

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGQF2141>

**Н. Б. Қаласов¹, Ж. Е. Байжұма², А. А. Куйкабаева³,
*А. Р. Рысқұл⁴, Ж. Қ. Сейдулла⁵.**

^{1,2,3,4,5}Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3709-5544>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3692-2245>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0905-4422>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8118-6024>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0413-6557>

*e-mail: ryskulajbar@gmail.com

ДАРЬЕ ҮШ ҚАЛАҚТЫ СИММЕТРИЯЛЫ ЖЕЛ ТУРБИНАСЫ: ДИЗАЙНЫ, АЭРОДИНАМИКАСЫ ЖӘНЕ ӨНІМДІЛІГІ

Бұл жұмыста тік осьті үш қалақты симметриялық Дарье жел турбинасының аэродинамикалық қасиеттері есептеу сұйықтар динамикасы (CFD) әдісі арқылы жан-жақты зерттелді. Зерттеудің мақсаты әртүрлі жүздектілік коэффициенті (TSR) жағдайында ағын құрылымының өзгерісін, айналу моментінің тұрақтылығын және энергия өндіру тиімділігін анықтау болып табылады. Нысан ретінде NASA 0021 симметриялық аэродинамикалық профиліне негізделген H-типті үш қалақты ротор таңдалып, турбулентті ағынды сипаттау үшін Рейнольдс бойынша орташаланған Навье–Стокс (RANS) теңдеулері және $k-\epsilon$ турбуленттілік моделі қолданылды. Сандық модельдеу барысында айналмалы және қозғалмайтын есептеу аймақтары қарастырылып, қалақ – ағын өзара әрекетін дәл есептеу үшін сырғанау тор әдісі пайдаланылды. Нәтижелер TSR өзгеруіне байланысты қысым, жылдамдық және құйындылық өрістерінің айқын түрленетінін көрсетті: төмен TSR мәндерінде ағын тұрақсыз болып, аэродинамикалық тиімділік шектеулі болса, $TSR \approx 2.5-4$ диапазонында қалақтар маңында тұрақты ағын құрылымы қалыптасып, айналу моменті мен қуат коэффициенті максимал мәндерге жетеді. TSR одан әрі артқан жағдайда турбуленттіліктің күшеюіне байланысты пайдалы

энергия алу тиімділігі төмендей бастайды. Алынған C_p және C_t тәуелділіктерін эксперименттік деректермен салыстыру сандық модельдің аэродинамикалық үрдістерді сенімді сипаттайтынын көрсетті. Зерттеу нәтижелері тік осьті жел турбиналарын жобалау мен оңтайландыруда практикалық маңызға ие.

Кілтті сөздер: Дарье турбины, тік осьті турбина, NACA 0021 профиль, $k-\epsilon$ турбуленттілік моделі, RANS теңдеулері, қуат коэффициенті (C_p), TSR – жүрдектілік коэффициенті.

Кіріспе

Жел энергетикасы қазіргі кезеңде экологиялық таза әрі жаңартылатын энергия көздері арасында ең жылдам дамып келе жатқан салалардың бірі болып табылады. Оның қарқынды дамуы жел энергиясының табиғи тұрғыдан сарқылмайтын ресурс екендігімен, сондай-ақ энергия өндіру процесінде зиянды заттар мен парниктік газдардың бөлінбеуімен тығыз байланысты. Жел энергетикалық қондырғыларының негізгі жұмысшы элементі – жел турбины, ол ауа ағынының кинетикалық энергиясын алдымен механикалық энергияға, кейін генератор көмегімен электр энергиясына түрлендіреді.

Турбиналардың жұмыс принципі мен тиімділігі олардың кеңістіктегі осьтік орналасуына тәуелді. Осы белгі бойынша жел турбиналары көлденең және тік осьті болып жіктеледі [1]. Көлденең осьті турбиналар өндірісте кең таралғанымен, жел бағытына бейімделу қажеттілігі оларды күрделендіреді. Ал тік осьті Дарье типті жел турбиналары жел бағытына тәуелсіз жұмыс істеу қабілеті мен құрылымдық қарапайымдылығының арқасында соңғы жылдары ғылыми зерттеулердің нысанына айналып отыр. Қазіргі тік осьті турбиналарда қолданылатын қалақтар геометриялық пішініне қарай қисық, түзу және спиральді (геликоидты) болып бөлінеді [2].

Алғашқы кезеңдерде қалақтар жоғары механикалық жүктемелерге төтеп беру мақсатында көбіне қисық пішінде жасалды [3]. Алайда мұндай пішін аэродинамикалық тұрғыдан шектеулі тиімділік көрсетті. Соның нәтижесінде құрылымы қарапайым әрі энергия өндіру қабілеті жоғары Н-типті түзу қалақты турбиналар кеңінен қолданыла бастады [4]. Спиральді қалақтар айналу моментінің бірқалыптылығын арттырғанымен, олардың өндірістік күрделілігі мен қымбаттығы кең таралуына кедергі келтіреді [5].

Тік осьті жел турбиналарының жұмыс тиімділігі қалақ санына тікелей байланысты. Екі қалақты роторлар құрылымдық жағынан жеңіл болғанымен, айналу моментінің айқын ауытқуына бейім. Ал қалақ санының шамадан тыс артуы аэродинамикалық кедергіні күшейтіп, жүйенің инерциясын ұлғайтады. Осы факторларды ескере отырып, үш қалақты симметриялық Дарье

роторы тиімділік пен тұрақтылық арасындағы оңтайлы теңгерім ретінде қарастырылады. CFD негізіндегі зерттеулер мұндай конфигурацияның кең λ диапазонында жоғары қуат коэффициентін және төмен вибрациялық жүктемелерді қамтамасыз ететінін көрсетеді [6].

Жел турбиналарының аэродинамикалық тиімділігі мен айналу моментінің тұрақтылығы қалақ геометриясына, ротор конфигурациясына және ағынмен өзара әрекеттесу сипатына тәуелді [7]. Осы күрделі процестерді зерттеу үшін сандық модельдеу әдістері, әсіресе есептеу сұйықтығының динамикасы (CFD), кеңінен қолданылады және ағын өрістерін толық көлемде талдауға мүмкіндік береді [8].

