

Развој нових оптималних адаптроничких аеропрофила, употребом савремених инжењерских софтверских пакета

БОШКО П. РАШУО, Универзитет у Београду,

Машински факултет, Београд

АЛЕКСАНДАР Ч. БЕНГИН, Универзитет у Београду,

Машински факултет, Београд

МИРКО Р. ДИНУЛОВИЋ, Универзитет у Београду

Машински факултет, Београд

АЛЕКСАНДАР М. ГРБОВИЋ, Универзитет у Београду

Машински факултет, Београд

Оригинални научни рад

UDC: 621.548.5-11

621.311.245:620.9

UDC: 10.5937/tehnika2403305R

У овом раду су анализирани могућности коришћења савремених адаптивних структура лопатице ветротурбинских система у циљу повећања искоришћености енергетског потенцијала ветра на одабраној локацији потенцијалне фарме ветрогенератора снаге од по 2 MW. Ово је постигнуто коришћењем адаптивних модерних адаптроничких аеропрофила који су обезбедили потребно витоперење и прилагођавање локалних облика аеропрофила дуж лопатице ветротурбине и при томе обезбеђујући максималне енергетске перформансе целе турбине у оквиру ветроелектране као целине.

Кључне речи: енергетска ефикасност, адаптронички аеропрофил, савремени софтверски пакети

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Оптимизација и синхронизација рада појединачних ветрогенератора унутар једне, а такође и унутар више блиско подигнутих фарми ветрогенератора је посебно интересантан и захтеван задатак који се поставља пред истраживаче, а који се баве овом проблематиком данас у свету [1-4]. Ниво енергетских губитака у вртложном трагу по једном ветрогенератору може достићи и више десетина процената. Због тога је оптимизација рада фарми ветрогенератора на изабраној локацији и истраживање свих релевантних феномена везаних за енергетска побољшања у раду сваког појединачног ветрогенератора са становишта активне, пасивне и адаптроничке контроле струјања, граничног слоја и турбуленције у вртложном трагу иза њих, изузетно важан задатак који се поставља пред истраживаче. Тако да је, формирање комплетне и поуздане методологије оптимизације укупног броја и

распореда савремених ветрогенератора на изабраним локацијама за изградњу фарми ветрогенератора, са гледишта максималног енергетског искоришћења локалитета на којој ће се налазити електрана примаран задатак који се мора обавити у прелиминарној фази пројекта.

Ово истраживање треба започети развојем аеродинамички оптималних локалних облика адаптроничких аеропрофила ветрогенератора. Ова идеја се може у прелиминарној фази спровести употребом савремених програмских пакета: Fluent, MatLab и CATIA, како модела лопатице ротора тако и целе ветротурбине, тј. ветрогенератора, а на основу технолошко-техничких захтева и номиналне генерисане снаге, као и целе пројектоване фарме адаптроничких ветрогенератора са максималним енергетским учинком на изабраној локацији, што је и крајњи циљ ових истраживања. У овом пројекту изабрана је снага од 2 MW по свакој ветротурбини, а у оквиру фарме радиће 10 ветротурбина [5-9].

Проблем овог дела истраживања се састоји од дефинисања два типа лопатице ветрогенератора: класичног облика лопатице и лопатице са винглетима. Симулација опструјавања је обављена у Флуенту при умереним брзинама и при условима

Адреса аутора: Бошко Рашуо, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд, Краљице Марије 16

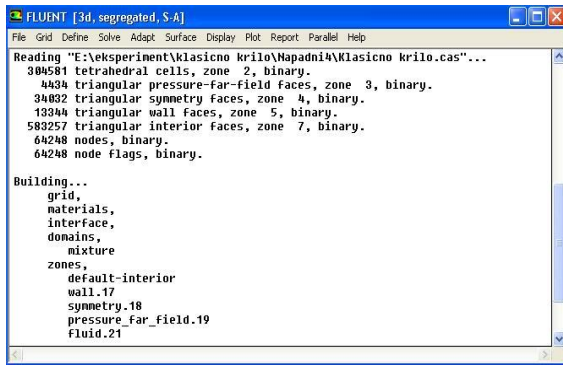
e-mail: brasuo@mas.bg.ac.rs

Рад примљен: 04.06.2024.

Рад прихваћен: 10.06.2024.

стандардне атмосфере на висини $H = 0m$. Основно полазно окружење у Флуент програмском пакету је приказано на слици 1.

Значи моделирана је лопатица (полуразмах класичног крила) и крила са винглетом и израчунати су аеродинамички коефицијенти. На тај начин ће се добити карактеристике лопатице (крила) са и без винглета [10-13].



Слика 1 - Радно окружење у Флуенту

Једна од најважнијих одлука која треба да се донесе приликом пројектовања новог ветрогенератора јесте оптималан избор аеропрофила. Аеропрофил и облик лопатице одређују аеродинамичке карактеристике ветрогенератора. Стога прелиминарне информације које се тичу перформанси изабраног аеропрофила су од великог значаја за конструктора. Аеропрофили су одабрани на основу њихове способности да испуне захтеве оптималног енергетског учинка ветрогенератора.

Аеропрофили коришћени у овом пројекту изабрани су на основу теоријске методе Цаги-Лоца. Комплетне геометријске карактеристике аеропрофила налазе се у референцама [10-13]. Аеропрофили одабрани за ову анализу су за корени део лопатице $NACA\ 66(2)215$, а за њен врх $NACA\ 66(2)212$.

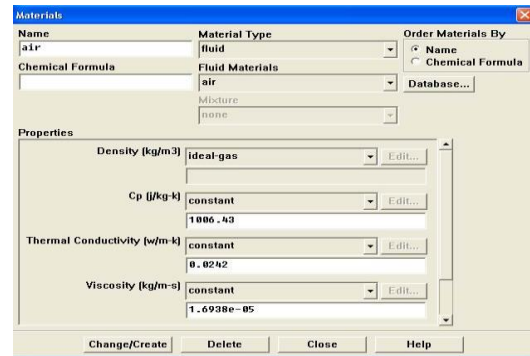
Што се тиче лопатице са винглетом аеропрофили су потпуно идентични с тим што је за корен винглета одабран аеропрофил $NACA\ 66-009$, док је за врх винглета одабран аеропрофил $NACA\ 66-006$. Тачне координате свих коришћених аеропрофила такође се налазе у прилогу, види референце [10-13].

Прво је прорачунат класичан облик лопатице а затим и лопатица са винглетом на крају, да би се видело какав ће утицај винглети имати на укупне аеродинамичке карактеристике ветрогенератора.

2. ИЗБОР ПАРАМЕТАРА ОПСТРУЈАВАЊА

Карактеристике параметара опструјавања се у Флуенту дефинишу у 'Materials' панелу. За случај опструјавања око лопатица ветрогенератора у

ваздуху случај је једноставан: само се из библиотеке Флуента селекује ваздух као радна материја, затим се у тражене вредности укуцају стварне карактеристике ваздуха за одређену надморску висину. Избор параметара радне материје приказан је на слици 2.



Слика 2 - Панел са карактеристикама радне материје

Под картицом „density“ која се односи на густину ваздуха одабрана је опција која ваздух сматра идеалним гасом, с обзиром на надморску висину и брзину струјања ваздуха и температуре по нормалној стандардној атмосфери. Ова претпоставка је оправдана с обзиром на то да је за прорачун аеродинамичких карактеристика лопатица ветрогенератора коришћен, тзв. СА модел прорачуна струјања ваздуха о којем ће бити речи нешто касније.

3. ИЗБОР МОДЕЛА ОПСТРУЈАВАЊА

За прорачун у Флуенту важна је информација да ли је струјање турбулентно или ламинарно. Та информација нам омогућава да одаберемо одговарајући модел струјања од укупно седам колико нам нуди програмски пакет Флуент. Основни параметар који нам указује на то да ли је струјање турбулентно или ламинарно јесте Рејнолдсов број.

Рејнолдсов број се може израчунати за изабрану локацију на следећи начин:

$$Re = \frac{\rho \cdot l \cdot V}{\mu} = \frac{1.225 \cdot 3.60 \cdot 12.7}{1.782 \cdot 10^{-5}} = 3142929.3 = 3.14M\ Re$$

где су:

ρ – густина ваздуха

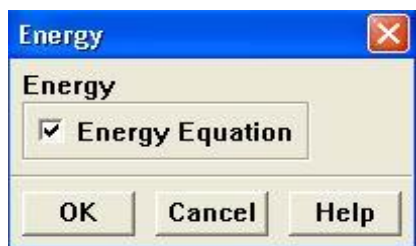
l – референтна дужина опструаване узгонске површине (у овом случају дужина тетиве лопатице)

V – брзина ветра

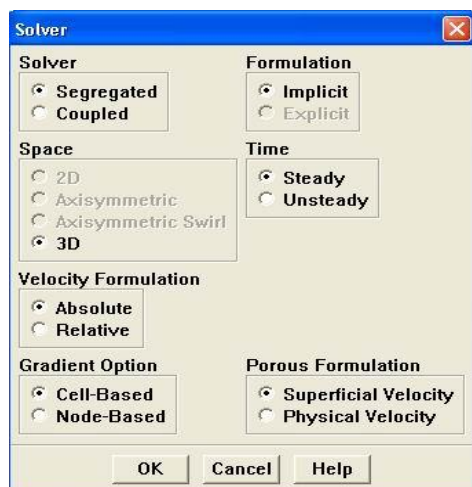
μ – кинематска вискозност

Добијени резултат указује на то да се опструјавање око лопатица ветрогенератора врши у области турбулентног струјања. Брзина ветра

$V = 12.7 \text{ m/s}$ указује на то да се струјање налази у некомп्रेसибилном подручју. На основу ових параметара за тачан прорачун у флуенту можемо одабрати, тј. активирати енергетску једначину.



Слика 3 - Панел за активирање енергетске једначине



Слика 4 - Панел за избор солвера

Приликом дефинисања услова струјања у флуенту потребно је одабрати и тип 'солвера' који ћемо користити. У Флуенту постоје два различита солвера: одвојени (segregated) и удвојени (coupled). Разлика између ова два солвера је у томе да на пример, удвојени солвер решава једначине континуитета, момента и енергије симултано док одвојени солвер то ради одвојено. Оба ова солвера имају специфичне предности и мане које се тичу стабилности итерације, меморијских захтева, оптерећења процесора, брзине конвергенције итд. Важно је то да оба солвера морају дати исто решење под условом да решење конвергира са реалним вредностима. У литератури се препоручује коришћење удвојеног солвера за компресибилна струјања зато што брже конвергира за нелинеарне једначине. Мана удвојеног солвера је та што јако оптерећује процесор рачунара, удвојени солвер овом приликом није коришћен обзиром да постојећи капацитет доступних рачунара који није био довољног капацитета па је коришћен само тзв. Одвојени солвер (види слику 4).

Претходна анализа је показала да је тип струјања дефинитивно у потпуно турбулентном подру-

чију. Значи потребно је одабрати модел струјања који узима у обзир турбулентне ефекте. Флуент нуди неколико модела турбулентног струјања почевши од једноставног једноједначинског Спаларт-Алмар (SA) модела, затим двоједначински модели ($k - \varepsilon$ и $k - \omega$ тип) [14-16], затим Рејнолдсов седмоједначински модел струјања и коначно ЛЕС метод прорачуна (Large Eddy Simulation method) [17-18].

Разлог за овако велики избор прорачунских модела струјања лежи у томе да турбулентно струјање представља још увек довољно неистражено подручје, резултати за исти проблем приликом коришћења два или више различитих модела често дивергирају. С обзиром на то да су већина струјања у природи и индустријским применама турбулентна, избор турбулентног модела је врло важан корак при програмској анализи. Избор турбулентног модела највише зависи од следећих параметара:

- захтеване тачности,
- жељене брзине прорачуна,
- доступних хардверских капацитета и
- примењивости одређеног прорачунског модела струјања и његове прилагодљивости специфичним карактеристикама струјања.

Последња ставка се односи на одређене типове струјања код којих се јављају нестационарни ефекти попут вртлога, стагнационих ефеката, нагло скока градијената, сепарације/припајања струјања итд.

Наредне две табеле приказују све доступне моделе турбулентног струјања у Флуенту као и њихово понашање и области њихове примене.

Из претходних табела јасно је да је SA модел турбулентног струјања најпогоднији модел за прорачун аеродинамичких карактеристика лопатице ветрогенератора. Коректно би било ради провере користити паралелно још један модел струјања али сви остали турбулентни модели су превише захтевни у хардверском смислу тако да је SA модел остао као најпогоднији.

С обзиром на то да је одабран SA модел турбулентног струјања у следећем поглављу биће дата детаљнија теоријска анализа коришћеног прорачунског модела струјања. Подаци су преузети из техничког извештаја П. Спаларта и С. Алмарса: „Једноједначински турбулентни модел прорачуна за аеродинамичка опструјавања“ који је објављеном у АИАА – гласнику америчког института за аеронаутику и астронаутику 1992. године [14-16].

Табела 1. Опис доступних модела у Флуенту

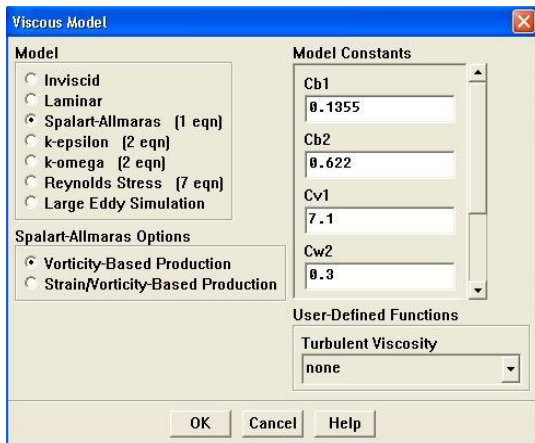
	Опис
Спаларт-Алмар (СА) модел	Једноједначински турбулентни модел директно везан за турбулентну вискозност. Пројектован посебно за ваздухопловне апликације које укључују и прорачуне граничног слоја,
Стандардни $k - \varepsilon$ модел	Основни двоједначински модел директно везан за турбулентне коефицијенте k и ε . коефицијенти су прецизно одређени само за потпуно турбулентна струјања.
RNG $k - \varepsilon$ модел	Варијанта стандардног модела. Коефицијенти у једначинама су аналитички одређени. Модел намењен за турбулентна струјања под високим притиском (коморе, цеви, коомпресори итд.).
Унапређени $k - \varepsilon$ модел	Варијанта стандардног модела. Унапређење се односи на примену одређених математичких модела што унапређује квалитет резултата.
Стандардни $k - \omega$ модел	Двоједначински модел струјања са турбулентним параметрима k и ω , користи однос дисипације (ε/k) према Вилкоксу (1998). изузетне перформансе за струјања близу зидова и мале Рејнолдсове бројеве.
SST $k - \omega$ модел	Варијанта стандардног модела. Комбинује оригинални Вилкокс модел са стандардним $k - \varepsilon$ моделом.
Рејнолдсов модел	Рејнолдсова напрезања се решавају директно са једначинама транспорта флуида избегавајући тако претпоставке изотропске вискозности осталих модела.

Табела 2. Понашање и примена доступних модела у Флуенту

Модел	Понашање и примена
Спаларт-Алмар (СА) модел	Економичан за велике мреже. Слабе перформансе за 3Д струјања и струјања за израженим одвајањима. Погодан за благо сложена, 2Д спољашња/унутрашња струјања и струјања са градијентом притиска (на пример: аеропрофиле, крила, лопатица ветрогенератора, трупове авиона, бомбе и пројектиле, трупове бродова итд.).
Стандардни $k - \varepsilon$ модел	Јако робустан модел. Нашироко примењиван упркос познатим ограничењима модела. Слабе перформансе за струјања са изразитим градијентом притиска и изразитом сепарацијом. Погодан за почетне итерације прорачуна или почетне анализе неколико типова конструкције.
RNG $k - \varepsilon$ модел	Погодан за прорачун комплексних напона смицања са брзим променама напона, затим за вртлоге средњег интензитета и локално прелазна струјања.
Унапређени $k - \varepsilon$ модел	Сличне предности као и стандардни модел. Не може се користити са покретним зидовима или покретним мрежама. Вероватно тачнији и лакши за конвергирање него стандардни модел.
Стандардни $k - \omega$ модел	Изузетне перформансе за неструктурисане мреже, користи се за струјање под атмосферским условима и за мале Рејнолдсове бројеве. Погодан и за сложене мреже са негативним градијентом притиска и са појавом сепарације струјања. Може да се користи и за прелазна струјања мада тежи да помери тачку преображаја превише унапред.
SST $k - \omega$ модел	Исте предности као и стандардни модел. Зависност од удаљености од зида га чини тежим за коришћење код струјања са малим напонима смицања у радној материји.
Рејнолдсов модел	У стручним круговима најпознатији модел турбулентног струјања који користи и Навије-Стоксове једначине за конвергенцију решења. Модел који највише оптерећује процесор и радну меморију рачунара те се стога користи само на врхунским уређајима. Тежак за конвергирање због блиског удвајања свих једначина. Користи се за комплексна 3Д струјања са изразитим вртлозима и изразито великим градијентима (заобљене цеви, ротирајући пролази, коморе за сагоревање, циклони итд.).

4. СА МОДЕЛ ТУРБУЛЕНТНОГ СТРУЈАЊА

Значи једино је СА модел струјања могуће применити на доступним хардверским уређајима. Остали модели турбулентног струјања захтевају превише меморијског простора, конвергенција решења код њих би трајала несразмерно дуго изузев у условима паралелног процесирања. Обзиром на ту чињеницу, биће приказана примена једначине помоћу које се могу израчунавати параметри конвергентног струјања у оквиру изабраног модела струјања (слика 5).



Слика 5 - Избор СА модела из панела са моделима турбулентног струјања

СА модел турбулентног струјања је модел струјања новијег датума предложен за примену у ваздухопловству. Модел је израђен од стране П. Спаларта и С. Алмарса и први пут је представљен у часопису Америчког института за аеронаутику и астронаутику 1992.

СА модел је релативно једноставан модел помоћу којег се решавају једначине транспорта флуида базиране на турбулентној (кинематској) вискозности. СА модел представља релативно нову класу једноједначинских турбулентних модела код којих није неопходно прорачунавати однос дужина везаних за локалну расподелу напона у флуиду. СА модел је пројектован посебно за примену у ваздухопловству код струјања у близини зидова, показало се да даје добре резултате за неструктурисане мреже и код струјања са негативним градијентом притиска. Такође, метода је јако је популарна и међу конструкторима турбомашина.

