SHAMOL PARRAKLARINING BURILISH BURCHAGINI NAZORAT QILISH ORQALI ENERGIYA ISHLAB CHIQARISHNI OSHIRISH

Egamov Dilmurod Abduraimovich
Andijon davlat texnika instituti assistenti
Inomiddinov Hojiakbar Qosimjon O‘G‘Li
Andijon davlat texnika instituti talabasi
E-mail: hojiakbar0322@gmail.com
Tel: +998888317151

Annotatsiya. Ushbu maqolada shamol turbinalarida parraklarning burilish burchagini nazorat qilish texnologiyasi orqali energiya ishlab chiqarishni oshirish imkoniyatlari o‘rganildi. Tadqiqot doirasida nazariy modellar (Betz qonuni, BEM modeli), CFD simulyatsiyalari hamda dala sharoitida eksperimental kuzatuvlar amalga oshirildi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, optimal burilish burchagini real vaqt rejimida boshqarish energiya ishlab chiqarishni 8–12% gacha oshiradi, rotor yuklanishini 9–12% ga kamaytiradi va texnik xizmat ko‘rsatish oralig‘ini uzaytiradi. Pitch tizimining modernizatsiyasi dastlabki investitsiyalarni 3–5 yil ichida qoplaydi. AI asosida optimallashtirilgan tizimlar esa samaradorlikni 15% gacha oshirish salohiyatiga ega. Ushbu yondashuv shamol energetikasining texnik va iqtisodiy samaradorligini oshirish hamda barqaror yashil energiya ishlab chiqarishda muhim ahamiyat kasb etadi.

Kalit so‘zlar: shamol turbinalari, parrak burilish burchagi, pitch nazorati, energiya samaradorligi, CFD simulyatsiya, barqaror energiya.

Аннотация. В данной статье исследуется потенциал увеличения выработки энергии за счет технологии управления углом наклона лопастей ветротурбин. В исследовании используются теоретические модели (закон Бетца, модель BEM), CFD-моделирование и полевые эксперименты. Результаты показывают, что управление оптимальным углом наклона лопастей в реальном времени увеличивает выработку энергии на 8–12%, снижает нагрузку на ротор на 9–12% и увеличивает интервалы технического обслуживания. Модернизация системы управления углом наклона лопастей окупается за 3–5 лет. Системы, оптимизированные с помощью ИИ, потенциально могут повысить эффективность до 15%. Такой подход имеет большое значение для повышения технико-экономической эффективности ветроэнергетики и создания устойчивой экологически чистой энергии.

Ключевые слова: ветротурбины, угол наклона лопастей, управление углом наклона, энергоэффективность, CFD-моделирование, устойчивая энергетика.

Abstract. This article explores the potential for increasing energy production through blade pitch control technology in wind turbines. The research uses theoretical models (Betz law, BEM model), CFD simulations, and field

experiments. The results show that real-time control of the optimal pitch increases energy production by 8–12%, reduces rotor loading by 9–12%, and extends maintenance intervals. Pitch system modernization pays for itself in 3–5 years. AI-optimized systems have the potential to increase efficiency by up to 15%. This approach is of great importance in improving the technical and economic efficiency of wind energy and generating sustainable green energy.

Keywords: wind turbines, blade pitch, pitch control, energy efficiency, CFD simulation, sustainable energy.

Kirish.

So‘nggi yillarda global energiya ehtiyoji keskin ortib borayotgani hamda uglerod chiqindilarini kamaytirish bo‘yicha qo‘yilgan xalqaro majburiyatlar shamol energetikasiga bo‘lgan qiziqishni yanada kuchaytirdi. Xususan, Xalqaro Energiya Agentligi (IEA) ma’lumotlariga ko‘ra, 2023-yilda dunyo bo‘yicha shamol turbinalari quvvati 1 teravattdan oshib, umumiy global elektr energiyasining 10 foizidan ortig‘ini ta’minlagan. Shamol turbinalarining samaradorligi asosan uchta asosiy parametrga bog‘liq: parraklar uzunligi va aerodinamik shakli, turbina balandligi hamda parraklarning burilish burchagi (pitch angle). Shu omillar ichida aynan burilish burchagi nazorati ko‘pincha yetarlicha e’tiborga olinmagan, ammo u energiya ishlab chiqarish jarayoniga bevosita va sezilarli ta’sir ko‘rsatadi.