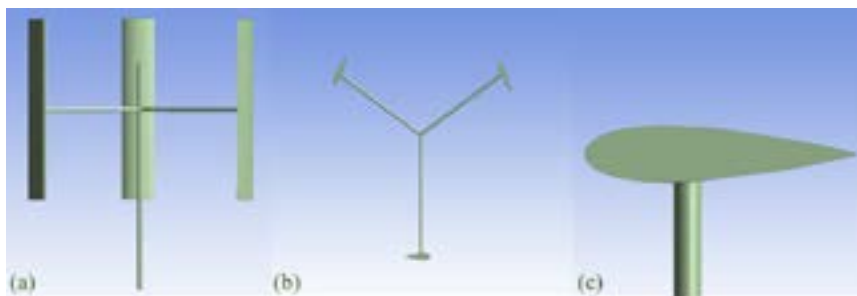
CFD есептеулерінің дәлдігі көбіне таңдалған турбуленттілік моделіне тәуелді. Бұл салада Рейнольдс-орташаланған Навье–Стокс (RANS) және үлкен құйынды модельдеу (LES) тәсілдері кеңінен қолданылады [9;10]. RANS әдісі турбулентті ағынды уақыт бойынша орташалау арқылы сипаттап, теңдеулерді жабу үшін $k-\epsilon$ және SST $k-\omega$ сияқты эмпирикалық модельдерді пайдаланады [11;12]. Бұл тәсіл есептеу шығынының төмендігімен және конвергенциясының жылдамдығымен ерекшеленеді, алайда күрделі анизотропты ағындарда лездік турбулентті құрылымдарды дәл бейнелеуде шектеулерге ие [13;14]. Сонымен қатар, RANS модельдері ағын өрісіндегі орташа турбулентті қасиеттерді сипаттауда тиімді болғанымен, динамикалық ажырау (dynamic stall) және күшті құйындық құрылымдар байқалатын жағдайларда белгілі бір дәлдік шектеулерін көрсетуі мүмкін [15;16]. Мұндай құбылыстар әсіресе вертикаль осьті жел турбиналарының (VAWT) жұмысы кезінде байқалады, өйткені қалақтар айналу барысында үнемі өзгермелі шабуыл бұрышына ұшырайды [17;18]. Сондықтан RANS негізіндегі турбуленттілік модельдерін қолданғанда тордың сапасы, уақыттық кадам және шекаралық шарттар сияқты сандық параметрлердің дұрыс таңдалуы нәтижелердің сенімділігі үшін ерекше маңызды. Осыған байланысты көптеген зерттеулерде SST $k-\omega$ моделі шекаралық қабаттағы ағынды дәл сипаттай алу қабілетіне байланысты кеңінен қолданылып келеді.

2 Материалдар мен әдістері

2.1.1 Тік осьті жел энергетикалық қондырғының геометриялық моделі

Тік осьті жел турбиналарын жобалауда симметриялы профильдер ішінен NASA 0021 таңдалуы оның аэродинамикалық тұрақтылығы мен құрылымдық беріктігімен түсіндіріледі. Бұл профиль шабуыл бұрышы кең ауқымда өзгергенде көтергіш және кедергі күштерін күрт арттырмай, ротордың бірқалыпты айналуын қамтамасыз етеді, бұл Дарье турбиналары үшін аса маңызды. Қалыңдықтың симметриялы таралуы қаттылықты күшейтіп, центрден тепкіш жүктемелерге төзімділікті арттырады. Сонымен

қатар, қарапайым геометриясы өндірістік дәлдікті сақтауға мүмкіндік береді. Осы қасиеттері NASA 0021 профилін Дарье типті турбиналар үшін теңгерімді аэродинамикалық және конструкциялық шешім ретінде қарастыруға негіз болады [19].



1-сурет – (a) Дарье үш қалақты симметриялы жел турбинының изометриялық көрінісі; (b) Дарье үш қалақты симметриялы жел турбинының жоғарғы көрінісі; (c) NASA0021 қалақ профилінің жоғарғы көрінісі

1-кесте – Осы зерттеуде қарастырылған турбинаның геометриялық сипаттамалары.

Параметр	Мәні
Радиус (R) [м]	1.5
Биіктігі (H) [м]	4
Қалақша хордасының ұзындығы (c)	0.04
Қалақшалар саны (N)	3
Аэродинамикалық профиль	NACA 0021
Біліктің диаметрі [м]	0.045
Білік биіктігі [м]	4
Турбина диаметрі (D) [м]	3
Турбиналардың салыстырмалы тығыздығы (σ)	0.3

Модельдеу барысында ауа сығылмайтын, ньютондық орта ретінде қарастырылды, өйткені зерттелген жылдамдықтарда Мах саны төмен. Қалақтар қатты дене деп қабылданып, серпімді деформациялар ескерілмеді. Ағын толық турбулентті деп алынып, RANS негізіндегі стандартты турбуленттік модель қолданылды. Қалақ-ағын өзара әрекеті тек аэродинамикалық күштермен

шектеліп, құрылымдық тербеліс әсерлері есепке алынбады. Кіріс профилі біртекті деп қабылданып, жер мен тірек элементтерінің ықпалы ескерілмеді. Бұл жорамалдар модельді оңтайландырып, негізгі аэродинамикалық процестерді сипаттауға мүмкіндік берді.

2.1.2 Негізгі теңдеулер

Жел турбинасының аэродинамикалық тиімділігін талдау барысында қуат коэффициенті (C_P), айналу моментінің коэффициенті (C_M), сондай-ақ көтергіш күш (C_l) пен кедергі (C_d) коэффициенттері кеңінен қолданылады. Бұл параметрлер турбинаның жұмыс өнімділігін сандық тұрғыда бағалауға және түрлі есептеу немесе модельдеу нәтижелерін өзара салыстыруға мүмкіндік береді. Турбинаның ағыннан алатын тиімді қуаты оның нақты өндірілген қуаты (P) мен теориялық мүмкін қуатының (P_a) арақатынасы арқылы анықталады:

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A V^3}, \quad (1)$$

мұндағы ρ – ауаның тығыздығы (кг/м^3), A – ротордың проекцияланған ауданы (м^2), V – кіріс ауа ағынының жылдамдығы (м/с).

