენერჯია პრაქტიკაში უქმად იკარგება, აღნიშნული პრობლემა იძლევა შესაძლებლობას, ქარის ენერჯიის გარდაქმნით მივიღოთ დამატებითი სარგებელი, სწორედ კასპის ცემენტის ქარხანაში არსებულ გამონაბოლქვის კომპლექსზე იგეგმება ვერტიკალური ღერძის მქონე ქარის ტურბინის მონტაჟი. თუმცა, ქარის ტურბინის ეფექტიანი და ხანგრძლივი მუშაობა მხოლოდ მისი ფიზიკური მონტაჟით არ შემოიფარგლება, ცემენტის ქარხანაში ქარის ტურბინის ინტეგრაცია მოითხოვს საიმედო და ეფექტურ მონიტორინგ სისტემას, რომელსაც უნდა გააჩნდეს წარმოქმნილ პრობლემებზე სწრაფი რეაგირების შესაძლებლობა, რაც გადამწყვეტია პროცესების უწყვეტი მუშაობისთვის და სტაბილურობისთვის, რადგან განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ქარის ტურბინების ოპერირების პროცესში ტექნიკური მომსახურების საკითხის უზრუნველყოფა. ჩვენი მიდგომის მთავარი უპირატესობაა, რომ ქარხანაში უკვე არსებული რესურსების გამოყენებით არ მოითხოვება დამატებითი ლიცენზიებისა და მაღალი ღირებულების სისტემების შესყიდვა. მონიტორინგის ფინანსურ ასპექტზე ინფორმაციის მოძიების შედეგად მივიღეთ, რომ ერთ ქარის ტურბინაზე კომერციული მონიტორინგის სისტემის დანერგვის ღირებულება, სისტემის ფუნქციური სირთულის მიხედვით, მერყეობს დაახლოებით 9 000\$-დან 30 000\$-მდე (Turnbull & Carroll., 2021). ხოლო ჩვენს მიერ შემუშავებული მიდგომა, რომელიც ეფუძნება ქარხანაში უკვე არსებული რესურსების ინტეგრირებულ გამოყენებას, უზრუნველყოფს ამ ხარჯების თავიდან აცილებას და პროექტს მნიშვნელოვან ფინანსურ უპირატესობას სძენს. საყურადღებოა, რომ მონიტორინგ სისტემის გაუმართაობა ხშირად იწვევს როგორც ენერჯიის მიწოდების შეფერხებას, ასევე დიდ სარემონტო ხარჯებს (Tchakoua et al., 2014). ხოლო ავარიაზე დროული რეაგირება პირდაპირ აისახება როგორც ოპერირებულ დანახარჯებზე, ასევე ენერგოეფექტიანობაზე.

ძირითადი ნაწილი

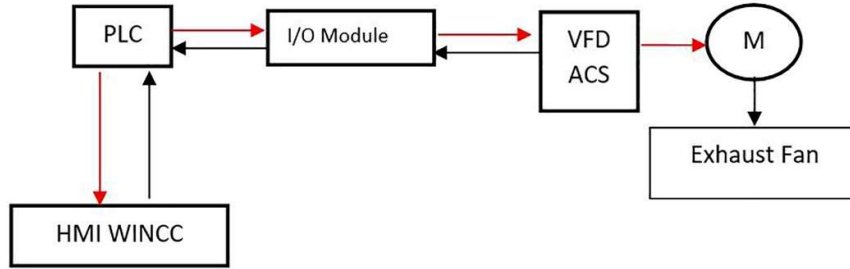
წარმოდგენილი ნაშრომი მიზნად ისახავს ვერტიკალური ღერძის მქონე ქარის ტურბინების პრევენციული ტექნიკური მომსახურების ისეთი სისტემის შექმნას, რომელიც მიმდინარე პროცესების მუდმივ მონიტორინგზე იქნება ორიენტირებული და ხელს შეუწყობს ტურბინის მუშა პროცესის დროულად შეფასებასა და საჭიროების შემთხვევაში დროულ, მყისიერ რეაგირებას (Clavijo Camacho et al., 2025), დაფუძნებულს Pxtrend, SIEMENS PCS 7, WINCC 9.1-ისა და Excel-ის ინტეგრირებულ ანალიტიკურ სისტემაზე.