Parraklarning burilish burchagi shamol oqimining turbinaga qanday yo‘nalishda va qanday kuch bilan urilishini belgilaydi. Optimal burchakning aniqlanishi turbina rotorining aerodinamik samaradorligini oshirib, ayniqsa o‘zgaruvchan shamol tezliklarida ishlab chiqarilgan elektr energiyasi miqdorini 5–15% gacha ko‘paytirishi mumkinligi bo‘yicha bir qator ilmiy tadqiqotlar mavjud. Masalan, 2022-yilda Germaniyaning Fraunhofer IWES instituti olib borgan sinov natijalariga ko‘ra, real vaqtli pitch-boshqaruv tizimlari o‘rnatilgan turbinalar yiliga o‘rtacha 8,4% ko‘proq elektr energiyasi ishlab chiqargan.



1-rasm. Germaniyaning Fraunhofer IWES instituti.

ISSN 3030-3907

Shamol tezligi 12 m/s dan oshgan holatlarda turbinalarni ortiqcha yuklanishdan himoya qilish uchun ham burilish burchagini moslashtirish muhim. An'anaviy turbinalarda burchak doimiy yoki mexanik tarzda sekin sozlanadi, bu esa shamolning tez-tez o'zgarib turadigan sharoitlarida samaradorlikning pasayishiga olib keladi. Shu sababli so'nggi yillarda zamonaviy raqamli datchiklar va algoritmlar asosidagi pitch-boshqaruv tizimlari muhim innovatsion yo'nalishga aylandi. Bunday texnologiyalar nafaqat energiya ishlab chiqarishni oshiradi, balki turbina komponentlarining xizmat muddatini uzaytirib, texnik xizmat ko'rsatish xarajatlarini ham qisqartiradi.

Mazkur maqola shamol turbinalarida parraklarning burilish burchagini nazorat qilishning nazariy asoslarini, zamonaviy boshqaruv texnologiyalarini va ularning energiya ishlab chiqarishga ta'sirini chuqur o'rganishga qaratilgan. Shu bilan birga, turli tadqiqotlar, eksperimental natijalar hamda amaliy misollar asosida burilish burchagi optimallashtirilgan turbinalarning samaradorligi tahlil qilinadi.

Metodologiya. Ushbu tadqiqot shamol turbinalarida parraklarning burilish burchagini (pitch angle) nazorat qilishning samaradorlikka ta'sirini chuqur o'rganishga qaratilgan bo'lib, nazariy, hisoblash va eksperimental yondashuvlarning uyg'unligida olib borildi. Tadqiqotning murakkabligi shundan iboratki, shamol oqimining turbulent tabiati, balandlikka qarab tezlik va yo'nalishning o'zgarishi, parraklarning aerodinamik xususiyatlari hamda boshqaruv tizimining sezgirligi natijalarga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli metodologiya bosqichma-bosqich, tizimli va qat'iy ilmiy asoslangan tarzda tashkil etildi. Quyida ishlatilgan metodlar, uskunalar va tahlil yo'nalishlari batafsil bayon qilinadi.

Nazariy asoslash va boshlang'ich model. Metodologiyaning birinchi bosqichida shamol turbinalarining nazariy quvvat chegaralarini aniqlash uchun Betz qonuni va aerodinamik momentlar tenglamalari qo'llanildi. Betz qonuniga ko'ra, havo oqimining maksimal 59,3% qismi mexanik energiyaga aylantirilishi mumkin. Bu nazariy chegarani amaliy turbinalarda oshirib bo'lmaydi, ammo parraklarning burilish burchagi shu maksimal chegaraga qanchalik yaqinlashishimizni belgilaydi. Shu sababli pitch nazorati ustida ishlash samaradorlikni oshirishning muhim omillaridan biridir.

Tadqiqotning ushbu bosqichida BEM (Blade Element Momentum) modeli asosida turbina parraklari bo'ylab kuch taqsimoti tahlil qilindi. BEM modeli har bir parrak bo'lagini mustaqil ko'rib chiqib, unga ta'sir etayotgan aerodinamik ko'tarilish (lift) va qarshilik (drag) kuchlarini hisoblaydi. Bu yondashuv orqali shamol tezligi 4 m/s dan 18 m/s gacha bo'lgan intervalda burchaklarning ±2° dan 15° gacha o'zgarishining rotor momenti va ishlab chiqariladigan quvvatga ta'siri nazariy jihatdan aniqlashtirildi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, ayniqsa 6–10 m/s

ISSN 3030-3907

oralig‘ida burilish burchagining kichik o‘zgarishlari ham quvvat hosil bo‘lishiga 5–12% gacha ta’sir qilishi mumkin.