Турбина шығаратын механикалық қуат айналу моменті T және бұрыштық жылдамдық ω арқылы анықталады:

$$P = T \cdot \omega. \quad (2)$$

Осы өрнектер негізінде қуат коэффициентін момент арқылы көрсетуге болады:

$$C_P = \frac{T \cdot \omega}{\frac{1}{2}\rho A V^3}. \quad (3)$$

Ал айналу моментінің коэффициенті (C_M) келесі түрде беріледі:

$$C_M = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A R V^2}, \quad (4)$$

мұндағы R – ротордың радиусы (м).

C_P және C_M арасындағы функционалдық байланыс төмендегі өрнекпен анықталады:

$$C_P = C_M \cdot \lambda, \quad (5)$$

мұндағы $\lambda = \frac{\omega R}{V}$ – қалақ ұшының жылдамдық қатынасы (TSR).

Қалақша аймағындағы ағын динамикасы масса, импульс және энергияның сақталу заңдары негізінде талданады. Сығылмайтын

және изотермиялық ауа ағыны жағдайында бұл процесс Навье–Стокс теңдеулерімен сипатталады:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}, \quad (7)$$

мұндағы $\mathbf{u}$ – ағын жылдамдығының векторы, p – қысым, ρ – ауа тығыздығы, ν – кинематикалық тұтқырлық, $\mathbf{f}$ – массалық күштер.

Турбулентті ағындар үшін Навье–Стокс теңдеулерін тікелей сандық шешу (DNS) есептеу тұрғысынан өте шығынды. Сондықтан инженерлік есептерде көбіне Рейнольдс бойынша орташаланған Навье–Стокс (RANS) теңдеулері қолданылады. Орташалау нәтижесінде пайда болатын Рейнольдс кернеулері қосымша модельдеуді қажет етеді.

Орташаланған үзіліссіздік теңдеуі

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0, \quad (8)$$

Ал импульстің орташаланған теңдеуі келесі түрде жазылады:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (9)$$

мұндағы $\overline{u_i}$ – орташаланған ағын жылдамдығы, $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j}$ – Рейнольдс турбуленттік кернеу тензоры.

Жүйені жабу үшін k – ω SST моделі пайдаланылады. Бұл модель турбулентті кинетикалық энергия (k) және меншікті диссипация жылдамдығы (ω) теңдеулерінен тұрады:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} &= P_k - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \\ \frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \omega)}{\partial x_i} &= \gamma \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, \end{aligned} \quad (10)$$

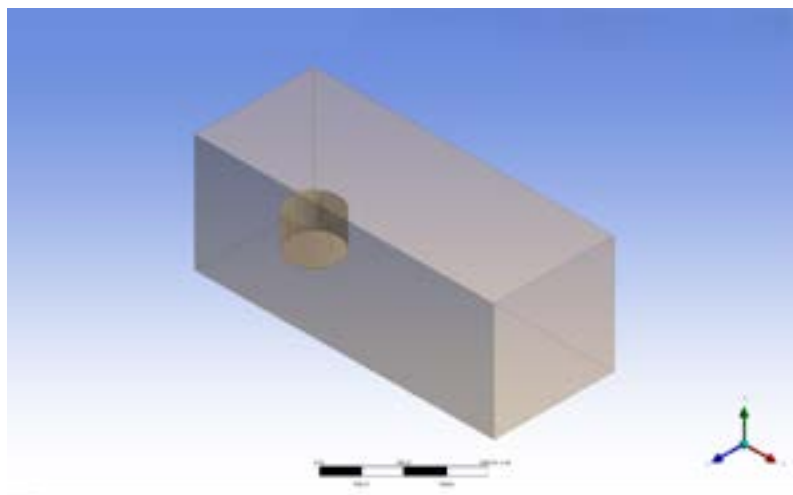
мұндағы ρ – тығыздық, k – турбулентті кинетикалық энергия, P_k – жылдамдық градиенттері есебінен пайда болатын турбулентті энергия көзі, β^* , γ , β – эмпирикалық тұрақтылар, ω – диссипацияның меншікті жылдамдығы, μ – динамикалық тұтқырлық, μ_t – турбуленттік тұтқырлық, σ_k – k үшін диффузия коэффициенті.

2.2 CFD модельдеу

2.2.1 Есептеу аймағы

2-суретте параллелепипед пішінінде құрылған есептеу аймағы көрсетілген. Ағын бағыты бойынша аймақ роторға дейін $20D$, ал ротордан кейін $40D$ қашықтыққа созылады. Бүйір бағыттарындағы ені мен жалпы биіктігі $10D$ болып қабылданған. Мұндай өлшемдер тік осьті жел турбиналарын зерттеуде кең қолданылатын есептеу аймақтарына сәйкес келеді және шекаралық әсерлерді азайту үшін жеткілікті көлемді қамтамасыз етеді.

Есептеу аймағы қозғалмайтын және айналмалы бөліктерге бөлінді. Айналмалы аймақ турбина осімен сәйкес келетін, өлшемдері шамамен $1,5D$ болатын цилиндр түрінде берілді. Ауа параметрлері теңіз деңгейіндегі стандартты шарттарға сәйкес қабылданды. Кіріс шекарасында еркін ағын жылдамдығы беріліп, турбуленттілік қарқындылығы 5 % деп алынды. Шығыста нөлдік статикалық қысым шарты қолданылып, бүйір беттері симметриялы шекара ретінде модельденді.



2-сурет – Дарье үш қалақты симметриялы
жел турбинасының есептеу аймағы

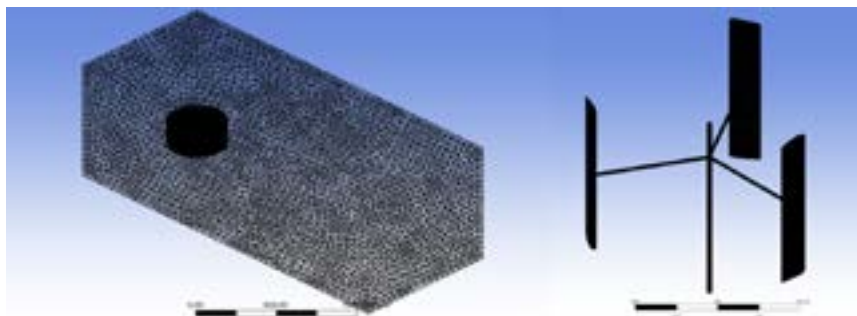
Айналмалы ішкі аймақ үшін айналмалы және қозғалмайтын бөліктердің өзара қозғалысын үйлестіру мақсатында сырғанау тор әдісі пайдаланылды. Барлық есептеу жағдайларында ротордың бұрыштық жылдамдығы 100 айн/мин деңгейінде тұрақты сақталды [19].