У својој оригиналној форми СА модел би требало да се примењује за мале Рејнолдсове бројеве, неопходно је да подручја у близини зидова буду одговарајуће дефинисана неструктурисаном мрежом. Међутим у Флуенту СА модел је прилагођен да користи посебне функције када се струјање дешава у близини зида иако резолуција мреже није довољно велика. Због тога се СА модел често

користи за почетне симулације са мрежама мале резолуције где није неопходан посебно прецизан прорачун параметара турбулентног струјања. Дале, градијенти у близини зида транспортне променљиве су много мањи у близини зида него градијенти у $k - \omega$ и $k - \varepsilon$ моделима турбулентног струјања. Ова чињеница чини модел мање осетљивим према нумеричким грешкама када се користе неструктурисане мреже у близини зидова.

Међутим, приликом примене СА модела треба бити опрезан пошто је СА модел релативно нов модел турбулентног струјања и још увек нису забележена искуства која се тичу стабилности прорачуна у свим областима инжењерске праксе. На пример, СА модел још није поуздан за предвиђање преласка турбулентног струјања у ламинарно струјање. Једноједначински модели су често критиковани због њихове немогућности да истрпе велике промене у параметрима струјања, што је посебно карактеристично за прелазне регионе између граничног слоја и слободног струјања.

Променљива $\tilde{\nu}$ у СА моделу је идентична турбулентној кинематској вискозности осим у регионима у близини зида, местима где се може осетити утицај вискозности. Транспортна једначина за $\tilde{\nu}$ у овом случају има следећи облик:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\tilde{\nu}u_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_v} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho\tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v + S_v$$

Где су: G_v производ турбулентне вискозности, Y_v параметар расипања турбулентне вискозности који се дешава у близини зидова због блокирања зида и вискозног квашења, σ_v и C_{b2} су константе а V је молекуларна кинематска вискозност, S_v ће бити дефинисан накнадно.

Турбулентна вискозност μ_t је дата у облику

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{v1}$$

где је функција вискозности дата у облику

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3}$$

и коначно

$$\chi \equiv \frac{\nu}{\tilde{\nu}}$$

Производ турбулентне вискозности G_v је дефинисан као

$$G_v = C_{b1} \rho \tilde{\nu} \tilde{\nu}$$

где је

$$\tilde{S} \equiv S + \frac{\tilde{v}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}$$

и на крају

$$f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}$$

Вредности C_{b1} и κ су константне, d је удаљеност од зида и S је скалар тензора деформације. Овај тензор Флуент аутоматски рачуна по оригиналном прорачунском моделу који је предложен у СА моделу струјања: Тензор се базира на интезитету вртлога:

$$S \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}},$$

где је Ω_{ij} средњи однос ротације тензора дефинисан у облику:

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Објашњење за овакву вредност тензора S је да за струјања у близини зидова, која су и била у центру пажње када је модел формиран, турбуленција на зидовима се налази само тамо где се генеришу вртлози ако је то уопште у близини зида.

Параметар расипања турбулентне вискозности се дефинише у облику

$$Y_v = C_{\omega 1} \rho f_{\omega} \left(\frac{\tilde{v}}{d} \right)^2,$$

где је

$$f_{\omega} = g \left[\frac{1 + C_{\omega 3}}{g^6 + C_{\omega 3}} \right]^{1/6},$$

$$g = r + C_{\omega 2} (r^6 - r),$$

$$r \equiv \frac{\tilde{v}}{\tilde{S} \kappa^2 d^2}.$$

Вредности за $C_{\omega 1}$, $C_{\omega 2}$ и $C_{\omega 3}$ су константне, \tilde{S} је већ претходно дефинисано. Све константе у горе описаном СА моделу имају следеће вредности у програмском пакету Флуент:

$$C_{b1} = 0.1355, C_{b2} = 0.622, \sigma_{\tilde{v}} = \frac{2}{3}, C_{v1} = 7.1$$

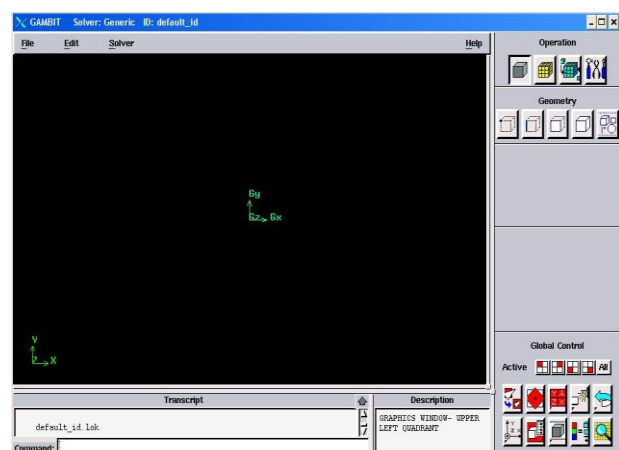
$$C_{\omega 1} = \frac{C_{b1}}{\kappa^2} + \frac{(1 + C_{b2})}{\sigma_{\tilde{v}}}, C_{\omega 2} = 0.3, C_{\omega 3} = 2.0, \kappa = 0.4187$$

5. КРЕИРАЊЕ ГЕОМЕТРИЈЕ У ГАМБИТУ

Гамбит је савремени софверски пакет који је намењен да помогне аналитичарима и дизајнерима креирање модела и стварање дводимензионалних и тродимензионалних мрежа око модела које се користе за прорачуне везане за динамику флуида у софтверским пакетима као што је флуент. Гамбит нема посебне специфичности везаних за само моделирање тродимензионалних делова у односу на сличне софтверске пакете, осим дела који је везан за конструисање прорачунске мреже.

Аеропродили који се користе ла лопатице ветрогенератора и дизајн винглета потичу из НАСА фамилије аеропродила. Аеропродили су одабрани на основу активности које су се обављале током прве и друге године ових истраживања и могу се наћи у годишњим извештајима.

Лопатица ветрогенератора је моделирана у Гамбиту коришћењем координата аеропродила из НАСА базе података. Координате аеропродила увезене су уз помоћ опције „import vertex points“, затим су, од увезених тачака формиране ивице лопатице. Најпре је конструсан аеропродил повезивањем увезених тачака. Ивице су затим повезане и формиране су равни горњаке и доњаке коришћењем опције „create face“. Потпуно идентичан поступак био је и приликом моделирања винглета с тим да су на већ постојећу геометрију на врху лопатице додате координате које описују сам винглет. Затим се прешло на креирање спољњег домена.

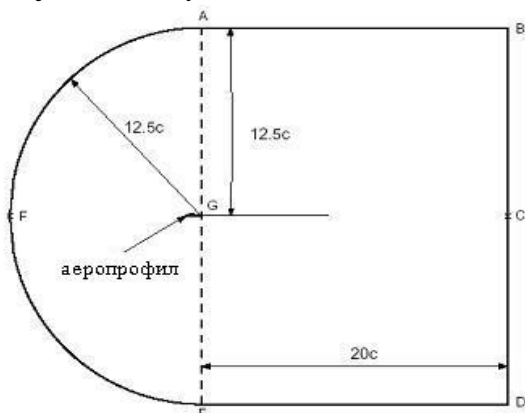


Слика 6 - Радно окружење у Гамбиту

Спољашни домен представља суштински важну операцију за тачан прорачун аеродинамичких карактеристика у Флуенту. Спољашни домен представља запремину „изрезану“ из атмосфере у коју се затим смешта модел и тек онда врше

испитивања. Утицај остатка атмосфере замењује се параметрима мирне атмосфере на граници спољњег домена. Параметри атмосфере на граници спољњег домена називају се гранични услови. У случају прорачуна лопатица ветрогенератора то су параметри атмосфере при условима рада ветрогенератора. Димензије спољњег домена морају да буду такве да не утичу на прорачун аеродинамичких карактеристика лопатица чије се опструјавање симулира у Флуенту. Струја ваздуха која опструјава лопатицу мора да се „смири“ пре него што дође до зида спољњег домена. Једини поуздан начин за прецизно одређивање одговарајућих димензија спољњег домена је да се запремина домена повећава све дотле док се аеродинамичке карактеристике лопатица не престану мењати тј. док се не добију константне вредности. Такав начин рада није превише ефикасан, поготово што је и време за израду оваквих прелиминарних истраживања ограничено.

Међутим редовна је пракса да се користе искуства других корисника Флуента. Лопатица ветрогенератора је била често тема испитивања многих аутора па су стога доступни подаци о препорученим димензијама домена за испитивање и анализу лопатица ветрогенератора. Тако се препоручује да димензија домена дуж размаха лопатице буде најмање четири дужине њеног размаха што је и усвојио приликом испитивања утицаја винглета на аеродинамичке карактеристике лопатице ветрогенератора у оквиру ове активности. Што се тиче димензија домена у равни симетрије уобичајено је да се раван домена поставља на дужини од најмање 20 тетива иза лопатице ветрогенератора, раван иза лопатице ветрогенератора логично и највише утиче на опструјавање у Флуенту те та димензија мора бити и највећа. Препорука је да раван домена испред лопатице ветрогенератора буде најмање 12.5 дужина његове тетиве.



Слика 7 - Димензије спољњег домена у равни симетрије (c -тетива аеропрофила лопатице ветрогенератора)

Све ове препоруке су усвојене и у овом пројекту. Димензије спољњег домена у равни симетрије које су коришћене у оквиру ове активности приказане су на слици 7.

6. КРЕИРАЊЕ МРЕЖЕ У ГАМБИТУ

За време креирања модела, посебна пажња мора да се обрати на креирање мреже у Гамбиту, посебно је важан модел лопатице са винглетом и то баш у подручју прелаза винглета и лопатице. Да би уопште било могуће почети операцију креирања мреже било је потребно применити Булове операције на претходно креирану запремину која се састоји од две запремине: запремине лопатице ветрогенератора и запремине спољашњег домена. Запремина лопатице је била одузета од запремине модела и на тај начин је створена једна јединствена запремина.

Након што је извршена ова операција, креирање мреже је прво започело креирањем мрежних тачака на свим ивицама модела лопатице ветрогенератора. Овај корак се може прескочити тј. препустити самом Гамбиту да се аутоматски одреди број тачака на ивицама комплетног модела лопатице ветрогенератора, али то није препоручљиво, уколико се желе добити приближно реални резултати прорачуна. При томе мрежа је аутоматски креирана само на ивицама спољњег домена.

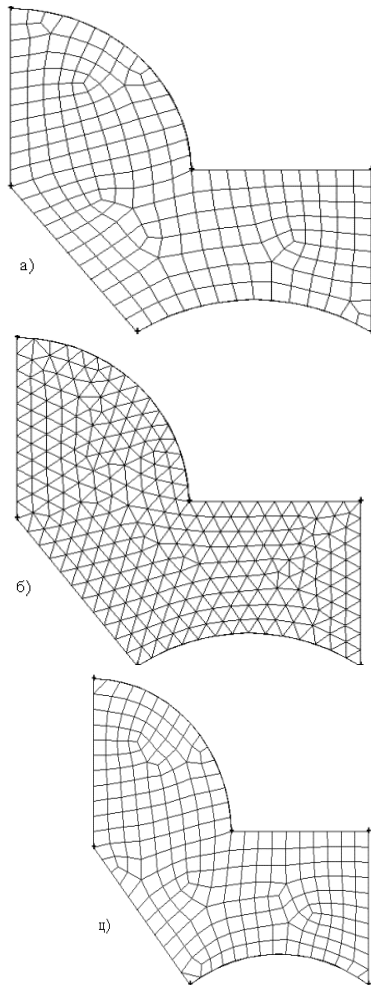
На ивици класичне лопатице ветрогенератора креиране су тачке за постављање прорачунске мреже на нападној и излазној ивици, на аеропрофилу у равни симетрије, на прелазу центроплана у трапезни део (уколико га има) те на аеропрофилу врха лопатице ветрогенератора.

На верзији лопатице ветрогенератора са винглетима урађено је исто са додатним постављањем тачака на нападну и излазну ивицу винглета те затим и на врх винглета. На нападну ивицу центропланског дела лопатице ветрогенератора постављено је 55 тачака, на нападну ивицу трапезног дела лопатице постављено је 50 тачака, идентично је урађено и са излазном ивицом. Аеропрофил у равни симетрије и на крају центропланског дела лопатице имали су 45 тачака, аеропрофил на врху лопатице имао је 40 тачака. Верзија лопатице ветрогенератора са винглетом је идентично урађена с тим што је на нападној и излазној ивици винглета постављено укупно 25 тачака. Аеропрофил винглета у корену имао је 25 тачака док је аеропрофил на винглету имао 20 тачака.

Не постоји прецизна метода по којој је аутоматски могуће одредити број потребних тачака. Приликом креирања мреже у равни користи се опција за контролу витоперења и издужења мреже

у Гамбиту. Уколико је превелики број издужених елемената укупан број тачака T том случају се мора смањити.

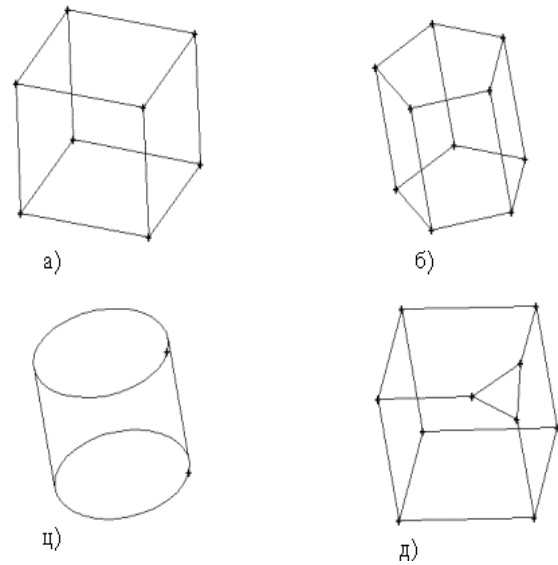
Постојање превише издужених елемената мреже утиче на прорачун у Флуенту, резултат најчешће не може да конвергира. Међутим мора се имати на уму да ће и премали број изабраних тачака више утицати и на саму тачност обављеног прорачуна у Флуенту. Значи, потребно је стрпљење и искуство док се не пронађе оптималан број тачака.



Слика 8 - Могући типови раванских елемената у програмском пакету Гамбит: а) четвороугли, б) троугли, ц) комбиновани

Следећи корак је креирање мреже на површинама класичног облика лопатице ветрогенератора и лопатице са винглетом. Мрежа у равни се састоји од простих геометријских елемената, у Гамбиту постоје различите опције и врсте елемента.

Троугласти, четвороугласти те комбиновани елементи су стандардна опција у Гамбиту, међутим могуће је користити сопствено креиране шеме и облике мрежа, при чему се у Гамбиту користе опције у оквиру менија: „boundary layer“.

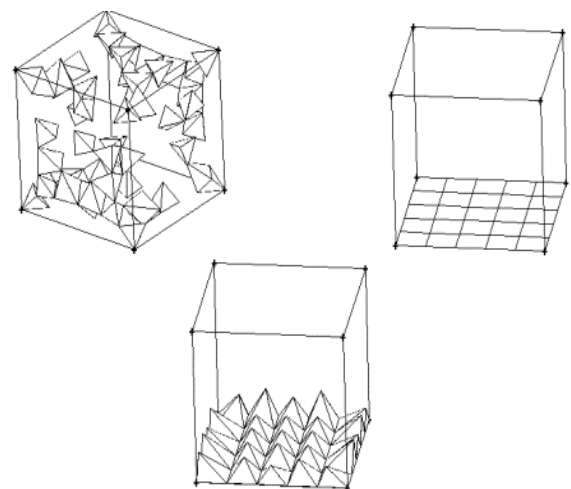


Слика 9 - Различити типови елемената за просторну мрежу у Гамбиту

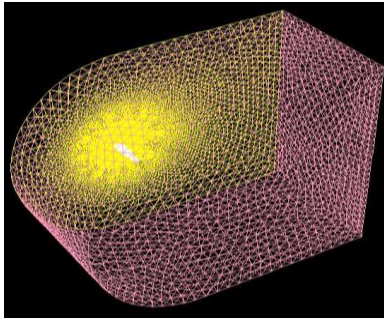
Четвороугли елементи захтевају више меморијског простора у Флуенту него троугли елементи, због тога су приликом креирања мреже у равни коришћени троугли елементи због већ поменутог проблема са временом и скромним расположивим хардверским капацитетима.

Последњи корак при креирању мреже је креирање мреже у запремини модела лопатице ветрогенератора са спољним доменом коришћењем опције „mesh volume“ у Гамбиту.

Такође постоје више типова елемената за просторну мрежу, неки од њих су приказани на слици 9. За ово истраживање је искоришћена мрежа у Гамбиту означена као „T-Grid“, приказана на слици 10, због тога што има најскромније захтеве везане за меморијски простор приликом прорачуна у Флуенту.

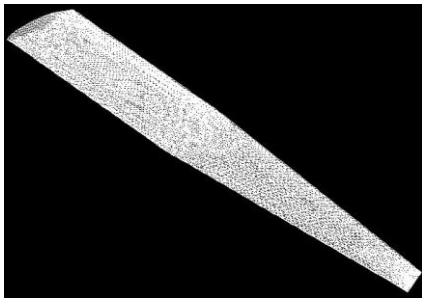


Слика 10 - Процес креирања просторних елемената типа 'T-Grid' у Гамбиту

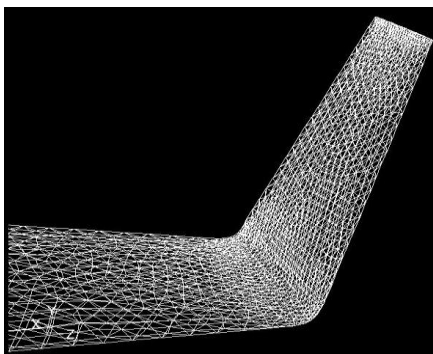


Слика 11 - Просторна мрежа спољњег домена са крилом у средини

Када је процес креирања просторне запремине завршен Гамбит је пријавио да је креирано 304581 елемент за класичан облик лопатице и 324426 елемената за верзију лопатице ветрогенератора са винглетом. Искуства других корисника приликом испитивања аеродинамичких карактеристика крила и лопатица говоре да је приближно 300.000 просторних елемената релативно скромно за прецизан резултат у Флуенту. Када би постојали технички услови за креирање више од 800.000 просторних елемената били би испуњени сви услови за постизање посебно прецизних резултата. Међутим и горе описани модел креирања мреже и геометрије, са коришћењем имплицитног одвојеног солвера, дао је доста добре резултате. На сликама 11, 12 и 13 приказан је спољни домен са просторном мрежом те раванска мрежа класичног модела лопатице и конфигурација лопатице ветрогенератора са винглетом.



Слика 12 - Раванска мрежа класичног крила

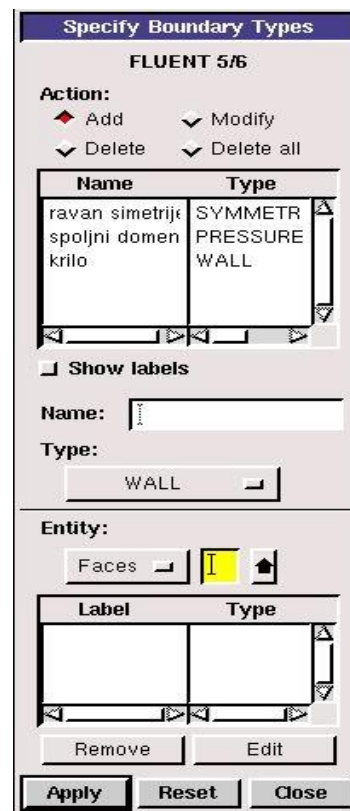


Слика 13 - Раванска мрежа класичног крила са винглетом

7. ДЕФИНИСАЊЕ ГРАНИЧНИХ УСЛОВА У ФЛУЕНТУ

Приликом опструјавања лопатице ветрогенератора при свим нападним угловима коришћени су исти гранични услови. Гранични услови представљају параметре атмосфере на граници спољњег домена и околне атмосфере при стандардним условима на изабраној локацији. Наиме, утицај параметара „одсечене“ атмосфере на граници спољњег домена морају се узети у обзир.

Границе слободног струјања су подешене опцијом „pressure far-field“. Изузетак је равна симетрије лопатице ветрогенератора која је подешена избором „symmetry“ ради посматрања резултата у каснијој анализи. Чврста површина лопатице (горњака и доњака лопатице) подешене су командом „walls“.



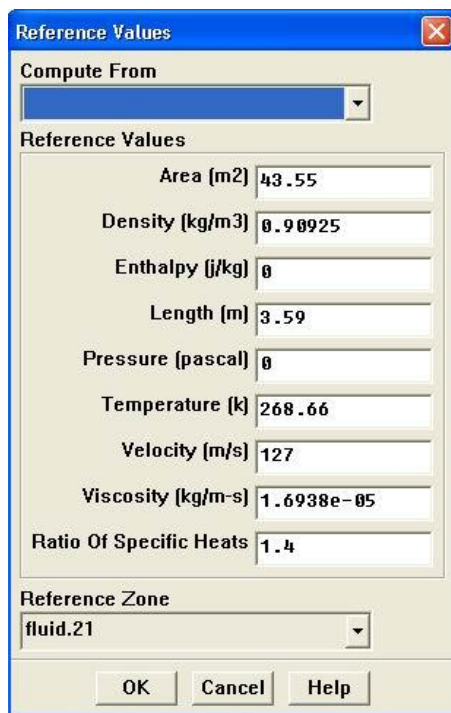
Слика 14 - Гранични услови у Флуенту

За спољне границе домена изаберу се следећи параметри: притисак атмосфере на изабраној локацији, брзина ветра, температура док се параметри турбуленције аутоматски подешавају онако како стоји у Флуенту. За равна симетрије сви градијенти промешивих као и компоненте брзине нормалне на равна симетрије се бирају да су нула. За равна горњака и доњака лопатице није рачунато расипање енергије (топлотни флуks је нула) или зрачење топлоте па је тако температура зида дефинисана пољем струјања.

Комплетни гранични услови се морају дефинисати пре саме обраде модела у Флуенту.

8. ПОДЕШАВАЊЕ ФЛУЕНТА И ИНИЦИЈАЦИЈА РЕЖИМА СТРУЈАЊА

За анализу дизајна класичног облика лопатице ветрогенератора и лопатице са винглетом коришћена је верзија Флуент 6.3.26. Прва ствар која се ради након уношења мреже у Флуент је провера саме мреже за случај да постоји неконзистентност. Проверава се вредност запремине, површине и броја елемената мреже. Ако код запремине или површине постоји негативан број то је поуздан знак да постоји преклапање елемената мреже. У том случају решење не може да конвергира.



Слика 15 - Референтне вредности прорачуна

Следећа операција која се обавља је активност Smooth/Swap, ова операција се користи када се желе вратити у нормалан облик поједини издужени или извитоперени елементи мреже. Операција се понавља све дотле док Флуент не пријави да нема више елемената за корекцију.

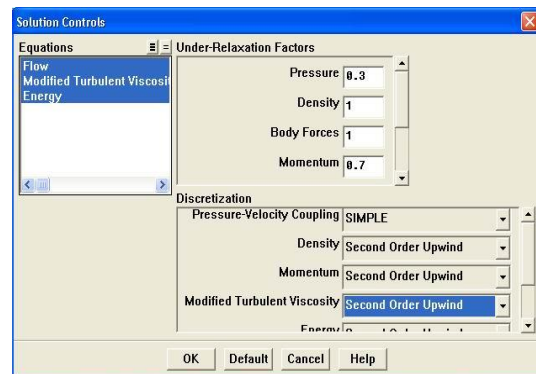
Затим су све димензије и јединице које се користе у прорачуну подешавају на међународни SI систем мера. Ова операција изведена је у панелу под називом Scale у Флуенту и селектовањем опције meters у прозору. Примена ове опције контролише се тако што се поново провери запремина и површина елемената мреже.

Након ове операције одабран је одговарајући солвер. Као базни солвер одабран је имплицитни одвојени солвер. Затим је одабран CA модел

турбулентног струјања, претходно је већ израчунат Рејнолдсов број за опструјавање око лопатице ветрогенератора када је закључено да се опструјавање налази потпуно у турбулентном режиму.

Следећи корак је подешавање граничних услова. Прво се подешавају параметри стандардне атмосфере који одговарају условима који владају на изабраној локацији. Задржана су аутоматска подешавања везана за силу гравитације. Прорачун је обављен за по осам нападних углова за класичну лопатицу ветрогенератора и по осам нападних углова за верзију лопатице са винглетом. Јасно је да се прорачун морао понављати за сваки нападни угао што је захтевало доста времена и интензивно оптерећење рачунара. Нападни угао струјања се подешава тако што се уноси вертикална и хоризонтална компонента вектора брзине за сваки појединачни нападни угао, затим се иницира струјање.

Након што су унесени гранични услови следећи корак је био подешавање фактора релаксације. Фактори релаксације су бројчане вредности које су везане за стабилност прорачуна у Флуенту. Погрешно одабрани параметри релаксације могу проузроковати дивергенцију решења у Флуенту. Детаљно упуство за подешавање фактора релаксације налази се у Help менију у Флуент програму. На слици 16 приказан је начин подешавања фактора релаксације.



Слика 16 - Фактори релаксације и контрола решења у Флуенту

Следећа операција је иницијализација струјања. Иницијализација струјања је обављена за атмосферски притисак на изабраној локацији $p = 101325 Pa$, и за брзину ветра $v = 12,7 m/s$. Правац

вектора брзине одређен је у односу на главни координатни систем Флуента. Након операције иницијализације струјања подешено је креирање фајлова у којима ће бити снимљени коефицијент отпора C_D и коефицијент узгона C_L . У овим фајловима могуће је пратити и конвергенцију решења. Ови подаци су од суштинског значаја за каснију анализу резултата.

Последња ствар која се обавља пре иницијализације струјања је уношење осталих референтних вредности неопходних за прорачун. Уношење тачних референтних вредности је важно за добијање логичних решења, решења чије вредности се налазе у очекиваним границама. Панел са комплетним референтним вредностима приказан је на слици 15.

Референтне вредности су од суштинског значаја за добијање информације о дејству силе и момента на модел који се опструјава. На пример панел са референтним вредностима се користи на следећи начин:

- коефицијенти силе узгона и отпора користе референтну површину, густину и брзину. Сила притиска користи вредност референтног притиска,
- коефицијент момента користи референтну дужину, површину, густину и брзину,
- Рејнолдсов број користи референтну дужину, густину и вискозност,
- коефицијенти притиска и тоталног притиска користе вредности референтног притиска, густине и брзине,
- ентропија користи вредности густине, притиска и температуре итд.

Напоследку опструјавање модела је обављено уношењем броја итерација прорачуна и активирањем команде „iterate“.

9. ПРИКАЗИВАЊЕ ГРАФИЧКИХ РЕЗУЛТАТА

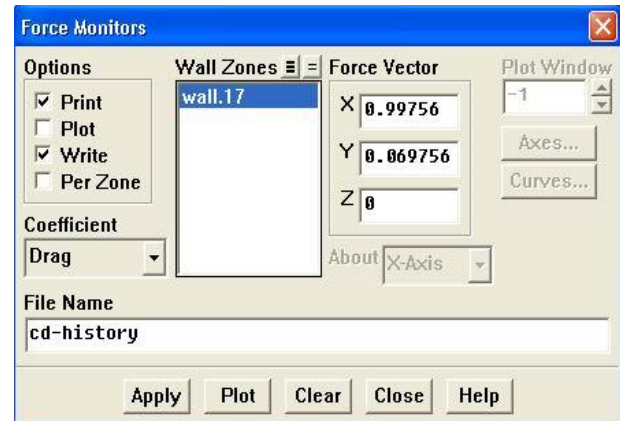
Постоје два начина приказивања резултата у Флуенту:

- графички,
- нумерички.

Нумерички резултати су бројеви добијени у прорачуну и приказани у, за то посебно креираним фајловима. Графички резултати представљају модел крила са графички представљеним вредностима притиска, температуре, вектора брзине итд. Комплетни графички и нумерички резултати приказани у овом истраживању представљају вредности за изабрану брзину ветра $V=12.7m/s$.

На крају сваке итерације произвољно одабраног солвера коефицијенти отпора, узгона и момента се снимају да би могао да се прати начин конвергенције тих вредности. Ови подаци о тзв. историји конвергенције могу да се снимају графички или да се снимају нумерички подаци. Снимљени нумерички подаци су представљени у ху фајл формату. Посматрање коефицијената момента може бити корисно када се на пример, прорачунава спољна аеродинамика произвољног модела,

посебно када се прорачунавају силе које делују на модел узгонске површине. Понекад се дешава да вредности силе отпора и узгона конвергирају пре једначина за енергију, вискозност или густину. Тада прорачун слободно може да се заустави али под условом ако се само траже резултати за коефицијенте силе узгона и отпора.



Слика 17 - Панел за креирање фајла са вредностима коефицијената отпора и узгона узгонске површине

Важно је напоменути да коефицијенти силе отпора и узгона и коефицијента момента су искључиво вредности унесене у панел са референтним вредностима које су претходно описане.

Важно је напоменути да се снимају подаци само ако је активирана опција снимања. Ако је потребно у току итерације променити било које референтне вредности, вектор силе и центар момента може доћи до дисконтинуитета у току прорачуна: неће бити узете у обзир претходне вредности. Значи ако је потребно променити неке вредности боље је да се избришу претходни подаци.

За сваки коефицијент који се селекује за посматрање потребно је подесити одговарајуће параметре у панелу „Force monitors“ приказан на слици 17. Могу се посматрати један, два или сва три коефицијента.

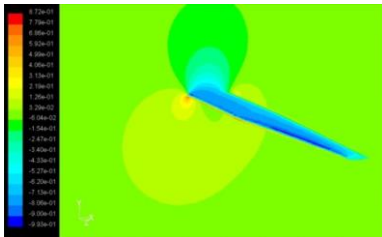
Постоје две методе за анализу и приказ добијених резултата: графички и нумерички. Уобичајено је и да се резултати снимају у екстерни фајл. Уколико се одабере да се резултати не снимају прорачун ће бити изгубљен када напустите Флуент.

Сви коефицијенти се прорачунавају за целину која је у Гамбиту већ дефинисана као „wall“. Међутим могуће је селекувати произвољне површине активирањем опције „Per zone“ у „Force monitor“ панелу.

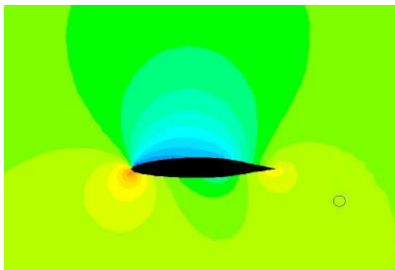
Приликом приказивања резултата у овом истраживању стављен је акценат на приказивање

коэффициент притиска јер се из тих вредности директно рачуна коефицијент отпора и коефицијент узгона.

Сви графички резултати приказују се кривим линијама (изотерме, изобаре итд.) које повезују тачке са истим вредностима. Разлике у вредностима се назначавају различитим бојама: „хладније“ боје се користе за нумерички ниже вредности док се „топлије“ боје користе за означавање нумерички виших вредности. Минималне и максималне вредности на графику одређене су минималним и максималним вредностима на целокупном домену. Вредности коефицијента притиска добијених анализом класичног модела лопатице (узгонске површине) и лопатице са винглетима приказане су на следећим сликама.



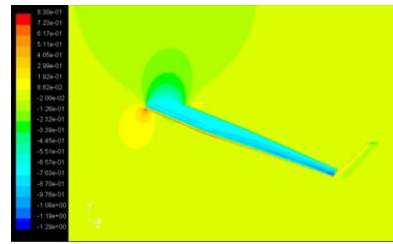
Слика 18 - Коефицијент притиска класичног модела ветрогенератора (узгонске површине) $\alpha=4^\circ, V=10,7 \text{ m/s}, H=0 \text{ m}$ очекивано хладније боје (област нижег притиска) су на горњаци, топлије боје (област вишег притиска) налазе се на доњаци.



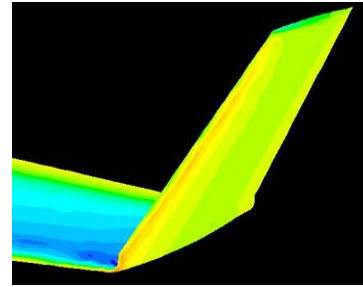
Слика 19 - Коефицијент притиска класичног модела лопатице (узгонске површине) у равни симетрије $\alpha=4^\circ, V=10,7 \text{ m/s}, H=0 \text{ m}$



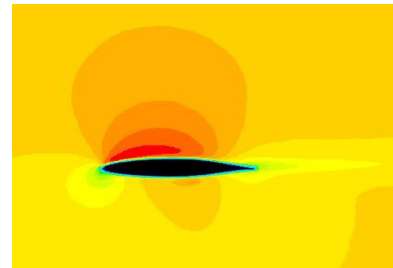
Слика 20 - Коефицијент притиска класичног крила у равни симетрије $\alpha=12^\circ, V=10,7 \text{ m/s}, H=0 \text{ m}$



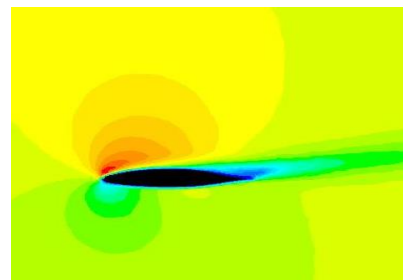
Слика 21 - Коефицијенти притиска по контури лопатице (узгонске површине) са винглетом $\alpha=4^\circ, V=10,7 \text{ m/s}, H=0 \text{ m}$



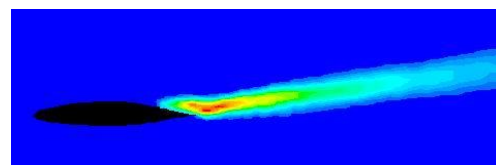
Слика 22 - Коефицијенти притиска лопатице ветрогенератора са винглетом $\alpha=4^\circ, V=10,7 \text{ m/s}, H=0 \text{ m}$



Слика 23 - Расподела брзине на аеропрофилу у равни симетрије узгонске површине при $\alpha=4^\circ, V=10,7 \text{ m/s}, H=0 \text{ m}$



Слика 24 - Расподела брзине на аеропрофилу у равни симетрије узгонске површине при $\alpha=12^\circ, V=10,7 \text{ m/s}, H=0 \text{ m}$



Слика 25 - Појава турбулентне вискозности на аеропрофилу у равни симетрије узгонске површине при $\alpha=12^\circ, V=10,7 \text{ m/s}, H=0 \text{ m}$

На претходним сликама (слике 18-22) графички су приказане вредности коефицијената притиска на класичном моделу лопатице ветрогенератора (узгонске површине) и верзији лопатице са винглетом и коефицијенти притиска на самом винглету.

Може се закључити да се добијене вредности у потпуности поклапају са основама теорије аеропрофила и узгонских површина. Нападна ивица аеропрофила трпи највеће оптерећење те је стога ту и коефицијент притиска највећи. Коефицијент притиска је већи на доњаци него на горњаци аеропрофила одакле се и генерише сила узгона. Може се уочити да се при нападном углу од $\alpha=12^\circ$ појављују „топлије“ боје него при нападном углу од $\alpha=4^\circ$ што значи да се при већим нападним угловима јављају и веће силе реакције. Ово се напомиње као доказ да Флуент даје логичне резултате.

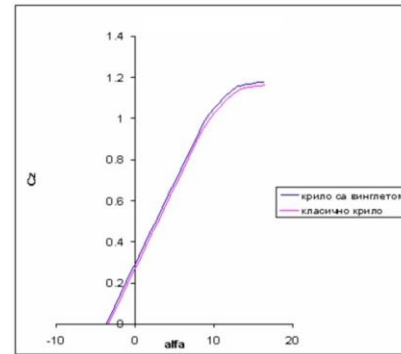
На сликама 23 и 24 приказана је расподела брзине на аеропрофилу у равни симетрије узгонске површине за два различита нападна угла: $\alpha=4^\circ$ и $\alpha=12^\circ$. Може се уочити повећање брзине на горњаци аеропрофила у односу на доњаку што је у складу са законом о одржању количине кретања који каже да ваздушне масе на више закривљеној површини аеропрофила морају да се крећу већом брзином да би „сустигле“ ваздушне масе на супротној страни аеропрофила. На слици 23 где је нападни угао $\alpha=4^\circ$ може се уочити тамно-плава боја на самој површини аеропрофила. Зона обојена том бојом представља почетак граничног слоја. Да би се детаљније приказао гранични слој потребно би било креирати посебно структурирану мрежу у Гамбиту. Таква мрежа морала би имати велику резолуцију пошто је сама симулација граничног слоја доста сложено са постојећим рачунарским ресурсима. Опет напомињем да је за такве специјалне мреже (тзв. опција „boundary layers“ у Гамбиту) потребан рачунар снажнији него што је тренутно био доступан. На слици 24 приказана је расподела брзина око аеропрофила у равни симетрије узгонске површине са нападним углом од $\alpha=12^\circ$. На слици се јасно може уочити почетак одвајања струјница када се гледа према излазној ивици аеропрофила.

На слици 25 приказана је појава турбулентне вискозности на аеропрофилу у равни симетрије узгонске површине. Турбулентна вискозност се користи за различите анализе у аеродинамици, Флуент још нуди могућност приказивања различитих физичких величина: притиска, густине, топлотног флукса итд.

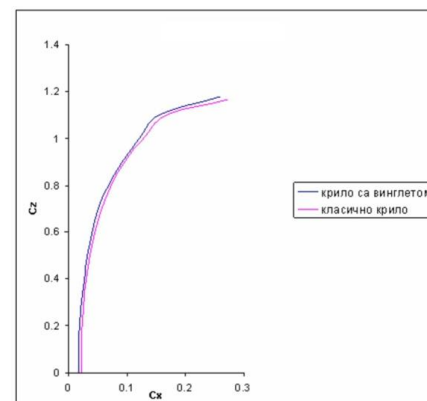
Ипак графичко приказивање резултата за ову анализу није суштинско, много значајније су

нумеричке вредности које ће даље бити приказане. Графичко приказивање резултата у Флуенту се више користи код анализе дизајна сложенијих геометријских тела.

На следећим дијаграмима и табелама приказане су нумеричке вредности аеродинамичких коефицијената узгона и отпора узгонских површина, лопатице ветрогенератора без и са винглетом.



Слика 26 - Крива узгона узгонске површине са и без винглета



Слика 27 - Полара узгонске површине са и без винглета

Табела 3. Аеродинамичке карактеристике узгонске површине након завршеног прорачуна у Флуенту: верзија са винглетом и без винглета

Лопатица са винглетом			Лопатица без винглета		
C_z	α	C_x	C_z	α	C_x
0	-3.6821	0.0175	0	-3.4119	0.022
0.1	-2.4222	0.0175	0.1	-2.152	0.021705
0.2	-1.1622	0.0195	0.2	-0.892	0.022897
0.3	0.0977	0.0225	0.3	0.3679	0.02587
0.4	1.3576	0.027	0.4	1.6278	0.030572
0.5	2.6175	0.0324	0.5	2.8878	0.036627
0.6	3.8775	0.0409	0.6	4.1477	0.04472
0.7	5.1374	0.0514	0.7	5.4076	0.0565
0.8	6.3973	0.0687	0.8	6.6675	0.073462
0.8945	7.6572	0.0899	0.9	7.9275	0.096593
1	9.0397	0.121366	1	9.4462	0.127753
1.1	11.1045	0.1559	1.1	11.7481	0.168754
1.17942	16.3199	0.260668	1.16384	16.5464	0.272852

Са приказаним нумеричким вредностима завршава се поређење узгонске површине са винглетом и без винглета. Може се закључити да верзија лопатице са винглетом даје боље аеродинамичке карактеристике. Верзија узгонске површине са винглетом има бољу аеродинамичку ефикасност те стога може остварити већи енергетски учинак од чак 7%. Истина је и да при истом нападном углу узгонска површина са винглетом даје и већи отпор због веће површине опструјавања али је та предност занемарљива у односу на величину индукованог отпора. Повећање узгона је вишеструко веће него повећање отпора па се стога треба одредити за верзију лопатице ветрогенератора са винглетом.

Да би се још више поправили резултати прорачуна у Флуенту и њихова тачност, било би потребно извршити више симулација опструјавања са мрежом знатно веће резолуције и са другачије подешеним релаксационим факторима. Најбоље би било дизајнирати комплетно коло ветрогенератора са мрежом величине отприлике пет милиона елемената, али опет напомињемо да је за тако обиман посао потребна озбиљна лабораторија за паралелно процесирање. Међутим и овако добијени резултати су одлични за прелиминарну анализу предности и мана уграђивања винглета на узгонским површинама какво је коло ветрогенератора.

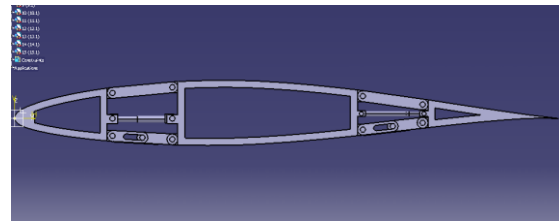
10. RAZVOJ NOVIH OPTIMALNIH ADAPTRONIČKIH AEROPROFILA

Развој и примена адаптоничких система у технологији израде ветрогенератора није нова, јер ако га је могуће применити на крилу летелице онда је сасвим нормано то учинити и на елиси хеликоптера или ветрогенератора. Она се сама по себи намеће после свих предности адаптоничких система које смо видели из анализе и искустава у примени адаптоничких конструкција које су обрађене у овом истраживању али и у референцама које истражују случајеве реалних летелица [19-20].

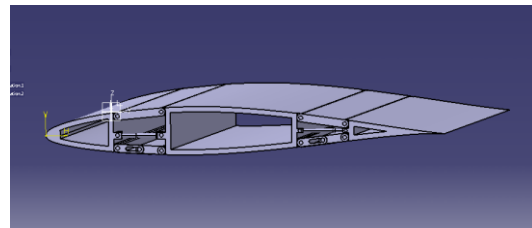
Основни циљ ових истраживања је био да се уз помоћ овог система може користити енергија ветра при врло малим брзинама струјања од око 2 m/s. За адаптонички модел при пројектовању коришћена су искуства која су се стекла након истраживања на овом пројекту, као и искуства која су добијена анализом и пројектовањем ветрогенератора типа директдрајв Енегсон Е-82 снаге 2 MW, са три крака лопатица, свака пречника 41 m.

Аеропрофил који је усвојен у овој фази развоја а на основу искуства која су се стекла у прве две године ових истраживања је аеропрофил НАСА 63(2)615. Пратећи основни смисао адаптоничких

система да прилагођавају свој облик и структуру тренутним спољашњим условима, идеја је била да се кинематски апроксимира еластична промена облика аеропрофила. Ово је на садашњем нивоу развоја могуће урадити тек када би се аеропрофил поделио на више крутих сегмената, који би кретањем и међусобно зависним положајима прилагодили лопатицу потребним условима оптималног струјања за дате услове, чиме би се обезбедио максимални енергетски учинак ветрогенератора, а у коначном циљу и комплетне фарме за одређену орографију терена.

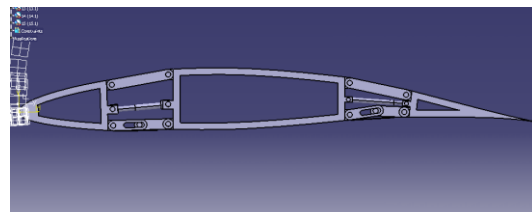


Слика 28 - Подела адаптоничког аеропрофила на сегменте

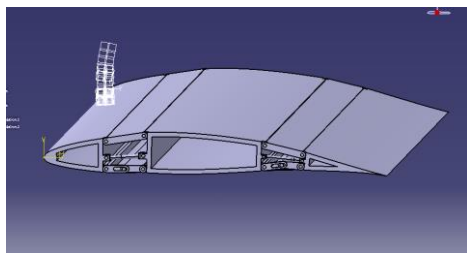


Слика 29 - Сегмент адаптоничке узгонске површине (лопатице ветрогенератора)

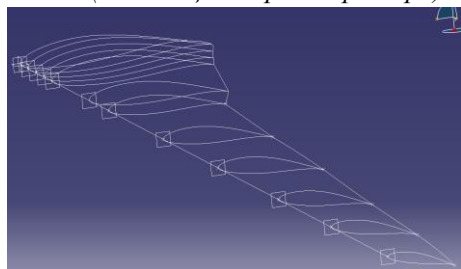
Пројектовање овако захтевног облика адаптоничког аеропрофила и комплетне узгонске површине захтевало је задовољење многих компромиса и по конструкцији и технологији израде, а пре свега провере могуће функционалности. Најбоље решење које је захтевало еластично деформисање оплате аеропрофила и комплетне узгонске површине лопатице ветрогенератора ипак није било могуће симулирати услед, још увек, ограничености програмског пакета Катиа да подржи све опције које би омогућиле овакву симулацију. Због тога смо се одлучили за сегментно померљиве и подесиве деонице аеропрофила и узгонске површине које су нам дале најбоље решење у датом Катиа софтверском окружењу (види слике 28-31).



Слика 30 - Промена облика адаптоничке узгонске површине (лопатице ветрогенератора)

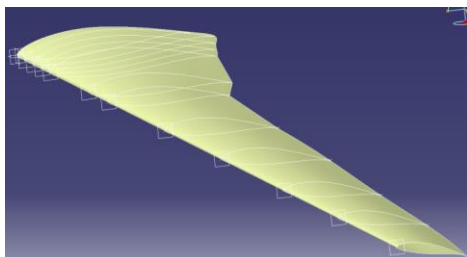


Слика 31 - Сегмент адаптроничке узгонске површине (лопатице ветрогенератора)

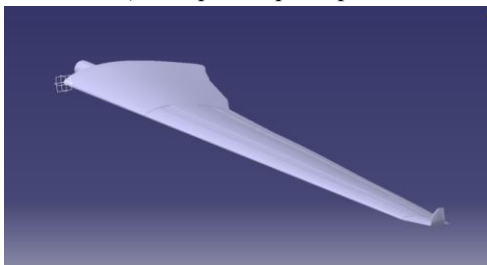


Слика 32 - Цртање аеропрофила у карактеристичним пресецима при формирању адаптроничке узгонске површине (лопатице ветрогенератора)

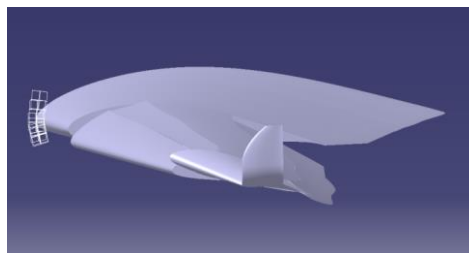
За овако формиран сегмент узгонске површине са аеропрофилом $NACA\ 63(2)615$ смо најпре симулацијом у програмском пакету Катиа проверили адаптроничку контролу промене кривине аеропрофила и њен утицај на аеродинамичку ефикасност овако формиране узгонске површине. Свакако, ово је само прво приближење коначном циљу, а то је узгонска површина са могућношћу потпуне адаптроничке контроле учинка узгонске површине и при ниском енергетском потенцијалу ветра.



Слика 33 - Креирање контролне узгонске површине лопатице ветрогенератора



Слика 34 - Креирање комплетне адаптроничке узгонске површине лопатице ветрогенератора



Слика 35 - Адаптроничка узгонска површина лопатице ветрогенератора

Следећи корак је био формирање тродимензионе конфигурације узгонске површине, који је приказан сликама 32 и 33. За изабрани аеропрофил $NACA\ 63(2)615$ и оптимизирани геометријски облик лопатице ветрогенератора при чему се морала пратити потребна геометријска и аеродинамичка витопереност дуж лопатице, почевши од осе обртања до краја лопатице (винглета) за оптималан рад да би био формиран скелет (штрак) узгонске површине адаптроничке лопатице ветрогенератора (слике 32 и 33).

На крају у програмском пакету Катиа дизајниран је коначан облик адаптроничке лопатице ветрогенератора за коју је детаљно проучена комплетна кинематика свих покретних делова који контролишу промену њеног облика у функцији промене режима рада, тј. укупног нивоа расположивог енергетског потенцијала ветра (слике 34 и 35).



(а) (б)

Слика 36 - (а) Ветрогенератор са директним погоном од 2 MW са адаптроничким лопатицама, (б) Фарма ветроелектрана са адаптронским лопатицама са директним погоном од 2 MW.

И коначно, на слици 36 (а) приказана је Ветрогенератор са директним погоном од 2 MW са подешљивим адаптроничким лопатицама, и (б) одговарајућа оптимизирана фарма која је састављена од подешљивих ветрогенераторских кола високог учинка на изабраној локацији.

11. ЗАКЉУЧАК

Нема сумње да ће у будућности сложени технички системи, какво је ваздухопловство,

ветрогенераторски системи и други све више инспирацију тражити у адаптроничким системима који су најближи природним биолошким системима. Предности које ови системи имају над класичним конвенционалним системима је доказана испитивањима чији су неки резултати презентовани у овом пројекту и у литератури [6-9]. Садашња испитивања дају велика оптимистичка ишчекивања примене ових система у енергетици и општем инжењерству.

Настанак и даља испитивања адаптроничних система су омогућена пре свега развојем електронике и нових технологија, односно појаве нових материјала. Адаптронички системи су у правом смислу „линк“ између материјала и структуре и њених потреба. Помоћу њих се структура прилагођава тренутним захтевима. Они се могу убацивати у композитне материјале и њиховом активацијом (зависно од типа легуре) долази до промене облика структуре.

Адаптронички системи побољшавају перформансе, смањују буку, вибрације и тежину, поједностављују системе и све се више приближавају тј. личе на своје угледе, тј. савршенство биолошких творевина, јер не треба заборавити да је за њихову еволуцију природа утрошила милионе година.

Ови системи су само једна еволуцијска степенница више, која треба да донесе нову револуцију у свим гранама технике.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] B. Rašuo, A. Bengin, Optimization of Wind Farm Layout, *FME Transactions*, Vol. 38 No 3, 2010, pp 107-114
- [2] B. Rašuo, A. Bengin, A. Veg, On Aerodynamic Optimization of Wind Farm Layout, *PAMM*, Vol. 10, Issue 1, 2010, pp. 539–540, doi: 10.1002/pamm.-201010262
- [3] B. Rašuo, M. Dinulović, A. Veg, A. Grbović, A. Bengin, Harmonization of new wind turbine rotor blades development process: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 39, November 2014, pp. 874-882, doi: 10.1016/j.rser.-2014.07.137
- [4] Rašuo B. P, Bengin A. Č, Dinulović M. R, Multi-criteria aerodynamic optimization of wind farm energy efficiency based on genetic algorithms, *Tehnika*, vol. 78, iss. 6, pp. 681-696, 2023, doi: 10.5937/-tehnika2306681R
- [5] Hau E. Wind turbines-fundamentals, technologies, applications, *Economics*, 2nd. ed. Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag; 2006.
- [6] Adaptronics and smart structures, basics, materials, design and applications, second, revised edition. In: Janocha H, editor. Berlin: Springer-Verlag; 2007.
- [7] Adaptive structures, engineering applications. In: Wagg D, Bond I, Weaver P, Friswell M, editors. London: John Wiley & Sons Ltd; 2007.
- [8] Stephen Daynes, Weaver Paul M. *A morphing trailing edge device for a wind turbine*. *J Intell Mater Syst Struct* 2012;23(6):691–701.
- [9] Lachenal Xavier, Daynes Stephen, Weaver Paul M. Review of morphing concepts and materials for wind turbine blade applications. *Wind Energy* 2013; 16(2):283–307.
- [10] Bertagnolio F, et al. *Wind Turbine Airfoil Catalogue*, RISØ-R-1280 (EN). Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark 2001.
- [11] Parezanović, V, Rašuo, B, Adzić, M, *Design of Airfoils for Wind Turbine Blades*, French-Serbian European Summer University: Renewable Energy Sources and Environment-Multidisciplinary Aspect, 17th-24th October, 2006, Vrnjačka Banja, Serbia. (European Summer University is jointly organized by: Vinča Institute of Nuclear Sciences, French Academy of Sciences, University Pierre and Marie Curie Paris VI, Euroscience-section for Serbia). (strane 1-6)
- [12] Rašuo, B, Parezanović, V, Adzić, M, Innovative Design Approaches for Airfoils of Wind Turbine Blades, *1st International Congress of Serbian Society of Mechanics*, 10-13th April, 2007, Kopaonik, (strane 519-525).
- [13] Rašuo, B, Parezanović, V, Adzić, M, On Aircraft Performance Improvement by Using Winglets, *26th ICAS congress*, 14 - 19 September, 2008, Anchorage, Alaska, USA, ISBN 0-9533991-9-2, (CD-Rom).
- [14] Spalart, P. R, Allmaras, S. R, A one equation turbulence model for aerodynamic flows, *AIAA Paper* 92-0439, 1992.
- [15] Spalart, P. R, Allmaras, S. R, A one equation turbulence model for aerodynamic flows, in: *La Recherche Aéropatiale*, 1994, No 1, pp. 5–21
- [16] Spalart, P. R. Detached-eddy simulation. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 41 (1): 181–202. 41.181S. 2009, doi: 10.1146/annurev.fluid. 010908.165130.
- [17] Sagaut, Pierre, *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows* (Third ed.), Springer. ISBN 978-3-540-26344-9, 2006.
- [18] M. Lesieur, O. Métais, P. Comte, *Large-Eddy Simulations of Turbulence*, Cambridge University Press, July 2010, Online ISBN: 9780511755507, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511755507>.

- [19] N. N Gavrilović, B. P Rašuo, G. S Dulikravich, V. B Parezanović, Commercial aircraft performance improvement using winglets, *FME Transactions*, 43 (1), 1-8, 2015, doi:10.5937/fmet1501001G
- [20] Nikola Gavrilović, Rašuo, B, Parezanović, V, Dulikravich, G, Moschetta, J. M, Overall Contribution of Wingtip Devices to Improving Aircraft Performance, in book: *Sustainable Aviation Technology and Operations: Research and Innovation Perspectives*, 2023, pp. 325–342, Wiley, doi: 10.1002/9781118932599.ch12

SUMMARY

DEVELOPMENT OF NEW OPTIMAL ADAPTTRONIC AIRFOILS, USING MODERN ENGINEERING SOFTWARE PACKAGES

In this paper, the possibilities of using modern adaptive adapttronic structures in the blades of wind turbine systems were analyzed in order to increase the utilization of the energy potential of the wind at the selected location of a potential farm of wind generators with a power of 2 MW each. This was achieved by using adaptive modern adapttronic airfoils that provided permanent wind shear and adjustment of local airfoil shapes along the wind turbine blade ensuring maximum energy performance of the entire turbine within the wind turbine farm as a whole.

Key Words: *energy efficiency, adapttronic airfoil. modern software packages*