იმისთვის, რომ ვერტიკალური ღერძის მქონე ქარის ტურბინამ (VAWT) შეძლოს სტაბილურად და დიდხანს ოპერირება, აუცილებელია ყურადღება მიექცეს მის ზოგად ტექნიკურ მდგომარეობას, განსაკუთრებით კი ტემპერატურების ზღვრებსა და ვიბრაციებს. ამ პარამეტრების რეგულარული კონტროლი უმნიშვნელოვანესია, რადგან მათმა უგულვებელყოფამ შეიძლება ისეთი პრობლემები გამოიწვიოს, რაც მიგვიყვანს დიდ ფინანსურ ზარალამდე.

მაღზედ მნიშვნელოვანია იმ კომპლექსის მუშა პროცესი, რომელიც უწყვეტი ნაკადით მოამარაგებს ტურბინას, ასევე მნიშვნელოვანია მისი მონიტორინგი და მონაცემების შეგროვების მეთოდოლოგია რაც შეგვიძლია ვიხილოთ წარმოდგენილ ნახაზზე. (ნახ. 1)

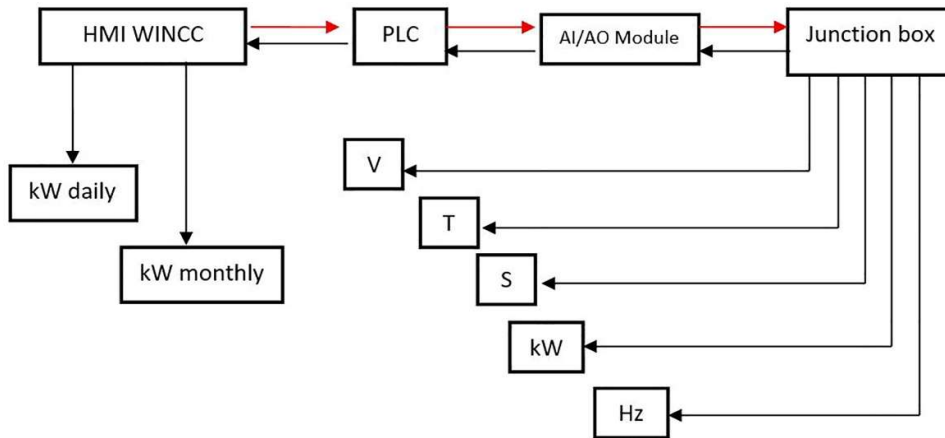
აღნიშნულ ნახაზზე ნაჩვენებია უშუალოდ იმ ემისიის კომპლექსის მუშა პროცესის ავტომატიზაციის ციკლი, რაზეც იგეგმება ტურბინის მონტაჟი, ზუსტად ამ ნახაზზეა ნაჩვენები თუ როგორ მოხდება ინფორმაციის შეგროვება რაც გამოიყურება შემდეგნაირად : არსებობს მოწყობილობა , ამ შემთხვევაში ელ.ძრავი, რაც ემსახურება გამონაბოლქვის კომპლექსს რამაც ტურბინა უნდა მოამარაგოს ჰაერის უწყვეტი ნაკადით, სიხშირული გარდამქმნელი (ACS), ციფრული შესასვლელი და გამოსასვლელი მოდულები (I/O) , პროგრამულ-ლოგიკური კონტროლერი იგივე PLC სადაც

წერია ამ ბრძანებების სოფტი და მუშაობის ლოგიკა, შემდგომ ამ ყველაფრის ვიზუალიზაცია HMI (WINCC 9.1).



ნახაზი 1. ემისიის კოშკის ფუნქციონირების სტრუქტურული სქემა (PLC/HMI)

შემდგომ, ვაწყდებით მთავარ გამოწვევას, სადაც აუცილებელია შევავროვოთ უწყვეტი მონიტორინგისთვის საჭირო მონაცემები უშუალოდ იმ ქარის ტურბინიდან, რომლის დამონტაჟებაც იგეგმება, აღნიშნული ინფორმაცია შეგვიძლია ვიხილოთ შემდეგ ნახაზზე. (ნახ. 2)



ნახაზი 2. ქარის ტურბინის მონიტორინგის პარამეტრების შეგროვებისა და ვიზუალიზაციის სტრუქტურული სქემა