2-кесте – TSR бойынша жел жылдамдығының өзгерісі ($\omega = 100$ айн/мин)

TSR	Жел жылдамдығы (м/с)	Бұрыштық жылдамдық (ω)
1,5	10,47	100 айн/мин
2	7,85	
2,5	6,28	
3	5,23	
3,5	4,48	
4	3,92	
4,5	3,49	
5	3,14	

2.2.2 Тор генерациясы

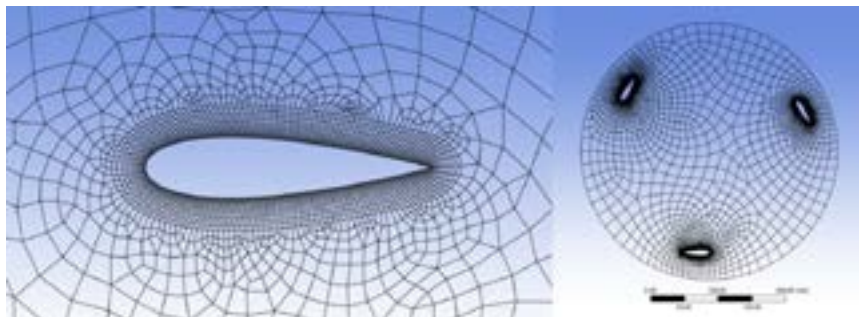
Есептеу аймағында тордың негізгі өлшемі Body Sizing арқылы 20 см болып орнатылды. Ротор маңындағы күрделі геометрияны дәл беру үшін Edge Sizing қолданылып, қалақ шеті 150 бөлікке бөлінді, бұл аэродинамикалық жүктемелерді нақты есептеуге мүмкіндік береді. Қалақ беті жанындағы жоғары градиенттерді дұрыс модельдеу үшін Face Sizing арқылы элемент өлшемі 3 см-ге дейін кішірейтілді. Тор тығыздығын арттыру қысым ауытқуларын, ағын ажырауын және индукциялық әсерлерді сенімді анықтауға жағдай жасайды.



3-сурет – Дарье үш қалақты симметриялы жел турбинасының және есептеу аймағының торы

Қабырға маңындағы шекаралық қабат құрылымын физикалық түрде көрсету үшін инфляция қабаттары енгізілді. Тұтқыр ағын режимін дұрыс сипаттау мақсатында қалақ бетіне жақын аймақта инфляциялық қабаттар қолданылды: олардың жалпы саны 12, өсу коэффициенті 1,2 ал толық

қалыңдығы 5 см болды. Бұл параметрлер u^+ мәнін басқаруға, қабырға маңындағы тұтқыр-турбулентті өзара әрекеттесуді дәлірек сипаттауға және турбуленттілік модельдерінің тұрақты жұмысын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.



4-сурет – NACA0021 қалақ профилінің жоғарғы көрінісіндегі торы; Дарье үш қалақты симметриялы жел турбинасының жоғарғы көрінісіндегі торы

Осылайша, гибриді тор конфигурациясы ротордың айналасындағы құйынды құрылымдарды, қысым мен жылдамдық өрістерінің динамикалық өзгерістерін, қайта айналым аймақтарын қалыптастыруды және жалпы аэродинамикалық тиімділікті сандық модельдеу үшін оңтайлы.

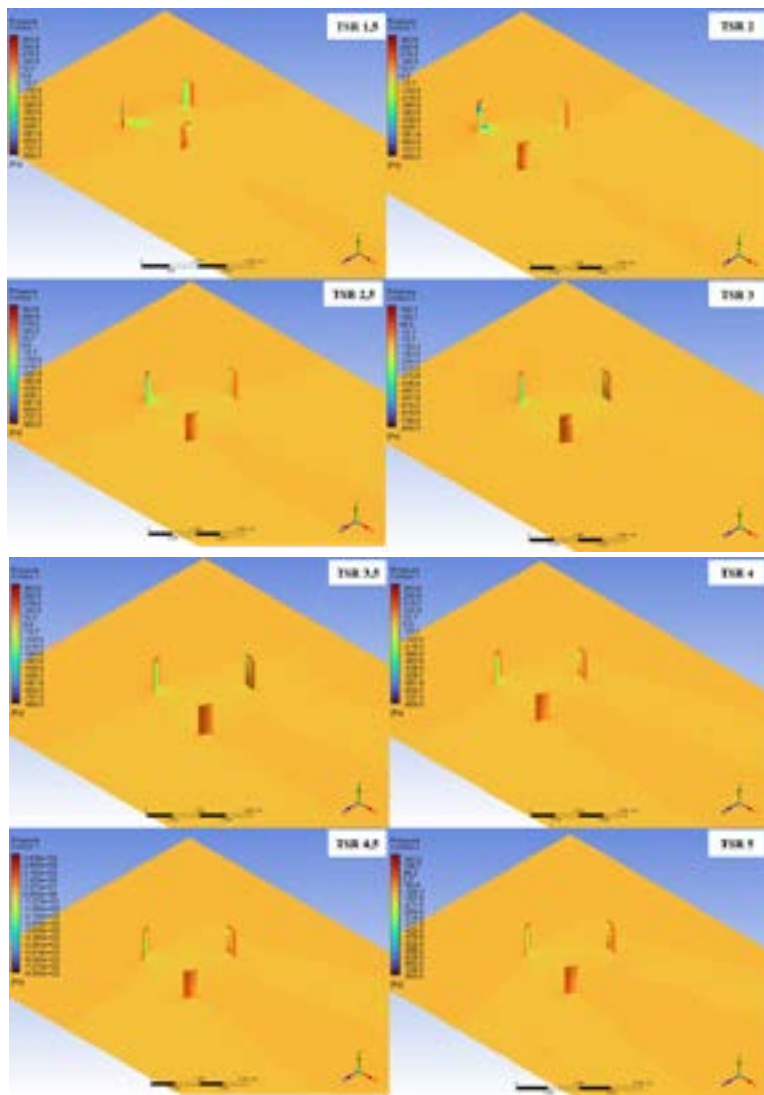
3. Нәтижелер және талқылау

3.1 Қысым өрісінің контурлары

5-суретте көрсетілген қысым өрістері TSR өзгерген сайын ротор қалақтары маңындағы қысым таралуының айқын өзгеретіні көрінеді. Төмен TSR мәндерінде ($TSR = 1.5-2$) қалақтың желге қарсы бетінде қысым сәл жоғарылағанымен, артқы бетінде төмен қысымды аймақ әлсіз дамиды. Бұл жағдайда ағын ізі қысқа әрі тұрақсыз болып, ротор өндіретін айналу моменті төмен болады.