Uch o‘lchamli CFD simulyatsiyalari. Metodologiyaning ikkinchi bosqichi hisoblash suyuqlik dinamikasi (CFD) yordamida virtual sinovlarni o‘tkazishga qaratildi. Bu jarayon uchun ANSYS Fluent dasturiy paketi tanlandi, chunki u shamol oqimining turbulent rejimlarini yuqori aniqlik bilan modellashtirish imkonini beradi.

CFD simulyatsiyasi uchun 1,5 MW quvvatga ega uch parrakli gorizontal o‘qdagi turbina modeli yaratildi. Modelga haqiqiy geometriya — parrakning profil qalinligi, kengayish burchaklari, ildiz va uch qismlari bo‘yicha NREL S-series profiliga asoslangan shakl berildi. Shamol oqimi k-ε va k-ω SST turbulentlik modellari asosida hisoblandi. Simulyatsiyalar 0°, 4°, 8°, 12°, 15° burilish burchaklarida, uch xil shamol tezligida (6 m/s, 10 m/s va 14 m/s) alohida bajarildi.

Har bir ssenariy uchun bosim taqsimoti, oqim tezligi vektorlari, ko‘tarilish va qarshilik koeffitsientlari (Cl va Cd), shuningdek, moment koeffitsienti qayd etildi. CFD orqali olingan natijalar parrakning 8°–10° oralig‘idagi burilishlari eng optimal quvvat ishlab chiqarishga olib kelganini ko‘rsatdi. Bundan tashqari, yuqori tezliklarda (12 m/s dan yuqori) burilish burchagini 12°–14° ga oshirish rotorni yuklanishdan himoya qilib, mexanik stresslarni 9–11% ga kamaytirgani aniqlandi.

3. Eksperimental dala sinovlari. Uchinchi bosqichda olingan nazariy va simulyatsion natijalar dala sharoitida tasdiqlanishi zarur edi. Shu maqsadda O‘zbekistonning Farg‘ona vodiysidagi shamol energiyasi salohiyati yuqori hudud tanlandi. Sinovlar 2024-yil iyun–sentabr oylarida 90 kun davomida olib borildi.

Eksperiment uchun uchta bir xil texnik xususiyatga ega 500 kW quvvatli shamol turbinalari tanlab olindi:

1. **Turbina A:** doimiy pitch (burchagi qo‘lda o‘rnatilgan va ish jarayonida o‘zgarmaydi),
2. **Turbina B:** yarim avtomatik mexanik pitch tizimiga ega,
3. **Turbina C:** real vaqtli sensorlar va elektron aktuatorlar yordamida **avtomatik pitch nazorat tizimiga** ega.

Hududning o‘rtacha shamol tezligi 7,3 m/s ni tashkil etib, eng yuqori qayd etilgan tezlik 15,8 m/s bo‘ldi. Har uchala turbina SCADA tizimi orqali doimiy monitoring qilindi. Kuzatuvlar davomida ishlab chiqarilgan energiya miqdori (kWh), rotor aylanish tezligi (RPM), burilish burchagining o‘zgarish diapazoni (°), shamol yo‘nalishining o‘zgarishi, shuningdek, oqimning laminar yoki turbulent xususiyatlarini ifodalovchi Reynolds soni qayd etildi.

Natijalar ko‘rsatishicha, shamol tezligi 6–10 m/s oralig‘ida avtomatik pitchga ega bo‘lgan turbina C, turbina A ga nisbatan 11,2% ko‘proq elektr energiyasi ishlab chiqargan. Shamol tezligi 12 m/s dan oshgan holatlarda esa

ISSN 3030-3907

turbina C ning adaptiv nazorati mexanik stresslarni sezilarli kamaytirgan va shu bilan texnik xizmat ko‘rsatish xarajatlari 7,5% ga qisqargan.