ქარის ტურბინიდან მიღებული მონაცემების შეგროვებისა და მონიტორინგის სისტემა მუშაობს შემდეგი სტრუქტურით: ტურბინიდან წამოსული სიგნალები ჯერ შედის Junction Box-ში, საიდანაც ისინი გადადის AI/AO მოდულზე. აღნიშნული მოდული პასუხისმგებელია მონაცემების შესაბამისი არხებით დამუშავებაზე და შემდგომ გადაცემაზე PLC-ში (Programmable Logic Controller). PLC უზრუნველყოფს მონაცემების მართვასა და დამუშავებას, ხოლო HMI

WINCC ინტერფეისის მეშვეობით შესაძლებელია მონაცემების ვიზუალიზაცია და ოპერატორისთვის ხელმისაწვდომი ფორმით გამოჩენა.

მონიტორინგის პროცესში კონტროლდება შემდეგი ძირითადი პარამეტრები:

- **V (Voltage)** – ძაბვის მაჩვენებელი, რომელიც ტურბინის გენერატორის მუშაობის ელექტრული პარამეტრების შეფასებას ემსახურება
- **T (Temperature)** – ტემპერატურული რეჟიმი, რომელიც მექანიკური ნაწილების გადახურების თავიდან აცილებისათვის არის მნიშვნელოვანი;
- **S (Speed)** – ტურბინის ბრუნვის სიჩქარე, რომელიც პირდაპირ კავშირშია წარმოებული ენერჯის რაოდენობასთან;
- **kW (Kilowatt)** – გამომუშავებული სიმძლავრის მაჩვენებელი, რომელიც ტურბინის რეალური ენერგოეფექტიანობისა და გამომუშავებული ელექტროენერჯის შეფასებისთვის გამოიყენება.
- **Hz (Hertz)** – სიხშირე, რომელიც განსაზღვრავს გამომავალი დენის სტაბილურობას და სისტემის ენერგოეფექტიან მუშაობას.
- **kW daily** – დღიურად გამომუშავებული ელექტროენერჯის მაჩვენებელი, რომელიც საშუალებას იძლევა შეფასდეს ქარის ტურბინის ოპერირების ეფექტიანობა მოკლე დროის შუალედში.
- **kW monthly** – თვიურად გამომუშავებული ელექტროენერჯის მაჩვენებელი, რომელიც ასახავს ტურბინის საერთო პროდუქტიულობას გრძელვადიან პერსპექტივაში და იძლევა შესაძლებლობას მოხდეს ენერჯის გამომუშავების ტენდენციების ანალიზი.

აღნიშნული მონაცემები რეალურ დროში ინახება და მუშავდება ქარხანაში უკვე არსებულ სისტემებში, რაც იძლევა საშუალებას არა მხოლოდ მიმდინარე პროცესის მონიტორინგისთვის, არამედ ისტორიული მონაცემების ანალიზისა და ანგარიშებისთვის.

ასევე გასათვალისწინებელია ის ფაქტორიც, რომ მხოლოდ მოწყობილობის დაყენება საკმარისი არ არის იმისთვის, რომ სისტემა სრულფასოვნად და გამართულად იმუშაოს. ტურბინის ოპერირებისას სისტემაზე მუდმივად ახდენენ ზემოქმედებას სხვადასხვა ტიპის ფიზიკური ფაქტორები, მათ შორის მექანიკური დატვირთვები, ვიბრაციული რხევები და ტემპერატურის ცვალებადობა.

ამ პირობებში, რაღა თქმა უნდა, პრიორიტეტი ხდება მისი ტექნიკური მომსახურების გამართულობა, რაც მნიშვნელოვნად ხაზს უსვამს პრევენციული სერვისის სისტემის შექმნის აუცილებლობას (Ali et al., 2025).