$TSR = 2.5-3.5$ аралығында қысым өрісі ең айқын сипатқа ие. Қалақтың жел жақ бетінде жоғары қысым, ал қарсы бетінде анық төмен қысымды аймақ қалыптасып, қысым айырмасы артады. Ағын ізі ұзарып, тұрақтанады, бұл ротордың ең жоғары энергия өндіру режиміне сәйкес келеді.

TSR жоғары болғанда ($TSR = 4-5$) қалақ артындағы төмен қысым аймағы созылғанымен, ағын тұрақсызданып, турбуленттілік күшейеді. Шекаралық қабаттың ажырауы мен ағын ізінің кеңеюі қысым айырмасын азайтып, аэродинамикалық тиімділікті төмендетеді.

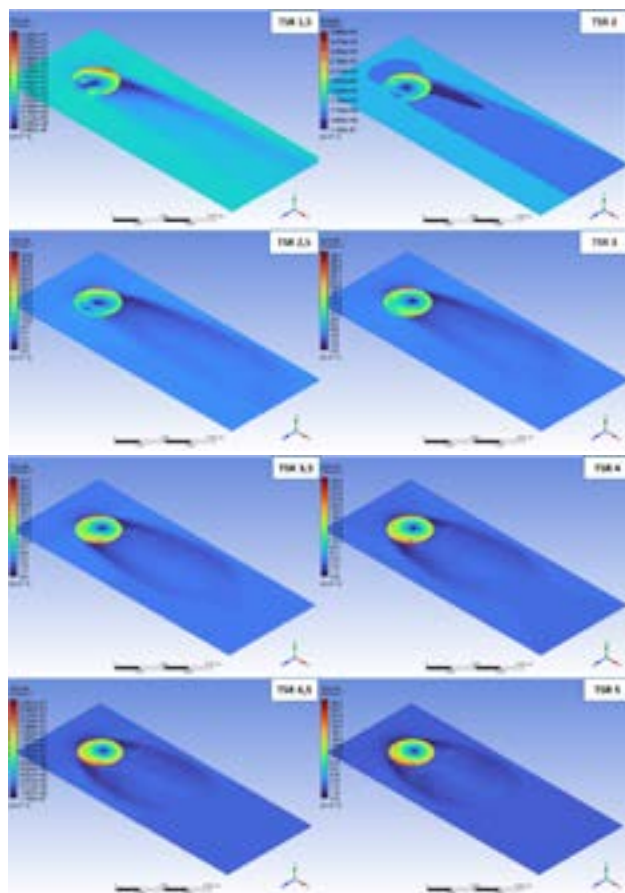


5-сурет – $TSR = 1.5-5$ диапазонында ротор айналасындағы қысым контурлары

Жалпы, қысым контурлары қалақтардың ең тиімді жұмыс аймағы $TSR \approx 2.5-3.5$ екенін, ал төмен және жоғары TSR мәндерінде аэродинамикалық әсердің әлсірейтінін көрсетеді.

3.1.2 Жылдамдық өрісінің контурлары

6-суреттегі жылдамдық өрістері TSR өзгерген сайын ротор артындағы ағын құрылымының елеулі түрде түрленетінін көрсетеді. Төмен TSR (1.5–2) кезінде қалақ маңындағы жылдамдық өсімі әлсіз, ағын ізі қысқа және нашар дамыған, бұл аэродинамикалық тиімділіктің төмендігін білдіреді. TSR = 2.5–3 аралығында қалақтар айналасында жоғары жылдамдық аймақтары қалыптасып, ротор артындағы ағын ізі ұзарған әрі тұрақты сипат алады. Бұл режим ағын құрылымының орнықтылығымен және ротордың ең тиімді жұмыс аймағына сәйкес келуімен ерекшеленеді.



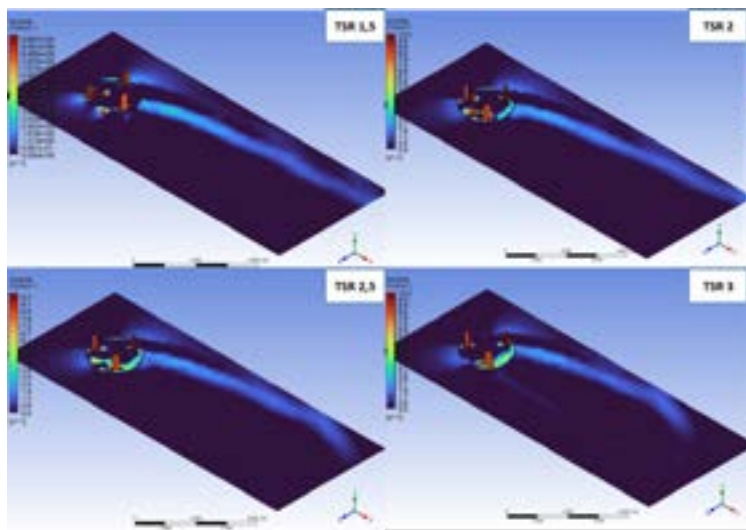
6-сурет – TSR = 1.5–5 диапазонында ротор айналасындағы жылдамдық контурлары