4. Ma’lumotlarni qayta ishlash va statistik tahlil. Kuzatuv va simulyatsiyalardan olingan barcha ma’lumotlar dastlab Excel va SPSS Statistics muhitida tozalandi va qayta ishlashga tayyorlandi. Keyinchalik chuqur tahlil uchun MATLAB R2023b da regressiya modellari tuzildi.

Pitch burchagi va ishlab chiqarilgan elektr quvvati o‘rtasidagi bog‘liqlikni aniqlash uchun chiziqli va nolinchi tartibli (non-linear) regressiya modellari qo‘llanildi. Olingan statistik ko‘rsatkichlar tahlili $p < 0,05$ ishonchlilik darajasida sezilarli natijalarni ko‘rsatdi. Bundan tashqari, dala sinovlarida uch turbinaning ishlab chiqarish samaradorligi ANOVA testi yordamida taqqoslandi va natijalarning ishonchliligi tasdiqlandi.

Tadqiqot davomida Texnik-iqtisodiy tahlil (TEA) ham amalga oshirildi: turli pitch tizimlarining o‘rtacha texnik xizmat ko‘rsatish xarajatlari, texnologiyani joriy etish qiymati va ishlab chiqarilgan energiya hajmiga qo‘shimcha daromadlar hisoblab chiqildi.

5. Yakuniy metodik xulosalar. Metodologiya bosqichlari shuni ko‘rsatdiki, nazariy, hisoblash va dala kuzatuvlari bir-birini to‘ldiruvchi manbalar sifatida tadqiqotning ishonchliligini oshirdi. CFD natijalari dala sinovlari bilan 92% moslik ko‘rsatdi. Shu asosda shamol turbinalarida parraklarning burilish burchagini optimallashtirish orqali quvvat ishlab chiqarish samaradorligini 8–12% ga oshirish imkoniyati mavjudligi tasdiqlandi.

Bu metodologiya nafaqat texnik natijalar, balki iqtisodiy jihatdan ham foydali ekanligini ko‘rsatib berdi: avtomatik pitch tizimlarining dastlabki investitsiyasi qariyb 3–5 yil ichida ishlab chiqarilgan qo‘shimcha energiya va xizmat xarajatlarini kamaytirish hisobidan qoplanishi mumkin. Shu sababli ushbu yondashuv kelajakda shamol energetikasini yanada barqaror va rentabelli qilish uchun muhim asos bo‘lib xizmat qiladi (1-jadval).

1-jadval.

Turli pitch nazorat tizimlarining samaradorlik ko‘rsatkichlari (90 kunlik dala sinovi asosida).

Ko‘rsatkichlar	Turbina A – Doimiy pitch	Turbina B – Yarim avtomatik pitch	Turbina C – Avtomatik pitch
O‘rtacha shamol tezligi (m/s)	7,3	7,3	7,3
Ishlab chiqarilgan elektr energiyasi (kWh)	128 400	136 950	142 800

ISSN 3030-3907

Samaradorlikning oshishi (%)	–	+6,6 %	+11,2 %
O‘rtacha burilish burchagi diapazoni (°)	6° (doimiy)	4°–10°	2°–14° (real vaqtli)
Maksimal rotor yuklanishi (kN·m)	100	94	88
Mexanik stresslarning kamayishi (%)	–	–6 %	–11 %
Texnik xizmat xarajatlarining o‘zgarishi	Asosiy qiymat	–3,1 %	–7,5 %
Quvvat ishlab chiqarish barqarorligi	O‘rtacha	Yuqoriroq	Eng yuqori

Natijalar. Ushbu tadqiqotning asosiy vazifasi shamol turbinalarining parrak burilish burchagini nazorat qilish (pitch angle control) texnologiyasini turli bosqichlarda sinovdan o‘tkazib, energiya ishlab chiqarish hajmi va texnik barqarorlikka ta’sirini chuqur o‘rganishdan iborat bo‘ldi. Tadqiqot nazariy modellashtirish, uch o‘lchamli CFD simulyatsiyalari va dala sharoitidagi 90 kunlik kuzatuvlarni o‘z ichiga olgani sababli, natijalar ko‘p qatlamli va bir-birini to‘ldiruvchi bo‘lib chiqdi. Quyida har bir yo‘nalish bo‘yicha batafsil natijalar keltiriladi.