დღესდღეობით, ერთ-ერთ გამორჩეულ სირთულად განიხილება ქარის ისეთი ინტენსივობა, რომელიც სცდება ტურბინის ჩვეულებრივად განსაზღვრულ სამუშაო რეჟიმს. სწორედ აქ არის საჭირო იმ გამომავალი ქარის ნაკადის სიჩქარის ზღვრის კონტროლი, რაც ეჯახება ტურბინის ფრთებს. ასეთ დროს, გამომავალი ქარის სიჩქარის კონტროლი აუცილებელი ხდება, რათა ფრთებზე არ მოხდეს მექანიკური ზეწოლა იმ ინტენსივობით, რომელიც კომპონენტებს საფრთხეს უქმნის (Salvador Gutierrez et al., 2025). იმ შემთხვევაში, თუ ქარის ნაკადის სიძლიერე აჭარბებს დასაშვებ ზღვარს და ტურბინა მუშაობას არ წყვეტს, ფრთებზე გადაჭარბებულმა ზეწოლამ შესაძლოა მექანიკური დეფორმაცია გამოიწვიოს, რაც საბოლოოდ დიდ ფინანსურ დანაკარგამდე მიგვიყვანს.

ძალზედ მნიშვნელოვანია და საჭიროა ტურბინის პერიოდული შემოწმება და მდგომარეობის მონიტორინგი. პერიოდულად ინსპექტირებისას საჭიროა საკონტროლო გადაჭერების ჩატარებაც, რადგან მორყეულმა სამაგრებმა შესაძლოა გამოიწვიონ ვიბრაციის მატება, რაც საბოლოოდ საზიანო შედეგამდე მიგვიყვანს. ასევე აუცილებელია ტურბინის ფრთების ვიზუალური დათვალიერება, რადგან გარკვეულ შემთხვევებში შესაძლებელია მათ ზედაპირზე ბზარების ან მექანიკური დაზიანებების არსებობა (Ali et al., 2025). თუ კი ფრთებზე შეინიშნება ნებისმიერი სახის დაზიანება, საჭიროა დაუყოვნებლივ ფრთების ჩანაცვლება (Wang et al., 2022).

გარდა ამისა, განსაკუთრებული ყურადღება ექცევა კოროზიასაც, რომელიც ხშირად ნესტიანი გარემოს ზემოქმედების შედეგია და დროთა განმავლობაში შესაძლოა მნიშვნელოვნად შეამციროს ტურბინის სერვისული სიცოცხლე (Wang et al., 2022).

განახლებადი ენერჯის განვითარების დღევანდელ რეალობაში, ეფექტური ტექნიკური მომსახურების უზრუნველყოფა ისეთივე მნიშვნელოვანია, როგორც თავად ენერჯის სისტემების დანერგვა. სწორედ ამ რეალობიდან გამომდინარე წარმოვადგინეთ აღნიშნული მოდელი რომლის მიზანია, ჩვენს კონკრეტულ შემთხვევაში, ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინის მონიტორინგის სისტემის ჩამოყალიბება, რაც ითვალისწინებს პრევენციულ ტექნიკურ მომსახურებას. ეს ყველაფერი გათვალისწინებულია იმ ქარხნის პირობებისთვის, სადაც უკვე არსებობს ტექნიკური მონიტორინგის ინფრასტრუქტურა.