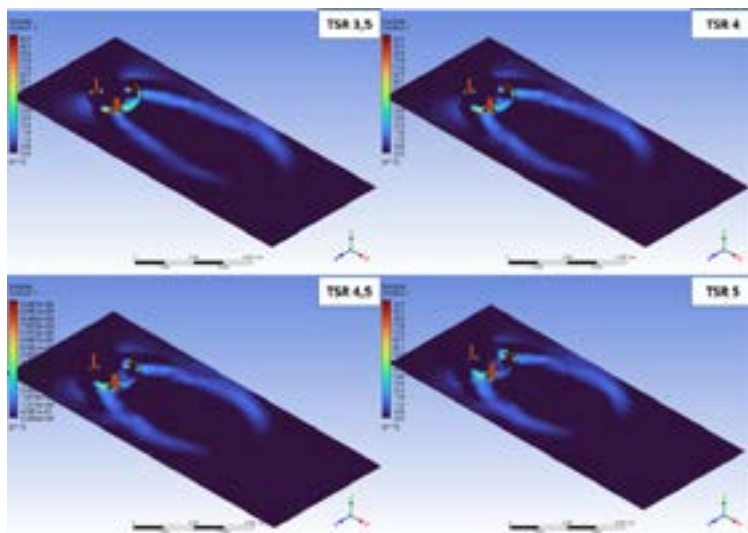
TSR 3.5-тен жоғары мәндерде ағын ізі кеңейіп, тұрақсызданады. Қалақ маңында шекаралық қабаттың ажырауы күшейіп, төмен жылдамдықты аймақтар ұлғаяды және турбуленттілік артады. TSR = 5 жағдайында ағын ізі бытыраңқы сипат алып, жылдамдық өрісінің біркелкілігі бұзылып, ротор тиімділігі төмендейді.

Жалпы, жылдамдық контурлары ротордың оңтайлы аэродинамикалық жұмыс диапазоны $TSR \approx 2.5-3$ аралығында екенін көрсетеді.

3.1.3 Құйындылық өрісінің контурлары

7-суреттегі құйындылық контурлары TSR өзгерген сайын ротор қалақтары маңындағы айналмалы ағын құрылымы мен қарқындылығының өзгеретінін көрсетеді. Төмен TSR (1.5–2) кезінде құйындылық әлсіз және қысқа аймақтармен шектеледі, бұл аэродинамикалық әсердің жеткіліксіздігін білдіреді. $TSR = 2.5-3$ аралығында құйындар күшейіп, тұрақты құрылым түзіп, артқы ағын аймағында созылған із қалыптастырады – бұл ротордың ең тиімді жұмыс режиміне сәйкес келеді. TSR 3.5-тен жоғары мәндерде ағын тұрақсызданып, құйындар бытыраңқы сипат алады, турбуленттілік артады және TSR = 5 кезінде тиімділік төмендейді. Жалпы, ең қолайлы аэродинамикалық режим $TSR \approx 2.5-3$ аралығында байқалады.



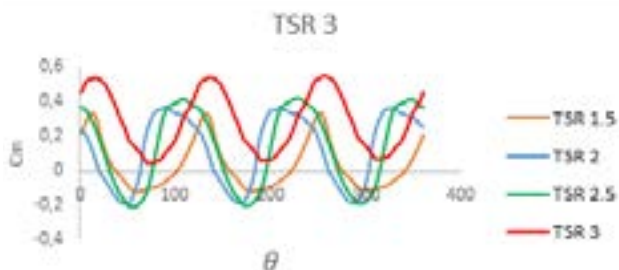


7-сурет – $TSR = 1.5-5$ диапазонында ротор айналасындағы құйындылық контурлары

Жалпы, құйындылық контурлары $TSR \approx 2.5-3$ аралығында ротордың ең қолайлы аэродинамикалық жұмыс режимі байқалатынын, ал жоғары TSR мәндерінде энергия алу тиімділігі төмендейтінін көрсетеді.

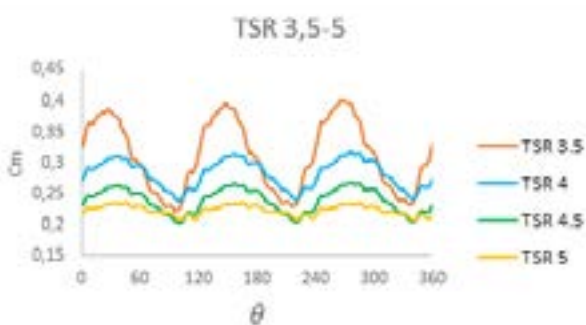
3.2 Әртүрлі TSR мәніндегі момент коэффициентінің бір толық айналым кезіндегі өзгерісі

8-суретте $TSR = 1.5-3$ диапазонында айналу моментінің коэффициенті C_m -нің азимутальды бұрышқа тәуелді өзгерісі көрсетілген. Қисықтардың айқын периодтылығы ротордың бір айналымы барысында аэродинамикалық жүктемелердің қайталанып отыратынын білдіреді, ал әрбір 120° сайынғы сәйкестік үш қалақты ротордың симметриялық конфигурациясын растайды.



8-сурет – TSR = 1.5–3 диапазонында C_m коэффициентінің таралуы

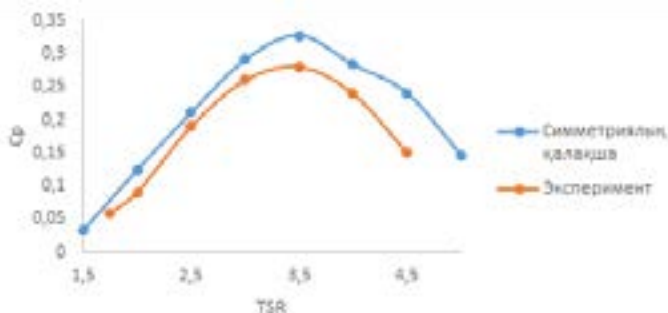
Төмен TSR кезінде C_m амплитудасы аз болып, кей фазаларда теріс мәндердің пайда болуы қарсы моменттің туындайтынын көрсетеді. TSR артқан сайын оң аймақтар кеңейіп, максимумдар өседі, яғни пайдалы айналу моменті ұлғаяды. TSR $\approx 2+5-3$ аралығында C_m ұзақ уақыт оң мәндерде сақталып, орташа момент максимал деңгейге жетеді, бұл ротордың ең тиімді аэродинамикалық режимін білдіреді.



9-сурет – TSR = 3.5–5 диапазонында C_m коэффициентінің таралуы

9-суретте TSR = 3.5–5 аралығында C_m коэффициентінің өзгерісі көрсетілген. TSR = 3.5 кезінде амплитуданың жоғары болуы қалақтардың тиімді аэродинамикалық жұмысын білдіреді. TSR артқан сайын қисықтар тегістеліп, орташа мәні төмендейді, бұл айналу жылдамдығының өсуіне байланысты жүктемелердің теңгерілуін сипаттайды. TSR = 5 кезінде тербелістер азайғанымен, пайдалы моменттің кемуі жалпы тиімділіктің

төмендеуін көрсетеді. Жалпы, ротордың оңтайлы жұмыс аймағы $TSR \approx 2.5-4$ диапазонында орналасады.