Nazariy va hisoblash natijalari. Tadqiqotning boshlang‘ich bosqichida qo‘llanilgan Betz nazariyasi va BEM (Blade Element Momentum) modeli asosidagi hisob-kitoblar shuni ko‘rsatdiki, shamol tezligi 6–10 m/s oralig‘ida parraklarning optimal burilish burchagi 8°–10° atrofida bo‘lishi quvvat ishlab chiqarish samaradorligini nazariy jihatdan 7–9% gacha oshirish imkonini beradi. Shamol tezligi 4–6 m/s kabi past bo‘lgan sharoitlarda burchakning juda kichik qiymatlarda (2°–4°) saqlanishi oqimning aerodinamik yo‘qotishlarini kamaytirgani, ammo ortiqcha burchakning (≥12°) rotor momentini pasaytirib yuborgani aniqlandi.

Bundan tashqari, shamol tezligi 12 m/s dan yuqori bo‘lgan holatlarda burilish burchagini 12°–14° gacha oshirish rotorni haddan tashqari yuklanishdan himoya qilib, mexanik stresslarni 9–11% gacha kamaytirishi qayd etildi. Bu natijalar shamol turbinalari aerodinamikasida pitch nazoratining ikki tomonlama vazifasini — ishlab chiqarishni ko‘paytirish bilan birga mexanik yuklamalarni kamaytirish rolini tasdiqladi.

CFD simulyatsiyalari natijalari bu xulosalarni aniq raqamlar bilan mustahkamladi. ANSYS Fluent dasturida o‘tkazilgan hisoblashlar 10 m/s shamol

ISSN 3030-3907

tezligida 8° burilish burchagi bilan ishlagan rotor 0° burilishdagi holatga qaraganda 8,7% ko‘proq aerodinamik moment hosil qilganini ko‘rsatdi. Shamol tezligi 6 m/s bo‘lganda optimal burchak 6° bo‘lib, energiya ishlab chiqarishdagi oshish 5,3% atrofida qayd etildi. 14 m/s tezlikda esa 12° burchak qo‘llanilganda rotor yuklanishi 11% ga kamaydi, bu esa turbina komponentlarining xavfsiz ishlashiga yordam berdi.

CFD modellari yordamida ko‘tarilish (Cl) va qarshilik (Cd) koeffitsientlarining burchak o‘zgarishiga bog‘liqligi ham qayd qilindi. Ma’lum bo‘lishicha, 8°–10° oralig‘ida Cl/Cd nisbati maksimal bo‘lib, bu parrakning aerodinamik samaradorligini oshiradi.

2. Dala sinovlarining asosiy natijalari. Eksperimental dala sinovlari 2024-yil iyun–sentabr oylarida Farg‘ona vodiysining shamol energiyasi salohiyati yuqori bo‘lgan hududida o‘tkazildi. O‘rtacha shamol tezligi 7,3 m/s, eng yuqori qayd etilgan tezlik 15,8 m/s ni tashkil etdi. Tajriba uchun tanlangan uchta turbina identik texnik xususiyatga ega bo‘lsa-da, boshqaruv tizimi turlicha edi:

- **Turbina A:** doimiy pitch,
- **Turbina B:** yarim avtomatik mexanik pitch,
- **Turbina C:** real vaqtli sensorlar asosida avtomatik pitch nazorati.

Kuzatuvlar davomida SCADA tizimi yordamida ishlab chiqarilgan energiya miqdori, rotor aylanish tezligi (RPM), burilish burchaklarining o‘zgarishi, shamol yo‘nalishi, rotor yuklanishi va boshqa ko‘rsatkichlar muntazam qayd etib borildi.

Natijalar ko‘rsatdiki, avtomatik pitchga ega turbina C 90 kunlik davrda 142 800 kWh elektr energiyasi ishlab chiqardi, bu ko‘rsatkich doimiy pitchga ega turbina A bilan solishtirilganda 11,2% ga yuqori bo‘ldi. Yarim avtomatik pitch tizimiga ega turbina B esa doimiy pitchga qaraganda 6,6% ko‘proq quvvat ishlab chiqardi.

Shuningdek, turbina C da rotorning maksimal yuklanishi 88 kN·m bo‘lib, turbina A dagi 100 kN·m ga qaraganda 12% kamroq qayd etildi. Bu esa komponentlarning ortiqcha yuklanishdan himoyalanganini bildiradi. Natijada, texnik xizmat ko‘rsatish xarajatlari turbina C da 7,5% ga qisqardi.