დასკვნა

ამ სისტემის მნიშვნელოვნად გამორჩეული დადებითი მხარე მდგომარეობს მის პრაქტიკულობაში. ის ჰაერი, რომელიც აქამდე უშედეგოდ იკარგებოდა გამონახობლქვი კოშკიდან, გარდაიქმნა დამატებით ელექტროენერჯიად, რითაც ენერჯის დაკარგვის პრობლემა პრაქტიკულად მოიხსნა. ამასთან, წავაწყდით ტურბინის მუშაობისას მთავარ გამოწვევას რის საფუძველზეც შემუშავდა პრაქტიკული მონიტორინგ სისტემა, ეს პრაქტიკულობა კი გამოიხატება იმაში, რომ არ არის საჭირო დამატებითი ტექნიკური რესურსები ან ძვირადღირებული ლიცენზიების შეძენა, რადგან იგი სრულად ეყრდნობა უკვე არსებულ ბაზას. უკვე არსებულ ბაზაში კი იგულისხმება ის, რომ მონაცემთა ისტორიული ანალიზისთვის შეგვიძლია გამოვიყენოთ Pxtrend სისტემა, რაც საშუალებას მოგვცემს ვაწარმოოთ ტურბინის მუშა საათების კონტროლი და სწორი ინსპექტირების ინტერვალები, მონაცემების შეგროვებისთვის და მართვისთვის შეგვიძლია გამოვიყენოთ SIEMENS PCS 7 სისტემა, ხოლო ვიზუალურ მხარეს და მყისიერი ინფორმაციის მოპოვებას უზრუნველყოფს WINCC 9.1 , ამ ყოველივეს შერწყმა Excel-ის ანალიტიკურ მოდელთან იძლევა შესაძლებლობას, მონაცემების დამუშავება მოხდეს სწრაფად, ზუსტად და ტექნიკური პერსონალისთვის ვიზუალურად აღსაქმელი ფორმით. ამგვარი მოქნილი სისტემის მეშვეობით შესაძლებელი ხდება ისეთი მნიშვნელოვანი პარამეტრების კონტროლი, როგორებიცაა ქარის სიჩქარე, ვიბრაცია, ტემპერატურული ცვლილებები და ოპერირების ხანგრძლივობა. აღსანიშნავია ისიც, რომ არ მოგვიწევს დამატებითი წლიური სერვის ხარჯის გადახდა, ასევე ვინაიდან არსებულ პერსონალს უკვე აქვს Pxtrend/PCS7/WINCC-ში მუშაობის გამოცდილება, არ მოგვიწევს დამატებითი ტრენინგების ჩატარება, შესაბამისად აღნიშნული მიდგომა იძლევა საშუალებას, მონიტორინგი განახორციელოს არსებული ტექნიკური პერსონალის მეშვეობით, ხოლო დამატებითი მონიტორინგ სისტემების შესყიდვის აუცილებლობა მოიხსნას, ვინაიდან ტურბინის მონიტორინგ სისტემების შესყიდვის თანხობრივი რაოდენობა, მოძიებული ინფორმაციის

მიხედვით, წლიურად დაახლოებით მერყეობს 9 000\$-დან 30 000\$-მდე, რაც ქარხნისთვის წარმოადგენს სერიოზულ ფინანსურ ეკონომიის წყაროს, გარდა ამისა, ეფექტიანი მონიტორინგი ზრდის ოპერაციულ საიმედოობას, ამცირებს ავარიული შეჩერებების რისკს და, შესაბამისად, ხდება საწარმოო პროცესის სტაბილური და უწყვეტი მიმდინარეობის უზრუნველყოფა.

გამოყენებული ლიტერატურა

Tchakoua, P., Wamkeue, R., Ouhrouche, M., Slaoui-Hasnaoui, F., Tameghe, T. A., & Ekemb, G. (2014). *Wind Turbine Condition Monitoring: State-of-the-Art Review, New Trends, and Future Challenges. Energies, 7*(4), 2595–2630. <https://doi.org/10.3390/en7042595>

Salvador-Gutierrez, B., Sanchez-Cortez, L., Hinojosa-Manrique, M., Lozada-Pedraza, A., Ninaquispe-Soto, M., Montaña-Pisfil, J., Gutiérrez-Tirado, R., Chávez-Sánchez, W., Romero-Goytendia, L., Díaz-Aliaga, J., & Vigo-Roldán, A. (2025). Vertical-axis wind turbines in emerging energy applications (1979–2025): Global trends and technological gaps revealed by a bibliometric analysis and review. *Energies, 18*(14), 3810. <https://doi.org/10.3390/en18143810>

Clavijo-Camacho, J., Gomez-Ruiz, G., Sanchez-Herrera, R., & Magro, N. (2025). Remote Real-Time Monitoring and Control of Small Wind Turbines Using Open-Source Hardware and Software. *Applied Sciences, 15*(12), 6887. <https://doi.org/10.3390/app15126887>

Ali, S., Park, H., & Lee, D. (2025). Structural optimization of vertical axis wind turbine (VAWT): A multi-variable study for enhanced deflection and fatigue performance. *Journal of Marine Science and Engineering, 13*(1), 19. <https://doi.org/10.3390/jmse13010019>

Wang, W., Xue, Y., He, C., & Zhao, Y. (2022). Review of the typical damage and damage-detection methods of large wind turbine blades. *Energies, 15*(15), 5672. <https://doi.org/10.3390/en15155672>

Turnbull, A., & Carroll, J. (2021). *Cost benefit of implementing advanced monitoring and predictive maintenance strategies for offshore wind farms. Energies, 14*(16), Article 4922. <https://doi.org/10.3390/en14164922>