10-сурет – Қуат коэффициентінің TSR бойынша өзгерісі: есептік және эксперименттік деректер

10-суретте қуат коэффициентінің C_p TSR-ге тәуелділігі сандық модельдеу нәтижелері мен эксперименттік деректер арқылы салыстырылған [20]. Екі қысық та C_p мәнінің белгілі бір шекке дейін өсуін, одан кейін төмендеуін сипаттайтын классикалық аэродинамикалық заңдылықты көрсетеді. Эксперименттік мәліметтер C_p максимумының $TSR \approx 3-3.5$ кезінде байқалатынын көрсетсе, сандық модельдеуде бұл шама жоғарырақ TSR аймағында орналасады. Айырмашылықтар нақты қондырғыдағы үшөлшемді әсерлер мен механикалық шығындардың модельде толық ескерілмеуімен түсіндіріледі. Соған қарамастан, қысықтардың жалпы үйлесімділігі сандық модельдің аэродинамикалық үрдістерді адекватты сипаттайтынын растайды.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қаржылай қолдауымен жүргізілді. (Грант №. BR28713563 «Әртүрлі климаттық жағдайларда энергия тиімділігін арттыру үшін интеллектуалды басқаруы бар гибриді жел-күн энергетикалық жүйесі»).

Қорытынды

Жүргізілген сандық модельдеу симметриялық тік осьті үш қалақты ротордың аэродинамикалық сипаттамалары TSR шамасына тікелей тәуелді екенін көрсетті. Төмен TSR режимдерінде ($TSR \leq 2$) қалақ беттері арасындағы қысым айырмасы әлсіз болып, артқы ағын тұрақсыз қалыптасады, нәтижесінде айналу моменті мен аэродинамикалық тиімділік төмен болады.

$TSR \approx 2.5-3.5$ диапазонында қысым айырмасы күшейіп, қалақтар маңында тұрақты аэродинамикалық жүктеме қалыптасады. Бұл жылдамдық өрістеріндегі үдетілген ағын аймақтарымен және орнықты артқы ағын құрылымымен расталады. Құйындылық талдауы осы режимде энергия алмасудың қарқынды жүретінін көрсетеді.

Айналу моменті коэффициентінің C_m өзгерісі TSR артқан сайын теріс аймақтардың азайып, оң мәндердің басым болатынын көрсетті. $TSR \approx 2.5-4$ аралығында орташа момент максимал деңгейге жақындайды, ал $TSR \geq 4.5$ кезінде оның өсуі шектеледі.

Қуат коэффициентінің C_p тәуелділігі аэродинамикалық үрдістерді жинақтап сипаттайды: ол TSR өскен сайын артып, шамамен $TSR \approx 4-5$ кезінде максимумға жетеді, кейін төмендейді. Экспериментпен салыстыру сандық модельдің негізгі үрдістерді дұрыс бейнелейтінін көрсетті.

Жалпы талдау ротордың ең тиімді аэродинамикалық жұмыс режимі $TSR \approx 2.5-4$ диапазонында қалыптасатынын, ал одан жоғары мәндерде тиімділіктің біртіндеп төмендейтінін дәлелдейді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Zhang, D., Wu, Z., Chen, Y., et al.** Full-scale vs. scaled aerodynamics of 5-MW offshore VAWTs under pitch motion: A numerical analysis // Applied Energy, –Vol. 372. – 2024. – 123822. – ISSN 0306-2619. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123822>

2 **Liu, J., Lin, H., Zhang, J.** Review on the technical perspectives and commercial viability of vertical axis wind turbines // Ocean Engineering. – 2019. –Vol. 182. – P. 608–626.

3 **Sutherland, H., Berg, D., Ashwill, T.** A retrospective of VAWT // Renewable Energy – 2016. – Vol. 93. – P. 536-547. – <https://doi.org/10.2172/1035336>

4 **Battisti, L., Brighenti, A., Benini, E., et al.** Analysis of different blade architectures on small VAWT performance // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. –Vol. 753(6). – P. 856-869.

5 **Sun, S., Liu, H., Peng, H.** Power performance and self-starting features of H-rotor and helical vertical axis wind turbines with different airfoils in turbulence // Energy Conversion and Management, –Vol. 292. – 2023. – 117405. – ISSN 0196-8904. – <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117405>

6 **Wang, T.** A brief review on wind turbine aerodynamics // Theoretical and Applied Mechanics Letters, –Vol. 2. – Issue 6. – 2012. – 062001. – ISSN 2095-0349. – <https://doi.org/10.1063/2.1206201>

7 **Bai, C., Wang, W.** Review of computational and experimental approaches to analysis of aerodynamic performance in horizontal-axis wind turbines (HAWTs) // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. –Vol. 63. –P. 506–519.

8 **Kamma, P., Promtong, M., Suvanjumrat, C.** Development of a reduced mechanism for methane combustion in OpenFOAM: A computational approach for efficient and accurate simulations // *International Journal of Thermofluids*. –Vol. 22. – 2024. – 100654. – ISSN 2666-2027. – <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100654>

9 **El Kasmi, A., Masson, C.** An extended $k-\varepsilon$ model for turbulent flow through horizontal-axis wind turbines // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2008. –Vol. 96(1). – P.103–122.

10 **Elfarra, M., Sezer-Uzol, N., Akmandor, I.** NREL VI rotor blade: numerical investigation and winglet design and optimization using CFD // *Wind Energy*. – 2014. –Vol. 17(4). –P. 605–626.

11 **Kabir, I.S.A.** Effect of different atmospheric boundary layers on the wake characteristics of NREL phase VI wind turbine // *Renewable Energy*. – 2019. – Vol.130. –P. 1185–1197.

12 **Steiner, J., Dwight, R., Viré, A.** Data-driven RANS closures for wind turbine wakes under neutral conditions // *Computers & Fluids*. –Vol. 2022. – 105213. – ISSN 0045-7930. – <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2021.105213>

13 **Zhu, C., Chen, J., Qiu, Y., Wang, T.** Numerical investigation into rotational augmentation with passive vortex generators on the NREL phase VI blade // *Energy*. – 2021. –Vol.223. –P. 245–264.