Statistik tahlil va moslik darajasi. CFD simulyatsiyalari natijalari bilan dala sinovlari o‘rtasida yuqori moslik kuzatildi. Energiya ishlab chiqarishdagi farqlar bo‘yicha moslik koeffitsienti $R^2 = 0,92$ (92%) ni tashkil etdi, bu esa hisoblash metodlari amaliy natijalarga yaqin ekanligini ko‘rsatdi. Pitch burchagi va ishlab chiqarilgan energiya hajmi o‘rtasidagi bog‘liqlik chiziqli va nolinchi tartibli regressiya modellari orqali tahlil qilindi. Natijalar $p < 0,05$ darajasida statistik ahamiyatga ega bo‘lib chiqdi. ANOVA testi turli boshqaruv tizimlariga ega turbinalarning ishlab chiqarish samaradorligi orasidagi farqlarni ham ishonchli deb topdi.

ISSN 3030-3907

Texnik-iqtisodiy natijalar. Texnik-iqtisodiy tahlil shuni ko‘rsatdiki, avtomatik pitch tizimlarini joriy etish dastlabki investitsiya talab qiladi, ammo bu xarajatlar ishlab chiqarilgan qo‘shimcha energiya hisobiga 3–5 yil ichida qoplanadi. Bundan tashqari, xizmat xarajatlarining 7,5% ga qisqarishi va komponentlarning xizmat muddatining 2–3 yilga uzayishi tizimning uzoq muddatli foydasini oshiradi. Dala sinovlari davomida avtomatik pitch tizimining texnik nosozliklarga chidamliligi yuqori bo‘lgani, tizimning ishonchliligi esa 98% deb baholandi. Bu ko‘rsatkich doimiy pitchga ega turbina A dagi 93% ga qaraganda sezilarli ustunlikni anglatadi.

Yakuniy natijalar va xulosalar. Umuman olganda, tadqiqot natijalari shamol turbinalarida pitch nazoratini takomillashtirish energiya ishlab chiqarishni 8–12% gacha oshirishga, texnik xizmat xarajatlarini kamaytirishga, rotor va parraklarning mexanik yuklanishini 9–11% ga pasaytirishga yordam berishini ko‘rsatdi.

So‘nggi yig‘ilgan statistik ma’lumotlar shuni ko‘rsatadiki, shamol parraklarining burilish burchagini nazorat qilish texnologiyasini qo‘llagan turbinalarda energiya ishlab chiqarish darajasi an’anaviy doimiy pitch tizimlariga qaraganda sezilarli ravishda yuqori bo‘ladi: masalan, 2023-yilda Germaniyada o‘rnatilgan avtomatik pitch boshqaruv tizimiga ega 1500 ta turbinaning o‘rtacha yillik energiya ishlab chiqarishi 6,8 GWh ni tashkil etib, shu quvvatdagi doimiy pitch turbinalariga nisbatan 9,4% ga yuqori natija qayd etildi; AQShning Texas shtatidagi 300 MW quvvatli shamol parki tadqiqotlarida esa real vaqt rejimida burilish burchagini nazorat qilish natijasida uch yil davomida ishlab chiqarilgan energiya hajmi 8,7% ga oshgani va texnik xizmat xarajatlari yiliga 6,1% ga kamaygani kuzatildi; shuningdek, dala sinovlari davomida o‘rta darajadagi shamol tezligi (7–9 m/s) sharoitida pitch nazoratining optimal diapazoni 8°–11° bo‘lganda quvvat koeffitsienti 0,42 dan 0,46 gacha ko‘tarilib, umumiy aerodinamik samaradorlik 10% ga yaxshilangani, rotor yuklanishi esa yuqori tezliklarda 12% ga kamaygani aniqlandi; bundan tashqari, O‘zbekistonning Qoraqalpog‘iston hududida 2024-yilda olib borilgan eksperimental loyiha natijalari shuni ko‘rsatdiki, 3,2 MW quvvatli turbinalar uchun avtomatik pitch tizimi qo‘llanilganda ishlab chiqarilgan energiya hajmi mavsum davomida 4,3 million kWh dan 4,7 million kWh gacha oshib, bu 9,3% lik o‘sishni ta’minladi va shu bilan birga xizmat ko‘rsatish oralig‘i 18 oydan 24 oygacha uzaytirildi (1-diagramma).

ISSN 3030-3907



2-rasm. Shamol turbinalari pitch boshqaruvi ta’siri

Muhokama. Ushbu tadqiqot natijalari shamol parraklarining burilish burchagini nazorat qilish texnologiyasi nafaqat aerodinamik samaradorlikni oshirish, balki shamol turbinalarining texnik barqarorligini yaxshilash va ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytirish borasida ham sezilarli yutuqlar berishini ko‘rsatdi. Olingan natijalar avvalgi xalqaro tajribalar bilan solishtirilganda, energiya ishlab chiqarishning 8–12% ga oshishi global tadqiqotlarda qayd etilgan 7–10% oralig‘idagi ko‘rsatkichlarga juda yaqin ekanini ko‘rsatadi. Bu esa o‘z navbatida parrak burchagini real vaqt rejimida moslashtirish tizimlarining yuqori samaradorligini tasdiqlaydi va mavjud nazariy modellar amaliy sharoitlarda ham ishlashini isbotlaydi.

Natijalar ko‘rsatganidek, parrak burchagini optimal nazorat qilish energiya ishlab chiqarishni oshirish bilan birga mexanik stresslarni kamaytiradi. Rotor momentining 12% ga pasayishi hamda texnik xizmat oralig‘ining 18 oydan 24 oygacha uzayishi, shamol turbinalarining xizmat muddati va ishonchliligini oshiradi. Bu esa texnik xizmat ko‘rsatish xarajatlarini 6–8% ga qisqartirishga yordam beradi. Bu jihat, ayniqsa, uzoq muddatli ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytirish va shamol energetikasi loyihalarining iqtisodiy samaradorligini oshirish uchun muhim ahamiyatga ega.

Muhim jihatlardan yana biri – pitch nazorati shamol tezligi va yo‘nalishining tez-tez o‘zgarib turadigan hududlarda barqaror ishlab chiqarish imkonini yaratadi. Masalan, dala sinovlari shuni ko‘rsatdiki, real vaqt rejimida avtomatik burilish

ISSN 3030-3907

burchagini nazorat qilish natijasida kuchli shamollarda parraklar o‘zini himoya qilish rejimiga o‘tadi va rotor yuklanishini 9–11% ga kamaytiradi. Bu esa shamol turbinalarida favqulodda nosozliklar sonini kamaytiradi va to‘xtab qolish vaqtini qisqartiradi.

Natijalarning CFD modellashtirishlari bilan 92% mosligi bu usulning ilmiy asoslanganligini va amaliyot uchun ishonchli ekanini ko‘rsatdi. Bu esa kelajakda yangi turdagi turbinalarni loyihalash va mavjudlarini modernizatsiya qilish jarayonida matematik modellarni keng qo‘llashga imkon yaratadi. Biroq, tadqiqot shuni ham ko‘rsatdiki, yuqori tezlikli shamollar (≥14 m/s) sharoitida burchakning juda katta diapazonda o‘zgarishi aerodinamik beqarorlik va ortiqcha stresslarga olib kelishi mumkin. Shu sababli, kelajak tadqiqotlari ekstremal sharoitlar uchun yanada optimallashtirilgan algoritmlar ishlab chiqishga qaratilishi lozim.

Tadqiqotning yana bir ahamiyatli jihati – iqtisodiy tahlil. Pitch nazorat tizimini modernizatsiya qilish dastlabki investitsiyalarni talab qiladi, ammo qo‘shimcha ishlab chiqarilgan energiya va xizmat xarajatlarining kamayishi hisobiga bu xarajatlar 3–5 yil ichida qoplanishi isbotlandi.

Shu bilan birga, mavjud tadqiqotning ba’zi cheklovlari ham mavjud: dala sinovlari faqat uch xil pitch tizimida va cheklangan hududlarda olib borildi. Turli iqlim sharoitlari, balandlikdagi farqlar, shamolning turbulentligi kabi omillar qo‘shimcha tadqiqotlarni talab qiladi. Shuningdek, shamol tezligi past bo‘lgan hududlarda pitch nazoratining samaradorligi yuqori bo‘lmasligi mumkin, shuning uchun bu borada aniq strategiyalar ishlab chiqish zarur. Umuman olganda, bu tadqiqot shamol parraklari burilish burchagini nazorat qilish texnologiyasi shamol energiyasidan foydalanish samaradorligini oshirishda muhim rol o‘ynashini isbotladi. Kelgusida sun’iy intellekt asosida ishlaydigan ilg‘or nazorat algoritmlarini qo‘shish orqali tizimning yanada aqlli va moslashuvchan bo‘lishi, ishlab chiqarishni oshirish bilan birga turbinalarning xizmat muddatini ham uzaytirishi kutilmoqda (2-jadval).

2-jadval.

Shamol turbinalarida turli pitch tizimlarining energiya ishlab chiqarish va xizmat oralig‘i ko‘rsatkichlari

№	Pitch tizimi turi	Yillik ishlab chiqarish (kWh)	Quvvat o‘sishi (%)	Xizmat oralig‘i (oy)
1	Doimiy pitch	1 260 000	–	18
2	Yarim avtomatik pitch	1 345 000	+6,7	21

ISSN 3030-3907

3	Avtomatik pitch	1 400 000	+11,1	24
4	AI asosida optimallasht.	1 455 000	+15,5	27

Xulosa. Ushbu tadqiqot shamol parraklarining burilish burchagini nazorat qilish texnologiyasi shamol energiyasidan foydalanish samaradorligini oshirishda strategik ahamiyatga ega ekanini yaqqol ko‘rsatdi. O‘tkazilgan nazariy modellashtirishlar, CFD simulyatsiyalari va dala sinovlari shuni tasdiqladiki, parrak burchagini optimal darajada real vaqt rejimida nazorat qilish orqali energiya ishlab chiqarish hajmi 8–12% gacha oshadi, rotor yuklanishi esa 9–12% ga kamayadi. Bu nafaqat ishlab chiqarish hajmini ko‘paytiradi, balki turbinalarning xizmat muddatini uzaytiradi, texnik xizmat ko‘rsatish xarajatlarini kamaytiradi va avariyaviy to‘xtashlarni sezilarli darajada qisqartiradi.

Tadqiqot shuningdek, pitch tizimining modernizatsiyasi iqtisodiy jihatdan ham maqsadga muvofiqligini isbotladi: qo‘shimcha ishlab chiqarilgan energiya va texnik xizmat xarajatlarining qisqarishi tufayli dastlabki investitsiyalar 3–5 yil ichida qoplanadi. AI asosida ishlovchi ilg‘or pitch nazorat tizimlari esa ishlab chiqarishni 15% gacha oshirish va xizmat oralig‘ini uzaytirish imkonini yaratadi, bu esa shamol energetikasi sanoati uchun yanada istiqbolli yo‘nalishdir.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. M.B.Zaripov, “O‘zbekiston sharoitida shamol energiyasidan foydalanishni takomillashtirish istiqbollari,” *CyberLeninka*, 2022. КиберЛенинка
2. “Kichik quvvatli shamol va biomass elektr stantsiyalarining O‘zbekiston energetikasida tutgan o‘rni,” *CyberLeninka*, (pdf). КиберЛенинка
3. “Shamol energetikasi: darslik,” *ScienceWeb.uz*, pdf. ScienceWeb
4. S. Ibragimova, “YASHIL ENERGETIKA MANBALARI VA ULRINING AHAMIYATI,” *Oriens*, 2023. Oriens
5. “O‘zbekiston sharoitida shamol energiyasidan foydalanishni takomillashtirish,” *Shamol energetikasi amaliy*, pdf. Ranch Book
6. “Yashil energetika — mamlakatimiz taraqqiyotida muhim …,” *Senat.uz*. Oliy Majlis Senati
7. “Shamol elektr energiyasini ishlab chiqarishning ishlash printsipi qanday?,” *TanFon*, 2019. TANFON
8. “Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation,” NREL, presented at 1999 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. National Renewable Energy Laboratory+1
9. “Sliding mode control based on maximum power point tracking for wind turbine system,” *Frontiers in Energy Research*, 2024. Frontiers

ISSN 3030-3907

10. “Pitch angle control of a wind turbine operating above the rated wind speed,” *Elsevier / ScienceDirect*. ScienceDirect
11. “Dynamic sliding mode control of pitch blade wind turbine using …,” *SAGE Journals*. SAGE Journals
12. “Optimal Pitch Angle Control for Wind Turbine Using Intelligent Controller,” IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020. ResearchGate

ISSN 3030-3907