14 **Yu, G., Shen, X., Zhu, X., Du, Z.** An insight into the separated flow and stall delay for HAWT // *Renewable Energy*. – 2011. –Vol. 36(1). –P. 69–76.

15 **Esfahanian, V., Pour, A. S., Harsini, I., Haghani, A., Pasandeh, R., Shahbazi, A., et al.** Numerical analysis of flow field around NREL phase II wind turbine by a hybrid CFD/BEM method // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2013. –Vol.120. – P. 29–36.

16 **Tachos, N., Filios, A., Margaris, D.** A comparative numerical study of four turbulence models for the prediction of horizontal axis wind turbine flow // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. – 2010. –Vol. 224(9). –P. 1973–1989.

17 **Moshfeghi, M., Song, Y., Xie, Y.** Effects of near-wall grid spacing on SST $k-\omega$ model using NREL phase VI horizontal axis wind turbine // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2012. –P. 94–105.

18 **Ji, B., Zhong, K., Xiong, Q., Qiu, P., Zhang, X., Wang, L.** CFD simulations of aerodynamic characteristics for the three-blade NREL phase VI wind turbine model // *Energy*. – 2022. –Vol. 249. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123670>

19 Kalassov, N., Baizhuma, Z., Manatbayev, R., Yershina, A., Isataev, M., Kalassova, A., Seidulla, Z., Bektibay, B., Amir, B. Integrated approach to aerodynamic optimization of Darrieus wind turbine based on the Taguchi method and computational fluid dynamics (CFD) // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15(10). <https://doi.org/10.3390/app15105739>

20 Kjellin, J., Bulow, F., Eriksson, S., Deglaire, P., Leijon, M., Bernhoff, H. Power coefficient measurement on a 12 kW straight bladed vertical axis wind turbine // Renewable Energy. – 2011. – Vol. 36(11). – P. 3050–3053. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.031>

09.01.26 ж. баспаға түсті.

05.03.26 ж. түзетулерімен түсті.

05.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Н. Б. Каласов¹, Ж. Е. Байжума², А. А. Куйкабаева³,

*А. Р. Рыскул⁴, Ж. К. Сейдулла⁵.

^{1,2,3,4,5}Қазақский Национальный университет имени аль-Фараби,

Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 09.01.26.

Поступило с исправлениями 05.03.26.

Принято в печать 05.06.26.

ТРЕХЛОПАСТНАЯ СИММЕТРИЧНАЯ ВЕТРОВАЯ ТУРБИНА ДАРЬЕ: КОНСТРУКЦИЯ, АЭРОДИНАМИКА И ХАРАКТЕРИСТИКИ

В данной работе с помощью вычислительной гидродинамики (CFD) были всесторонне исследованы аэродинамические свойства симметричной трехлопастной ветровой турбины Дарье с вертикальной осью вращения. Цель исследования – определить изменения структуры потока, устойчивость крутящего момента и эффективность выработки электроэнергии при различных коэффициентах быстроходности (TSR). В качестве объекта был выбран трехлопастный ротор Н-образного типа с симметричным аэродинамическим профилем NASA 0021, а для описания турбулентного потока использовались уравнения Навье-Стокса, усредненные по Рейнольдсу (RANS), и k-ε модель турбулентности. В ходе численного моделирования рассматривались вращающиеся и стационарные расчетные области, а для точного расчета

взаимодействия лопастей и потока использовался метод скользящей сетки. Результаты показали, что поля давления, скорости и турбулентности значительно изменяются с изменением TSR: при низких значениях TSR поток становится неустойчивым, а аэродинамическая эффективность ограничена, в то время как в диапазоне $TSR \approx 2,5-4$ вблизи лопастей формируется стабильная структура потока, а крутящий момент и коэффициент мощности достигают своих максимальных значений. При дальнейшем увеличении TSR эффективность извлечения полезной энергии начинает снижаться из-за усиления турбулентности. Сравнение полученных зависимостей C_p и C_t с экспериментальными данными показало, что численная модель надежно описывает аэродинамические процессы. Результаты исследования имеют практическое значение при проектировании и оптимизации ветротурбин с вертикальной осью вращения.

Ключевые слова: Турбина Дарье, турбина с вертикальной осью вращения, профиль NACA 0021, $k-\epsilon$ модель турбулентности, уравнения RANS, коэффициент мощности (C_p), TSR – коэффициент скорости.

N. B. Kalasov¹, Zh. E. Baizhuma², A. A. Kuikabaeva³,

*A. R. Ryskul⁴, Zh. K. Seidulla⁵

^{1,2,3,4,5} Al-Farabi Kazakh National University,

Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 09.01.26.

Received in revised form 05.03.26.

Accepted for publication 05.06.26.

THREE-BLADED SYMMETRICAL DARRIUS WIND TURBINE: DESIGN, AERODYNAMICS AND CHARACTERISTICS

In this study, computational fluid dynamics (CFD) was used to comprehensively investigate the aerodynamic properties of a symmetrical three-bladed Darrieus vertical-axis wind turbine. The objective of the study was to determine the flow structure variations, torque stability, and power generation efficiency at different total speed ratios (TSRs). A three-bladed H-type rotor with a symmetrical NACA 0021 airfoil was chosen as the turbine object, and the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations and the $k-\epsilon$ turbulence model were used to describe the turbulent flow. Rotating and stationary computational domains were considered during

the numerical simulations, and the sliding mesh method was used to accurately calculate the blade-flow interaction. The results showed that the pressure, velocity, and turbulence fields change significantly with TSR: at low TSR values, the flow becomes unstable and aerodynamic efficiency is limited, while in the TSR range of $\approx 2.5-4$, a stable flow structure forms near the blades, and the torque and power factor reach their maximum values. As TSR increases further, the efficiency of useful energy extraction begins to decrease due to increased turbulence. A comparison of the obtained C_p and C_m dependences with experimental data showed that the numerical model reliably describes the aerodynamic processes. The results of the study have practical implications for the design and optimization of vertical-axis wind turbines.

Keywords: Darrieus turbine, vertical axis turbine, NACA 0021 profile, $k-\varepsilon$ turbulence model, RANS equations, power coefficient (C_p), TSR – speed coefficient.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz