

Садржај

Увод.....	2
1. ПОЈАМ ДЕПОНИЈЕ И ДЕПОНИЈСКОГ ГАСА.....	3
1.1. Појам депоније	3
1.2 Појам депонијског гаса.....	6
1.3. Процес настајања депонијског гаса	6
1.4 Састав депонијског гаса	7
2. КОГЕНЕРАЦИЈА.....	9
2.1 Појам когенерације	9
2.2 Когенеративни модул	9
2.3 Процеси пречишћавање гаса за потребе когенерације.....	10
2.3.1 Пречишћавање биогаса	10
2.3.1.2 Десумппоризација.....	10
2.3.1.3 Сушење	11
2.3.1.4 Уклањање CO ₂	11
2.3.2 Принцип функционисања когенерације	11
2.4 Мотори у процесу когенерације	12
2.4.1 Гасни Otto мотори.....	12
2.4.2 Дизел мотори са иницијланим паљењем	12
2.4.3 Стирлинг мотори.....	12
2.4.4 Микротурбине	13
2.4.5 Гориве ћелије.....	14
3. ТЕХНОЛОГИЈА САКУПЉАЊА ДЕПОНИЈСКОГ ГАСА	15
3.1 Екстракција (сакупљање депонијског гаса)	15
3.1.1 Хоризонтални канали (ровови).....	15
3.1.2 Вертикални бунари (бушотине).....	17
3.1.3 Мрежа за прикупљање депонијског гаса	18
3.1.4 Вентилатори за екстракцији депонијског гаса	20
3.2 Систем (модул) за процесирање гаса	21
3.3 Систем за конверзију гаса	22
4. ПРОЈЕКТОВАЊЕ ЦЕНТРИФУГАЛНОГ ВЕНТИЛАТОРА.....	24
4.1 Центрифугални вентилатори	24
4.2 Пројектовање геометрије центрифугалног вентилатора у програмском пакету CFturbo.....	26
4.2.1 Пројектовање геометрије радног кола центрифугалног вентилатора	26
4.2.2 Пројектовање геомтерије спиралног кућишта центрифугалног вентилатора.....	37
5. НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА ЦЕНТРИФУГАЛНОГ ВЕНТИЛАТОРА	43
5.1 Нумеричка анализа	43
5.2 Анализа вентилатора у програмском пакету Ansys.....	44
5.2.1 Пројектовање виртуленог CAD модела радног кола и спирале.....	44
5.2.2 Генерисање прорачунске мреже.....	49
5.2.3 Нумеричка симулација	53
Закључак	75

Увод

У индустријским земљама настаје 300-400kg смећа годишње по особи. Ово смеће се скупља и одлаже на безбедним санитарним депонијама, које подразумевају заштиту подземних вода, заштиту ваздуха од прљавог и опасног депонијског гаса и постављање покроба преко складиштеног отпада. Поменути депонијски гас настаје разградњом органских супстанци под утицајем микроорганизама у анаеробним условима. У средишту депоније настаје надпритисак, па депонијски гас прелази у околину. Просечан састав депонијског гаса је 45-60% метана, 25-45% угљен-диоксида и у мањим количинама се могу наћи угљен-моноксид, азот, водоник-сулфид, флуор, хлор, ароматични угљоводоници и други гасови у траговима.

Имајући у виду значај енергетских и еколошких проблема који су наша реалност и велики изазов који се поставља пред инжењере XXI века, основни задатак на свим несанитарним депонијама је пројектовање постројења за отплињавање и третман депонијског гаса процесом когенерације. Когенерација је поступак истовремене производње електричне и тополотне енергије. Концепт отплињавања подразумева постављање вертикалних и хоризонталних перфорираних цеви у тело депоније (бунари, трнови, сонде) и њихово хоризонтално повезивање. Преко система вентилатора депонијски гас се исисава, сабија, суши и усмерава ка гасном мотору. Из сигурносних разлога препоручује се уградња високотемпературне бакље, која преузима вишкове произведеног гаса.

Систем вентилатора се састоји од компоненти које се користе за генерисање и примену вакуума ради екстракције депонијског гаса. Тип вентилатора који се најчешће користи у овом процесу је центрифугални вентилатор. Центрифугални вентилатори претварају механичку енергију вратила у струјну енергију радног флуида посредством центрифугалне силе. Центрифугални вентилатори могу бити једностепени или вишестепени, тј. да имају више радних кола. Углавном се у процесу отплињавања депониског гаса користе једностепени центрифугални вентилатори због своје повољне цене и минималне потребе за одржавањем. Саставни делови овог типа вентилатора су: усисно грло, радно коло и спирлано кућиште.

Полазни подаци за пројектовање центрифугалног вентилатора су проток, промена притиска и број обртаја. Пошто је вредност протока депонијског гаса на депонији променљива, усваја се просечна годишња вредност. Промена притиска је усвојена из литературе, док су бројеви обртаја усвојени на основу прорачуна у програмском пакету за пројектовање геометрије вентилатора.

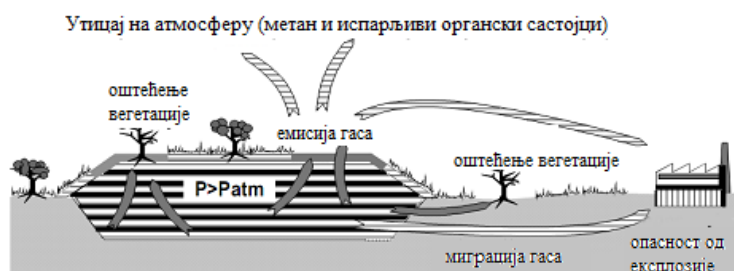
1. ПОЈАМ ДЕПОНИЈЕ И ДЕПОНИЈСКОГ ГАСА

1.1. Појам депоније

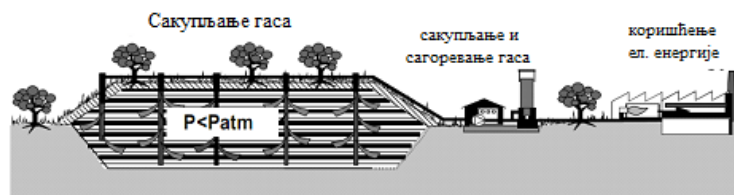
Депонија представља место - локалитет, за одлагање отпадних материјала. На депонији некада може да се врши селекција и рециклажа отпада. Обично се у данашње време врши подела депонија према типу отпада који се на њима одлаже. Депоније могу бити савремено инжењерски осмишљене и припремљене тако да се искоришћавају течни продукти или гас путем распадања органског отпада. Савремене депоније генерално морају имати минимално један покривни слој, који се састоји од набијене глине са минималном потребном дебљином за максималну хидрауличну препреку. Депоније углавном граде локалне самоуправе. Од скоро, на депонијама постоје машине за сабијање отпада да би уштеделе простор. Када се депонија испуни отпадом често се затрпава слојем земље.

Смеће на гомили, бачено неконтролисано у околину има низ негативних утицаја, а најважнији од њих су:

- процедурна вода која слободно цурећи у подземље и површински преко површине земље загађује површинске и подземне воде тог земљишта,
- слободно емитовање биогаса у ваздух који садржи гасове стаклене баште „greenhouse”, а уз то је запаљив и експлозиван,
- слободан контакт са смећем животиња и људи може бити узрок инфективних болести.



Слика 1.1 Емитовање депонијског гаса и непријатног мириса



Слика 1.2 Сакупљање и коришћење депонијског гаса

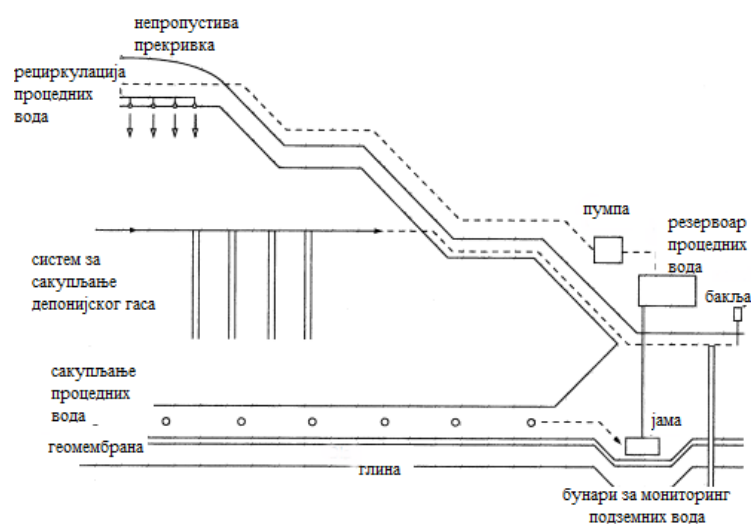
Санитарна депонија је пре свега инжењерски објекат, што значи да је то објекат који се пројектује и гради наменски да спречи и под контролу стави све горе наведене утицаје на околину. Изградња санитарне депоније се врши:

1. правилним одабиром локације – да је подлога на којој се гради непропусна и стабилна,
2. полагањем непропусне геофолије по дну депоније која спречава цурење процедурних вода у подземље,
- 3.



Слика 1.3 Полагање фолије

4. полагањем перфорираних цеви (цеви са малим прорезима) на фолију како би се прикупиле процедне воде и одвеле изван тела депоније,
5. изградњом постројења за пречишћавање процедне воде, тако да се она може пречистити и испустити у околину без последица по живи свет или распрскивати по депонији (ради испаравања воде),
6. практиковањем посебног начина одлагања смећа у ћелијама (што се може замислити као пчелињи сач) где се након сваког радног дана смеће након одлагања разгрће, компактира и затрпава слојем земље да се спречи разношење смећа,



Слика 1.4 Пресек депоније са ситемима за сакупљање гаса и процедне воде

7. бушењем вертикалних бунара у телу депоније у које се постављају перфориране цеви како би се у њих прикупио депонијски гас и извео из тела депоније,

8. увезивањем тих бунара и повезивањем на бакљу ради спаљивања гаса, или на генератор за производњу електричне енергије, јер биогаз има одређену калоричну вредност ако се метан нађе у количинама преко 45%,
9. редовним праћењем стања околине уградњом разних сензора и метеоролошке станице на депонији,
10. организованим вођењем депоније, где се улазно смеће мери, камиони дезинфикују при излазу са депоније, редовно прате и анализирају параметри везани за одлагање смећа и расположиви простор,
11. оградњом у циљу онемогућавања приступ неовлаштеним лицима,
12. изградњом пратећих садржаја као што су кафилерија, погон за одвајање и рециклажу отпада итд(који нису неопходни),
13. затварањем и прекривањем депоније по завршетку одлагања, непропусном фолијом и затрављивањем,
14. рекултивацијом по завршетку рада депоније (засађују се трава и биљке и та површина се може користити као парк или место за рекреацију).



Слика 1.5 Затварање депоније

1.2 Појам депонијског гаса

Депонијски гас, је смеша метана и угљен-диоксида, који представљају „greenhouse” гасове (GHG), односно гасове који утичу на појачање ефекта „стаклене баште” и њихова неконтролисана емисија доприноси глобалном атмосферском загревању. У исто време, депонијски гас поседује енергетску вредност, што га чини потенцијалним горивом за погон гасних мотора и добијања електричне и топлотне енергије тим путем, односно стварања могуће замене за фосилна горива [2].

1.3. Процес настајања депонијског гаса

Разлагање комуналног отпада, на месту депоновања, може се посматрати кроз:

- физичку деградацију (трансформација комуналног отпада, који са собом повлачи и промену физичких карактеристика самог отпада, смањење запремине)
- хемијску деградацију (низ реакција различитих супстанци, које сачињавају отпад, квалитет процедурних вода, тј. Ph вредности.)
- биолошку деградацију (трансформација материја под дејством микроорганизама).

Највећи део депонијског гаса се формира под дејством биолошког разлагања, помоћу бактерија, које су саме по својој природи присутне на депонији, као и оне које су по својој природи присутне у земљишту, на којем се налази депонија. Комунални отпад у већем делу чини отпад органског порекла. Бактерије врше разградњу тог отпада. Депонијски гас се може производити и када одређене врсте отпада промене стање из течног у гасовито или чврсто.

На процес формирања депонијског гаса утичу бројни фактори: карактер отпада, кисеоник у депонији, садржај влаге, температура и време када је отпад депонован.

Карактер отпада. Бактеријским активностима генерише се депонијски гас, раст количина генерисаног гаса је повезан са процентом органског отпада у депонији. Са повећањем процента органског отпада повећава се и количина генерисаног гаса. Одређене врсте органског отпада садрже велике количине хранљивих састојака за бактерије, натријум, калијум, калцијум и магнезијум, што проузрокује већу активност бактерија, а самим и тим и већу количину генерисаног гаса. Одређене врсте отпада садрже једињења која негативно утичу на активност бактерија, узрокујући смањење генерисања гаса. У случају бактерија које производе метан штетно дејство представља присуство соли у високим концентрацијама.

Кисеоник у депонији. Продукција метана почиње када се сав кисеоник потроши. Што је више кисеоника у депонији, то аеробне бактерије дуже разлажу отпад. Ако је отпад само делимично прекривен слојем земље или се фреквентно меша, биће присутно више кисеоника, тако да ће аеробне бактерије живети дуже и дужи период ће производити угљен-диоксид и воду. Ако је отпад компактан, производња метана ће почети раније, односно чим анаеробне бактерије замене аеробне бактерије. Анаеробне бактерије почињу производњу тек када аеробне бактерије потроше кисеоник, тако да би било какво присуство кисеоника у депонији довело до успорења

продукције метана. Промене атмосферског притиска могу такође да утичу да се кисеоник из околине нађе у депонији. Та могућност постоји код слојева на мањим дубинама у којима би тада дошло до аеробне фазе разградње отпада.

Влажност. Присуство одређене количине воде у депонији повећава продукцију гаса, јер влага подстиче развој бактерија и транспорт хранљивих састојака до свих делова депоније. Садржај воде од 40% и више, доводи до максималне продукције гаса. Компактност отпада утиче на смањење продукције гаса јер је повећана густина депоније и смањена инфилтрација воде у све слојеве отпада. Производња гаса је већа у случају јаких падавина и ако су присутни пропусни покровни слојеви који омогућавају довод додатних количина воде у депонију.

Температура. Температура повећава бактеријску активност, што директно има за последицу повећање продукције гаса. Са друге стране, ниске температуре инхибирају бактеријску активност, тако да она драстично пада уколико је температура испод 10°C. Временске промене имају значајан утицај на плитке депоније. Ово је последица тога што бактерије нису изоловане у односу на температурне промене, као што је то случај са дубоким депонијама где дебели слојеви земљишта покривају отпад.

У покривеној депонији се одржава стабилна температура, што доводи до повећања продукције гаса. Бактеријска активност ослобађа топлоту, стабилишући температуру депоније између 25 и 45°C, ипак у неким депонијама је регистрована појава температуре и до 70° C. Више температуре стварају повољне услове за волатилизацију и хемијске реакције. Као опште правило се може узети да се емисије НМОС (угљоводоника неметанског типа) удвоструче на сваких 18° C.

Старост отпада. Отпад који је касније депонован ће генерисати више гаса од оног који је на депонији дуже време. Депоније обично генеришу значајне количине гаса између једне и три године. Максимуми генерисања гаса су у периоду од пет до седам година, након што је отпад одложен на депонију. Након 20 година по депоновању, генерисања депонијског гаса је минимално и у траговима, док се мање количине гаса могу генерисати и после педесет година. Различити делови депоније могу бити у различитим фазама декомпозиције отпада, што зависи од старости отпада.

1.4 Састав депонијског гаса

Гас који настаје у телу депоније, познат као депонијски гас, представља смешу 50% метана и 40% угљен-диоксида, (5-10)% азота, кисеоника и других елемената, али у траговима. Метан је запаљив гас, који формира експлозивну смешу, када је присутан у концентрацији између 5 и 15 процента запремине ваздуха. Запаљивост метана је и предност и одговорност за власника депоније. Предност је када гас постаје извор енергије а одговорност је због ризичних услова изазваних подземном миграцијом депонијског гаса.

Депонијски гас се може употребити и као гориво. Топлотна моћ му је обично око (4-6) kWh/m³, што представља приближно половину топлотне моћи природног гаса.

Постоји неколико различитих литературних извора састава депонијског гаса, али се они разликују незнатно, и приказани су у табели 1.5.

Табела 1.5 Састав депонијског гаса

<i>Компоненте</i>	<i>%</i>	<i>Карактеристике</i>
Метан	45-60	Метан је гас без боје и мириса. Депоније су највећи извори емисије метана које је проузроковао човек.
Угљен диоксид	25-45	CO ₂ се у амтосфери налази у малим концентрацијама (0,02 %) Безбојан је, без мириса и мало кисео.
Азот	2-5	Азот репрезентује 79% атмосфере. Безбојан је без мириса и укуса.
Кисеоник	0,1-1	Кисеоник репрезентује 21% атмосфере. Без укуса, боје и мирас је.
Амонијак	0,1-1	Амонијак је безбојан гас са оштрим мирисом.
Неметанска органска једињења (NМОС)	0,01-0,6	NМОС-и су органска једињења. Налазе се у природи или се могу вештачки синтетизовати. Најчешће присутна на депонији су акрило-нитрити, етил-бензен, хексан, метил-етил-кетон, тетра-хлор-етилен, винил-холриди и ксилен.
Сулфиди	0-1	Сулфиди, (водоник сулфид, диметил сулфид, меркаптани) су гасови приустни у природи који депонији дају непријатан мирис покварених јаја.
Водоник	0-0,2	Водоник је гас без мириса и боје.
Угљен моноксид	0-0,2	Угљен моноксид је гас без мириса укуса и боје, гас који је изузетно токсичан.

Приближни еквиваленти депонијског гаса са осталим уобичајеним горивима су дати у табели 1.6:

Табела 1.6 Еквиваленти депонијског гаса (са садржајем метана од 50%)

Гориво	Еквиваленти (на 10.000 l депонијског гаса)
Природни гас	6.766 l
Пропан	7,35 l
Бутан	6,55 l
Бензин	39 l
Лож уље	36 l
Бутуменозни угаљ	6 kg
Средње суво дрво	13 kg

2. КОГЕНЕРАЦИЈА

2.1 Појам когенерације

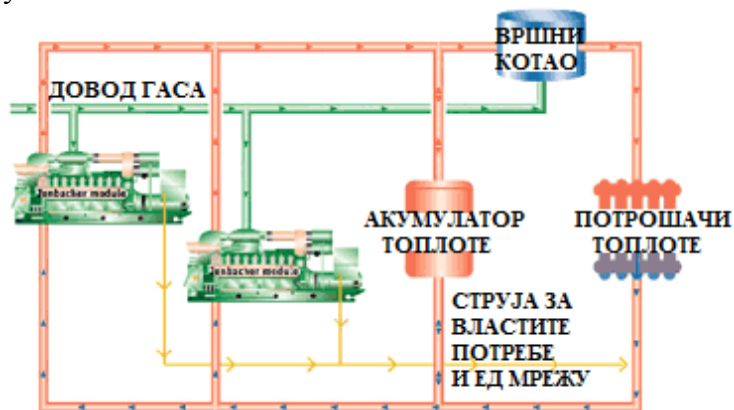
Когенерација је поступак за истовремену производњу електричне и топлотне енергије. Когенерација није карактеристична само за велике системе, термоелектране, већ се може применити у малим и средњим предузећима и домаћинствима.

Микрокогенерацијски уређаји се базирају на плимском мотору са воденим хлађењем, и производе 5kW електричне енергије. Прикључивањем на систем топле воде, укључујући и грејање, могуће је искористити још 13kW топлотне енергије за грејање воде и простора. Уштеда енергије на овај начин је од 20-40%, а самим тим се скраћује период отплате инвестиција.

Когенерација користи отпадну топлоту, која настаје приликом процеса добијања електричне енергије, чиме се спречава њено испуштање у атмосферу. Приликом конвенционалних начина добијања електричне енергије губи се око две трећине енергетског инпута, а когенерацијом се може искористити, већина те бачене енергије. На тај начин се остварује боља искоришћеност горива и остарује енергетска уштеда од 20-40%[1].

2.2 Когенеративни модул

Представља енергетску јединицу, која истовремено производи електричну и топлотну енергију.



Слика 2.1 Принципска шема постројења за когенерацију

Састоји се од следећих делова:

- Гасни Otto мотор са унутрашњим сагоревањем
- Генератор наизменичне струје
- Измењивач топлоте за расхладну воду мотора, уља за подмазивање гасне смеше и издувних гасова
- Разводни, управљачи и енергетски ормани са аутоматиком, за синхронизацију и паралелан рад са нисконапонском електричном мрежом.

За грејање пословних објеката и технолошке потребе, користи се топлота, која се добија хлађењем мотора, уља за подмазивање, гасне смеше и издувних гасова. Ова топлота се одводи секундарним кругом воде 90/70°C. Осим ових постоје и други температурни нивои према конкретним потребама, као што су: производња паре, топлог ваздуха или расхладне енергије преко апсорпционих расхладних машина.

Ниско напонској мрежи (0,4 kV), предаје се произведена електрична енергија, за напајање властитих потрошача, чиме се повећава инсталисана снага објекта уз постојећу трафо станицу.

Когенеративни модули обезбеђују:

- сигуран напон и фреквенцију
- напајање струјом у доба више тарифе
- напајање у случају нестанка ЕД мреже

Целокупна количина произведене струје може се предавати-продавати, електродистрибутивној мрежи по повлашћеној цени и куповати потребне количине струје по стандардној цени.

2.3 Процеси пречишћавање гаса за потребе когенерације

2.3.1 Пречишћавање биогаза

За било коју примену, неопходно је да се биогаз пречисти, да се уклоне непожељни састојци, који имају негативан утицај на животну средину, или штетни састојци, који оштећују биогаз постројења.

Било би пожељно да се производе биогаз са што већим уделом метана, јер је он једини гориви састојак, значајног запреминског удела (50-70%).

Са енергетског и економског аспекта квалитет биогаза утиче на висину трошкова, а потребан квалитет зависи од технологије за енергетску примену.

2.3.1.2 Десумппоризација

Одлучујући параметри за поступак десумппоризације су састав и проток биогаза који се пречишћава. Поступци десумппоризације се деле на:

- биолошке (у ферментор се удувава одређена количина амбијенталног ваздуха, 3-5%
- запремине биогаза,
- хемијске (у ферментор се додаје супстанца хлорида гвожђа)
- физичке

Од наведених поступака, најчешће се користи биолошка и хемијска десумппоризација.

2.3.1.3 Сушење

Најједноставнији начин уклањања водене паре из биогаса је његовим хлађењем или регулациом притиска. Тиме се спречава оштећење делова постројења, јер је онемогућено замрзавање воде у инсталацијама и корозија.

Потребно је располагати довољно дугачком трасом гасовода, како би имало довољно времена да се биогас охлади. Цев улази у земљу, која је лети довољно хладна, да осигура кондензацију, а зими је изнад нуле, чиме се спречава замрзавање. Кондензација се одвија, у најнижој тачки, у којој се поставља и одвајач кондензата. Он мора повремено да се празни. Са кондензатом се одвајају и још неке непожељне супстанце, аеросоли и растворени гасови. У појединим постојењима сушење се обавља применом електричног хладњака на температури испод 10°C, постиже се значајнија ефикасност одвајања влаге.

2.3.1.4 Уклањање CO₂

Примењује се код технологија, код којих је битно да се повећа топлотна моћ биогаса-енергетски садржаји. Угљен-диоксид је инертан приликом сагоревања биогаса и нема значајан утицај на околину. Из биогаса се уклања CO₂, и он се пречишћава све до нивоа, када у њему преостаје скоро само метан, тј. гас који чини већину запремине природног гаса. То је важно због тога, уколико се утискује у мрежу природног гаса, може тачно да се дефинише количина испоручене енергије коришћене у когенерацији.

2.3.2 Принцип функционисања когенерације

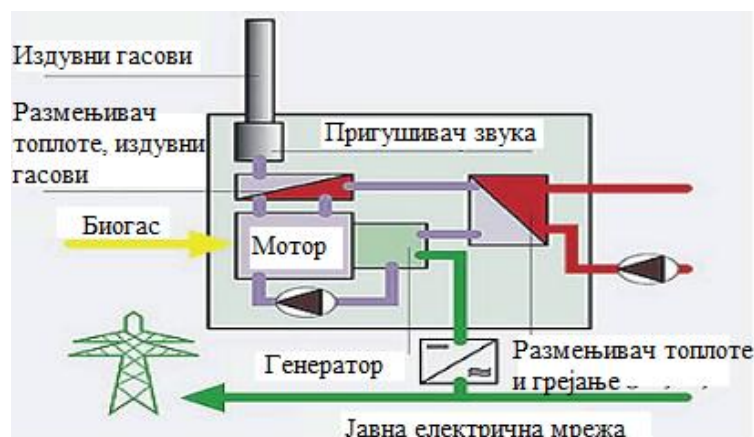
Треба направити разлику између ранијих и савремених СУС мотора. Код ранијих СУС мотора, једна трећина примарне енергије се трансформисала у механичку, једна трећина у топлотну енергију расхладне течности, а једна трећина је садржала продукте сагоревања.

Савремени СУС мотори имају степен искоришћења преко 40%, али је и тада на располагању велика количина топлотне енергије.

Когенерација се остварује искоришћењем топлотне енергије расхладне течности и продукта сагоревања. Топлотна енергија, која се добија из расхладне течности је на ниском температурном нивоу, и може да се искористи за загревање воде до око 90°C, и може да се употреби за грејање ферментора или оближњих радних и стамбених просторија.

Температуре продукта сагоревања су 460-550°C и може да се искористи за производњу технолошке паре.

За искоришћавање топлотне енергије расхладне течности и продукта сагоревања неопходни су одговарајући размењивачи топлоте и котролно-управљачки склопови, који су саставни делови опреме.



Слика 2.2 Постројење за когенерацију са прикључком за електричну енергију

2.4 Мотори у процесу когенерације

2.4.1 Гасни Otto мотори

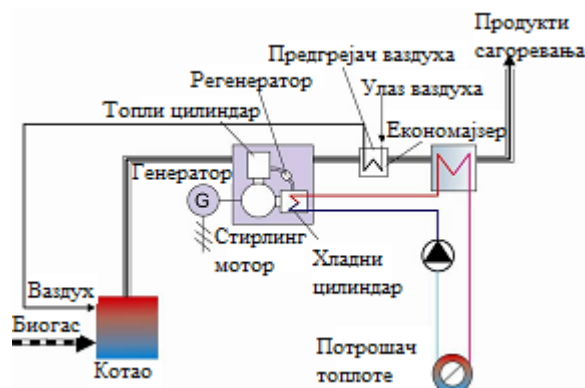
Развијени су специјално за коришћење биогаза. Да би смањили емисију непожељних продуката они раде са високим коефицијентом вишка ваздуха. Подешени су да раде са минималним запреминским уделом метана у биогазу од 45%, а ако метан падне испод ове вредности, аутоматски се искључују. Примена је могућа на свим, али исплатива за већа биогаз постројења.

2.4.2 Дизел мотори са иницијалним паљењем

Овај тип мотора није наменски произведен за коришћење биогаза, већ се за ту намену стандардни модели прерађују. Израђују их фабрике које производе камионске моторе. Биогаз и ваздух се мешају и усисавају у цилиндри. Када се у цилиндру мешавина компримује убацује се дизел гориво и остварује паљење целе смеше. Примена је могућа на свим, али исплатива за мања биогаз постројења.

2.4.3 Стирлинг мотори

То су клипне машине са затвореним циклусом, пошто радни медијум остаје унутар радног цилиндра. Означавају се као мотори са спољашњим сагоревањем. Кружни термодинамички процес се одвија у четири фазе: загревање, експанзија, хлађење и компресија. Радни флуид, ваздух, водоник или хелијум након загревања и експанзије у топлом цилиндру одлази до хладног цилиндра. За загревање топлог цилиндра користи се топлота настала сагоревањем биогаза. У хладном цилиндру долази до потхлађења радног флуида и његове компресије. Постројење садржи регенератор којим се повећава степен корисности и смањује потреба за уложеном топлотном енергијом.



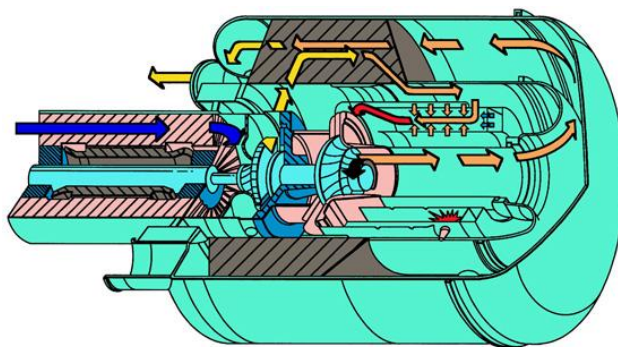
Слика 2.3 Стирлинг мотор

Електрични степени корисности постројења са Стирлинг мотором крећу се у опсегу 10-15%, а укупни степен корисности су и до 90%. Повећање електричног степена корисности, може се остварити искоришћењем дела топлотне енергије за предгревање ваздуха за сагоревање. Пошто не постоји серијска производња, трошкови инвестиција за ове моторе су веома високе.

2.4.4 Микротурбине

Мање су снаге од гасних турбина у великим енергетским постројењима. Раде по истом термодинамичком циклусу, па се још називају и микрогасне турбине. Брзоходне су, ниских температура и притисака у комори за сагоревање. Као гориво користе било који гас минималног садржаја метана 35%.

За разлику од гасних мотора, где је носилац топлоте и расхладна течност, код микротурбина, целокупна количина отпадне топлоте садржана је у продуктима сагоревања. Инвестиције за микротурбине на биогас више су него за гасне моторе.



Слика 2.4 Микротурбина

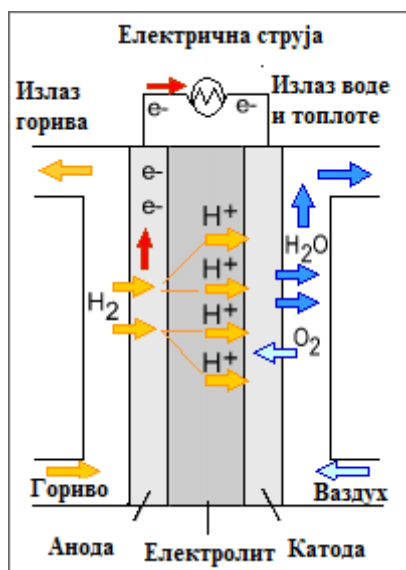
2.4.5 Гориве ћелије

То су електрохемијски претварачи енергије. У њима се хемијска енергија горива претвара у електричну енергију, без процеса сагоревања, чиме се смањује емисија штетних гасова. Због тога ове гориве ћелије имају предност у коришћењу.

Основни делови гориве ћелије су:

- електролит (дизајниран је тако да пропушта јоне водоника до катодe, али не и електроне)
- електроде, анода и катода (Анода има улогу да у каналима обезбеди контакт између водоника и катализатора, при чему водоник оксидује и настају позитивни јони водоника и електрони, који се преко аноде спровode до спољашњег струјног круга потрошача електричне енергије. Катодом се спровode електрони по повратку из спољачњег струјног круга и у канале се доводи кисеоник у контакт са катализатором)
- катализатор (специјалан материјал, који обезбеђује реакцију јона водоника, електрона и кисеоника-настајање воде. Ова реакција је екзотермна, генерише се топлотна енергија).

Употреба горивих ћелија није комерцијализована, јер се производе у малим серијама, па им је цена висока.

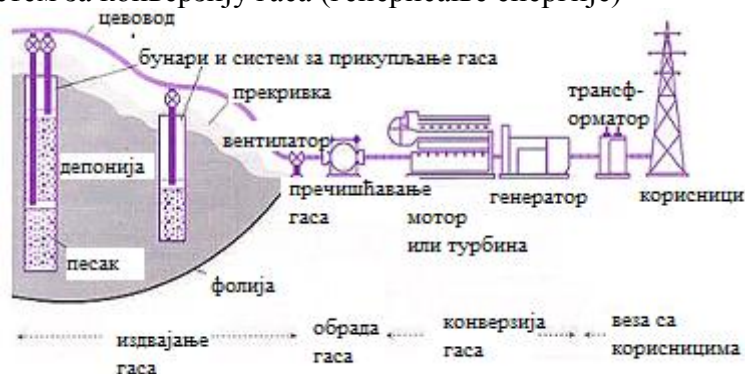


Слика 2.5 Горива ћелија

3. ТЕХНОЛОГИЈА САКУПЉАЊА ДЕПОНИЈСКОГ ГАСА

Свако постројење за издвајање енергије из гаса се састоји од три основна система (модула) [2]:

1. систем за сакупљање (екстракцију) гаса (непосредно на депонији)
2. систем за процесирање (третман) гаса
3. систем за конверзију гаса (генерисање енергије)



Слика 3.1 Делови система за прикупљање, третман и претварање гаса у енергију

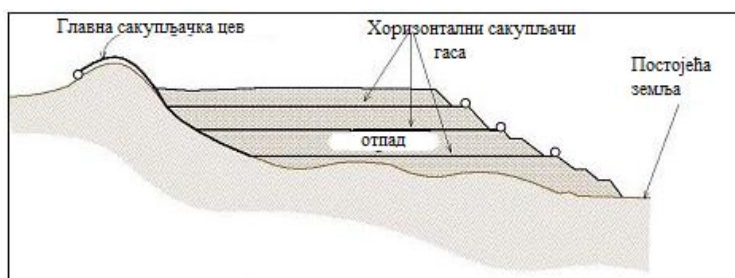
3.1 Екстракција (сакупљање депонијског гаса)

Систем прикупљања депонијског гаса се састоји од мреже вертикалних бунара (бушотина) и/или хоризонталних канала (ровова) постављених на депонији ради сакупљања депонијског гаса. Основни принцип функционисања се огледа у вакууму који се користи да би се извукао гас из депоније. Приликом прикупљања гаса се тежи успостављању неутралног притисно/вакуумског градијента равномерно распоређеног по целој површини депоније.

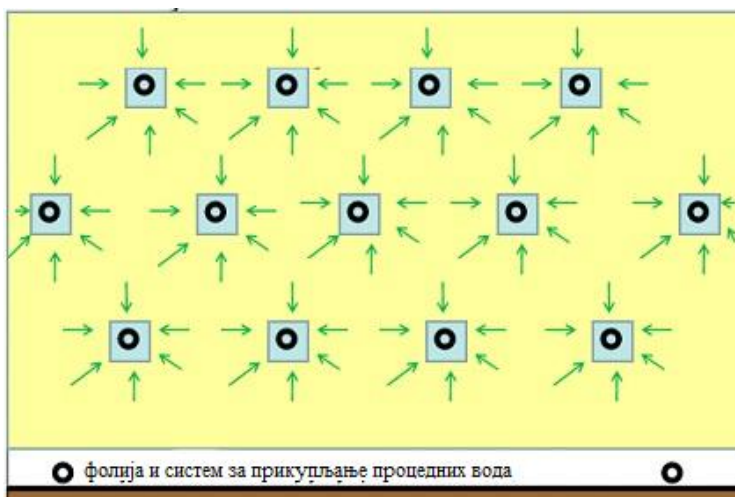
Распоред бунара или ровова по депонији треба да буде дизајниран тако да обухвата што више отпада у својој зони прикупљања. Зоном прикупљања се може сматрати део отпада у коме је негативни притисак изазван применом вакуума у бунарима или рововима. Део депонијског гаса изван зоне прикупљања тежи да се креће ка бунарима или рововима као резултат разлике притисака који се формира.

3.1.1 Хоризонтални канали (ровови)

Хоризонтални канали се постављају на оним местима у депонији где је приоритет контролисање емисије депонијског гаса током попуњавања депоније. Предност хоризонталних система канала у односу на вертикалне бунаре је у томе што код хоризонталних канала је могуће прикупљање депонијског гаса испод активних области попуњавања депоније, што је код вертикалних бунара немогуће.



Слика 3.2 Шема хоризонталног система канала



Слика 3.3 Попречни пресек хоризонталних канала (ровова)

Ископани канали су слични каналима за цевовод и испуњени су пропустљивим шљунком. Перфориране цеве су постављене у канале. Канали могу бити ископани у површинском делу депоније, или алтернативно канали се могу извести на следећи начин: тако што се врши уклањање површинског слоја, тј. прекривке, затим изградњом шљунковитог канала са цевима за прикупљање и на крају прекирвање канала са новим отпадом.



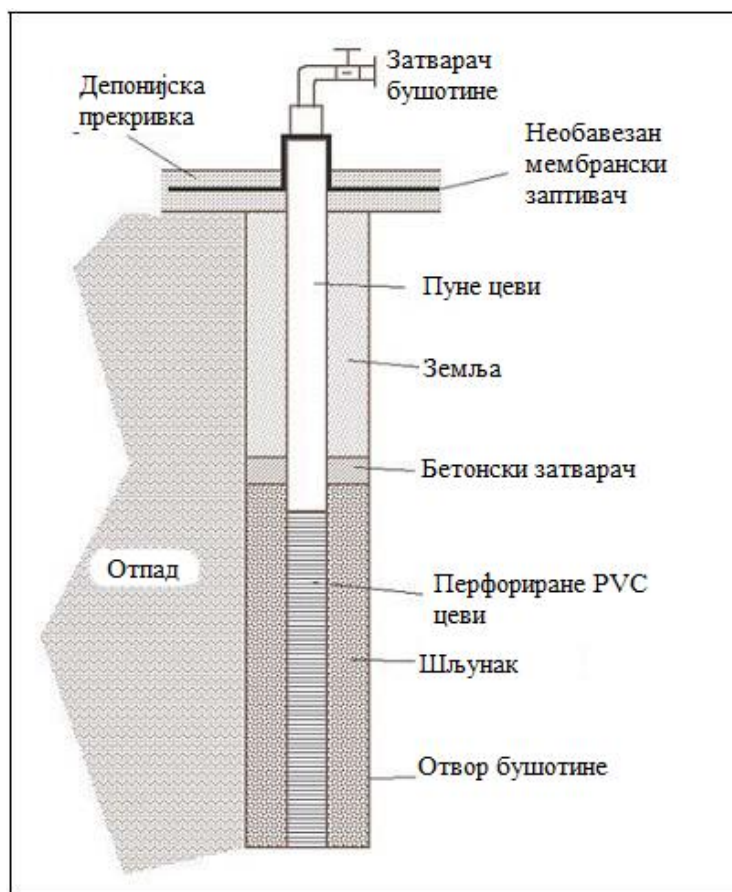
Слика 3.4 Процес изградње хоризонталних канала (ровова)

Хоризонтално растојање између канала би требало да буде у опсегу од 15 до 30m. Такође растојање је у зависности од стопе попуњавања депоније, тако да су већа

растојања у случајевима веће стопе попуњавања депоније. Вертикално растојање између ровова треба бити мање од хоризонталног. Ово је последица тога што је хоризонтална пропустљивост отпада може бити и десет пута већа од вертикалне пропустљивост. Вертикално растојање између ровова би требало да буде у опсегу од 10-20m, номинално је око 12m.

3.1.2 Вертикални бунари (бушотине)

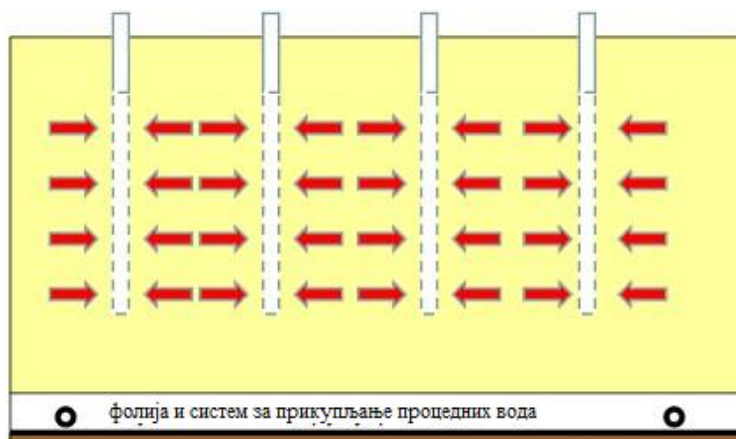
Систем вертикалних бунара је најчешће коришћен систем. Састоји се од избушених бунара пречника 0,6-0,9m. Понекад се користе и бунари мањих пречника 0,3-0,45m. Цевоводи су пречника 0,05-0,2m (обично од поливинил хлорида (PVC), или полиетилена (HDPE)). Смештени су у бушотине које су попуњене каменом пречника од 3cm или више. Цеви су перфориране у нижим областима, где се скупља депонијски гас, док се цеви пуног профила користе близу површине, да би спречиле улазак ваздуха.



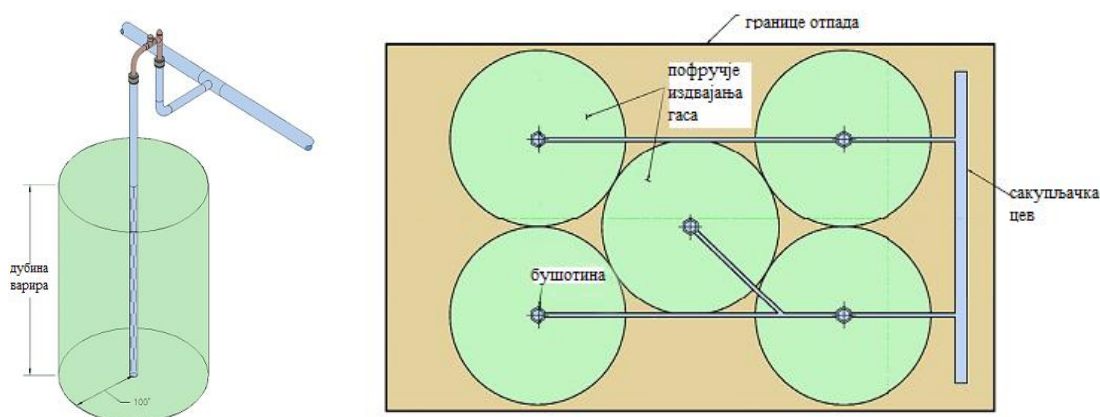
Слика 3.5 Вертикални бунар

Обично је дубина бунара (7-22) м, а могу бити и преко 30 м, зависно од дубине депоније. Буше се обично до дубине течне фазе у депонији или до приближно 75% дубине депоније. Добро бушење захтева пажљиво контролисање да би се избегао додир са дном депоније. Величина простора између бунара зависи од карактеристика депоније (нпр. дубине депоније, типа и компактности отпада, прекривног материјала итд.). Обично је међусобни размак 15-90m [4]. Бунари су повезани мрежом цевовода, који воде до цеви већег пречника, а оне до станица за процесирање и конверзију гаса.

Вертикални систем бунара користи вентилатор или компресор и помоћу потпритиска извлачи депонијски гас из депоније кроз систем ценовода.



Слика 3.6 Сакупљање гаса системом вертикалних бунара



Слика 3.7 Бушотина и просторни распоред бушотина

Без обзира да ли се користе бунари или канали, све цеви из бушотина су ценоводом повезане са главном хоризонталном цеву у коју се гас доводи и која транспортује гас даље до система за процесирање гаса. Након одвајања кондензата, депонијски гас може проћи кроз више различитих нивоа додатног пречишћавања, што зависи од планиране употребе депонијског гаса.

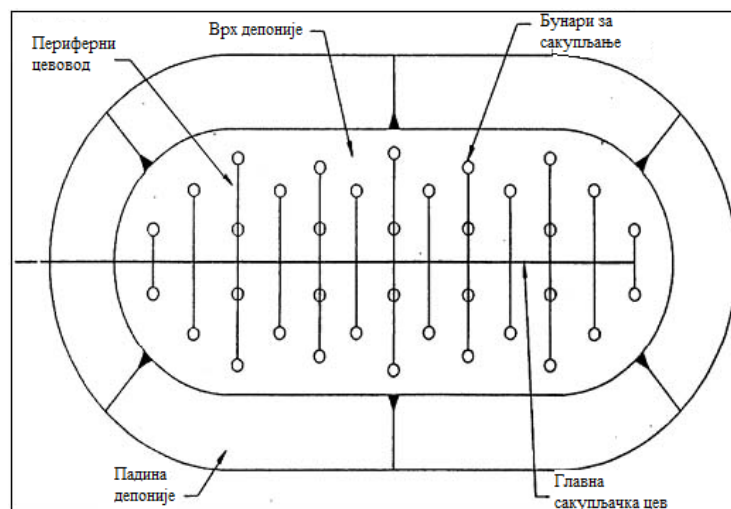
3.1.3 Мрежа за прикупљање депонијског гаса

Мрежа за прикупљање се састоје од система ценовода постављених тако да повезују депонијски гас из области екстракције са бакљом или са постројњем за његову конверзију. Типичан систем ценовода за прикупљање депонијског гаса обухвата:

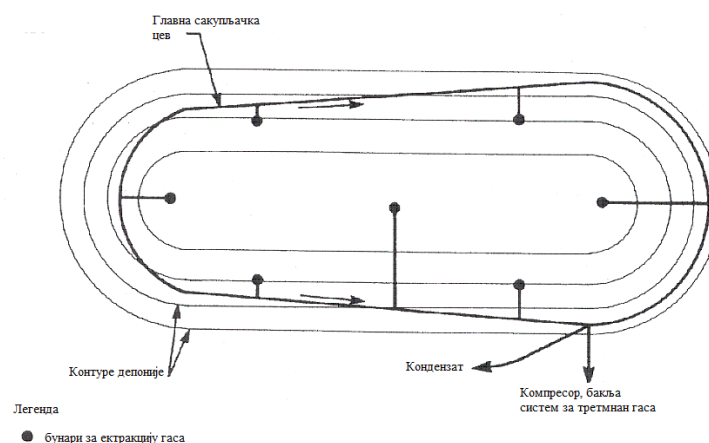
- Ценовде малих пречника (минимум 100mm), кратке бочне ценовде који повезују бунаре или бушотине
- Периферне ценовди који повезују бочне
- Главни сакупљачки ценоводи који транспортују депонијски гас из периферних ценовда до постројења за третман депонијског гаса

Постоји неколико различитих начина за повезивање појединачних бушотина са пумпом и системом за коришћење. Најстарији, а вероватно и најзаступљенији начин је

повезивање бушотина са главном сакупљачком цеви, која је најчешће постављена средином депоније. Цеви из појединачних бушотина повезане су тако да растојање буде најмање. Друго раширено решење је постављање главне цеви ивицом депоније.



Слика 3.8 Скупљање гаса у главну сакупљачку цев по средини депоније



Слика 3.9 Скупљање гаса у главну сакупљачку цев по ободу депоније

3.1.4 Вентилятори за екстракцији депонијског гаса

Систем вентилятора укључује све компоненте које се користе за генерисање и примену вакуума ради екстракције депонијског гаса и његовог снабдевања до места финалне употребе. Постављање вентилятора би требало бити у централном делу предвиђеног простора ради евентуалног проширења система и близу места финалне употребе (електричне мреже или цевних прикључака за кориснике). Постоји варијанта затвореног система вентилятора унутар зграде или спољна варијанта када је постављен у одређеном заклону.



Слика 3.10 Вентилатор са сигурносим вентилима као спољна варијанта

Пожељно је да се проточни капацитет вентилятора и бакље изједначи ради једноставнијег функционисања система. Одабиром већих капацитета протока може се ограничити способност функционисања бакље при режиму нижег протока депонијског гаса. Док се одабир мањих капацитета резултовати већим капиталним трошковима без значајнијег побољшања флексибилног функционисања система.

У већини система сакупљања депонијског гаса, једностепени центрифугални вентилятори су се доказали као најдоступнији и најекономичнији услед њихове повољне цене и минималне потребе за одржавањем. Уколико је потребно регулисање притиска или протока изван могућности вентилятора постоје две опције: Повећање притиска се изводи редним повезивањем вентилятора, док се проток повећава повезивањем вентилятора паралелном везом. Пожељно је да систем буде повезан паралелном везом како би се што више повећала количина спаљеног депонијског гаса, онда када постројење за његову конверзију не може да прихвати сав прикупљени гас.

Користе се и вишестепени центрифугални вентилятори (са чак 5 радних кола унутар спитланог кућишта), јер постижу веће притиске од једностепених центрифугалних. Овакви типови вентилятора постижу радне притиске у опсегу од 20 до 90 kPa, и протоке од 170 до 10,200 m³/h. Међутим, вишестепени центрифугални вентилятори су доста скупљи и имају већу потребу за одржавањем од једностепених.

Притисак једностепених центрифугалних вентилатора се генерално налази у опсегу око 50 mm воденог стуба (0.125 bar), може бити и већи зависно од конфигурације система за прикупљање депонијског гаса и природе контролисања опреме постројења. Проточни капацитет зависи од саме депоније, тј. количине генерисања депонијског гаса током времена. Вентилатор треба бити конструисан од материјала отпорног на варнице и све компоненете вентилатора које долазе у контакт са депонијским гасом требају бити од материјала отпорног на корозију. Вентилатор на вратилу треба бити опремљен са заптивкама не би ли се спречило цурење гаса у околину и продирање околног ваздуха у спирлано кућиште вентилатора [3].

3.2 Систем (модул) за процесирање гаса

Након сакупљања гаса, а пре његове конверзије, он мора бити третиран ради уклањања кондензата, честица и осталих нечистоћа. Кондензат се формира хлађењем топлог депонијског гаса при проласку кроз систем цевовода за сакупљање. Ако се кондензат не отклони, може блокирати овај систем и онемогућити коришћење гаса. Третман зависи од касније употребе депонијског гаса. Минималан третман је потребан за директно коришћење гаса у гасним котловима, пећима и сушарама. Систем обично садржи низ филтера за уклањање састојака који могу оштетити делове мотора и турбине и смањити ефикасност система. Скупљи третмани су потребни за добијање квалитетнијег гаса који одлази у цевоводе природног гаса или производњу алтернативних горива.

Модул садржи процесну опрему за компресовање, филтрирање и анализирање гаса издвојеног из депоније, а направљен је као стандардни контејнер. Подељен је на два дела: контролну и компресорску просторију. У контролној просторији се врши контрола и надгледање инсталације, укључујући анализе, контроле квалитета и количине гаса из сваког појединачног бунара. Компресорска просторија садржи процесну опрему као контролне вентиле, филтере гаса и заустављач пламена, компресор гаса, хладњак гаса, детекторе гаса, панел са анализама гаса, мерач протока гаса и контролни компресор ваздуха.

Квалитет гаса може да варира од бунара до бунара, аутоматски контролни систем се инсталира да регулише контролне вентиле, према квалитету гаса и садржају кисеоника. Такође је могућа и ручна контрола вентила. Из бунарских грана, гас се сакупља у цевовод и филтрира. Садржај кисеоника у гасу се непрекидно мери и даје се сигнал контролном систему, ако ниво превазилази 3% O₂ односно, гаси се инсталација ако ниво O₂ прелази 6%. Ово спречава формирање експлозивне гасне смеше у цевоводу.

Третман гаса се састоји из примарног и секундарног третмана гаса. Примарни третман се односи на филтрирање и исушивање гаса (ради отклањања честица и влаге). Отклањање влаге се врши хлађењем и сабијањем гаса. Секундарним третманима се врши много боље пречишћавање него примарним. Најчешће коришћене технологије секундарне обраде су адсорпција и апсорпција.



Слика 3.11 Изглед система за процесирање гаса

3.3 Систем за конверзију гаса

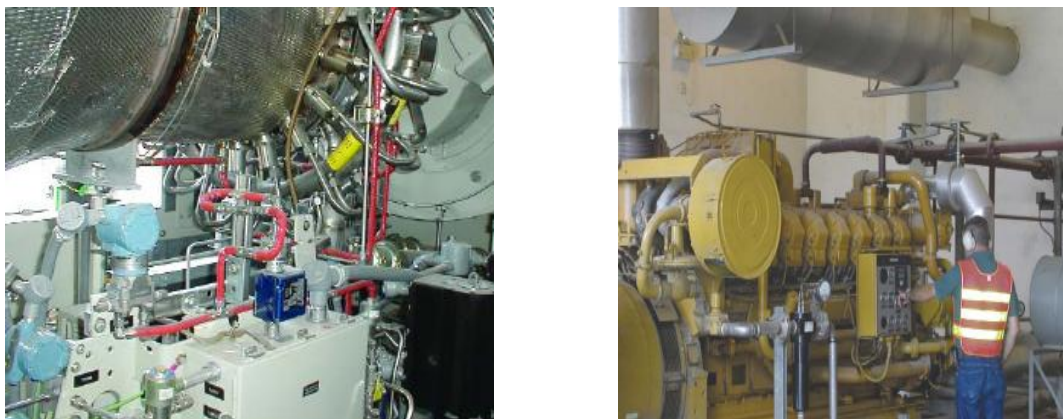
Неки пасивни системи вентилације једноставно испуштају сакупљени депонијски гас у атмосферу, без икаквог претходног третмана. Ово је погодно само када се ради о малим количинама сакупљеног гаса и када у близини нема људи, који раде и живе. Депонијски гас се чешће контролише и третира из сигурносних и здравствених разлога. Уобичајене методе третирања депонијског гаса се могу поделити на технологије са сагоревањем, технологије без сагоревања депонијског гаса као и технологије контроле непријатног мириса.

Најчешће коришћене технологије сагоревања су сагоревање на бакљи, у инсинераторима, котловима, процесним грејачима, гасним турбинама и СУС моторима. Сагоревањем се постиже уништавање преко 98% органских састојака, метан прелази у угљен-диоксид, резултирајући великом редукцијом гасова стаклене баште. Сагоревање на бакљи је најефикасније, када депонијски гас садржи најмање 20 запреминских % метана. При овој концентрацији метан лако образује запаљиву смешу са околним ваздухом, па је потребан само извор паљења. На депонијама са мање од 20 запреминских % метана, за рад је неопходно додатно гориво (нпр. природан гас), што повећава трошкове. Постоје два типа бакљи: отворене и затворене. Отворене бакље се састоје од цеви кроз коју се гас пумпа и пали варницом и у којој се регулише проток гаса. Предности ове технологије су једноставан рад и руковање, а недостаци: неспособност сагоревања, естетски проблеми и проблеми са контролом. Затворене бакље су комплексније и скупље и састоје се од више бакљи затворених окружених ватроотпорним зидовима, унутар којих се шири пламен. Може се контролисати улазна количина гаса и ваздуха, чинећи сагоревање сигурнијим и ефикаснијим.

Технологије без сагоревања се деле на технологије добијања енергије и технологије претварања гаса у друге производе. Без обзира на то која технологија се користи, депонијски гас се мора подвргнути претретману, ради отклањања нечистоћа као што су вода, неметански органски састојци и угљен-диоксид. Технологије добијања енергије користе депонијски гас за директно добијање енергије у горивим ћелијама и још су у развоју, док се технологијама претварања гаса добијају комерцијални производи као што су компресовани природни гас, метанол, прочишћени угљен-диоксид и метан или течан природни гас. Ове технологије користе процесе као што су сакупљање и претретман гаса, хемијске реакције и/или технологије пречишћавања. Неке од технологија користе бакље за уништавање гасовитог отпад.

Технологије контроле непријатног мириса спречавају излазак гасова, који изазивају непријатне мирисе ван депоније. То се постиже применом депонијске прекривке и дневним прекривањем отпада земљом. Скупље прекривке се уграђују при затварању депоније, да би се спречило продирање влаге у отпад и поспешао развој бактерија и распадање. Вегетација на депонији такође редукује непријатне мирисе. Примена бакље је друга техника којом се елиминишу непријатни мириси термичким уништавањем гасова који их изазивају. Још једна технологија је вентилирање гаса кроз филтер или муљ. Све док је кисеоник присутан, бактерије ће разлагати депонијски гас под аеробним условима, производећи угљен-диоксид и воду.

Главна употреба постројења погоњених на депонијски гас је за производњу електричне енергије, док се могу користити и за производњу топлотне енергије, а најчешћи је случај мешовита производња. Врло је мала разлика између оваквог постројења и класичне електране која користи природни гас или дизел гориво. То значи да свако класично постројење за производњу енергије, уз мале преправке може да користи депонијски гас за генерисање енергије. Овде спадају и мотори са унутрашњим сагоревањем, дизел генератори и микротурбине као један од најпопуларнијих агрегата. Приказ турбине је дат на слици 3.12:

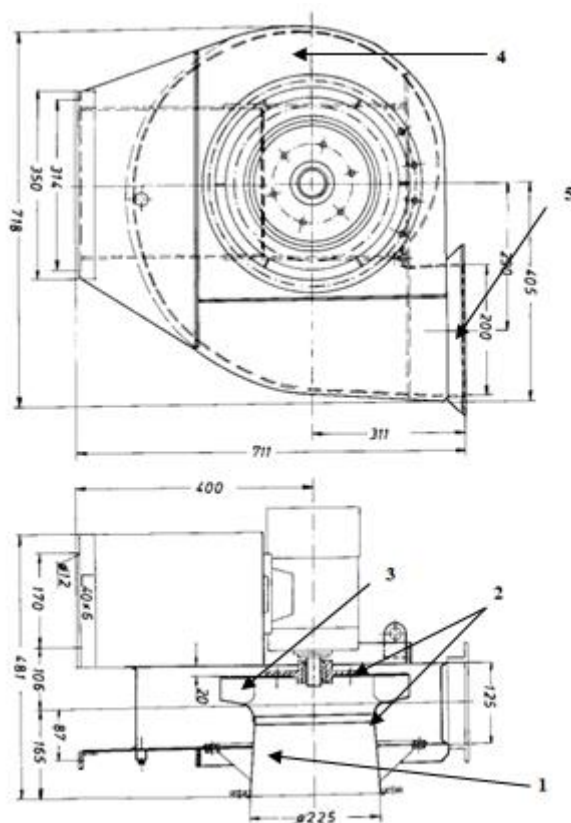


Слика 3.12 Турбина

4. ПРОЈЕКТОВАЊЕ ЦЕНТРИФУГАЛНОГ ВЕНТИЛАТОРА

4.1 Центрифугални вентилатори

Као што је већ поменуто у претходном поглављу обалсти екстракције депонијског гаса користе се једностепени и вишестепени центрифугални вентилатори. У овом мастер раду биће приказан детаљан опис пројектовања и нумеричке анализе једностепеног центрифугалног вентилатора (слика 4.1). Овај тип вентилатора предаје струјну енергију гасу путем центрифугалне силе која дејствује на гас од улаза до излаза радног кола вентилатора.



Слика 4.1 Једностепени центрифугални вентилатор: 1. усисно грло, 2. задњи и предњи диск радног кола, 3. лопатице, 4. спирално кућиште, 5. дифузор.

Полазне карактеристике у пројектовању једностепеног центрифугалног вентилатора су притисак, број обртаја и проток. Вредност промене притиска, на улазу и излазу из спиралног кућишта, је усвојена вредност која износи 50 mm воденог стуба (0.125 bar)[3]. Пошто је у овом мастер раду извршено пројектовање три једностепена центрифугална вентилатора, бројеви обртаја износе 10 000, 14 000 и 18 000 у минути. Што се проточног капацитета тиче, он је усвојен као проток депонијског гаса из локалне депоније у Јовановцу и просечно износи $600 \text{ m}^3/\text{h}$ [2].

Депонија у Јовановцу (слика 4.2) налази се 3 км северо-источно од центра града, у близини реке Угљешнице и ради од 1963. године. Депонија је отвореног типа. На депонију довозе отпад и физичка и правна лица. Депонија прима сав сакупљен комунални чврсти отпад из општине Крагујевац, опслужујући популацију од око

185.000 становника. ЈКП “Чистоћа“ наплаћује услуге коришћења депоније. Мерење отпада је почело да се врши од септембра 2008. године. Наплата се врши паушално. Највећи корисници ових услуга су ЈКП „Градско зеленило“, грађевинске фирме и појединци, постројење за пречишћавање отпадних вода (категорија опасног отпада) .



Слика 4.2 Депонија „Јовановац” у Крагујевцу

Депонија прекрива 15ha земље, надморске висине 164m и по географским карактеристикама може се дефинисати као равница. Количина чврстог комуналног отпада који се одлаже на депонију је процењен на 156 t/дан, са више од 50% биоразградивог отпада. До данас, више од милион тона отпада је депоновано, па је просечна дубина депоније 15m. Одвојено сакупљање папира и пет амбалаже је покренуто је за време 2009. године.

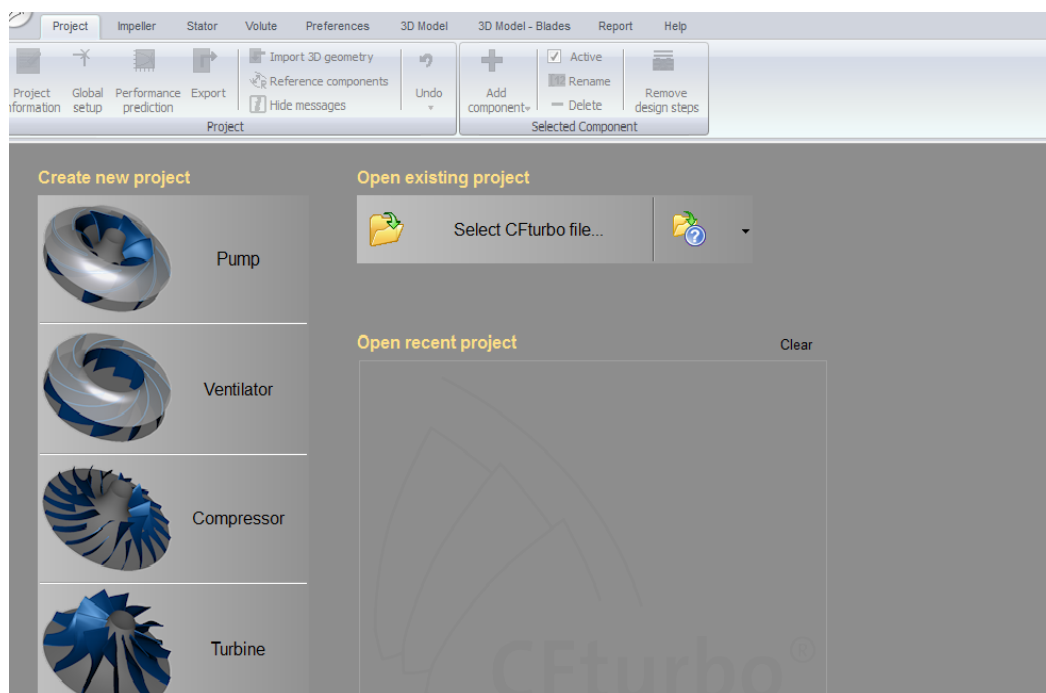
На депонији се врши дневно препокривање и разастирање отпада. Депонија је скоро сасвим попуњена и нема карактеристике санитарне депоније. На левој слици је перспектива града у односу на депонију, а на слици десно се види изглед депоније на месту где је највише насута отпада (више од 14m).



Слика 4.3 Изглед постојеће депоније у Крагујевцу

4.2 Пројектовање геометрије центрифугалног вентилатора у програмском пакету CFturbo

Почетни корак у пројектовању изабраног вентилатора подразумева пројектовање геометрије на основу полазних карактеристика (притисак, проток и број обртаја) и прорачуна у програмском пакету **CFturbo**. **CFturbo** је програм који пружа широк спектар могућности у раду са динамиком флуида и турбомашинама, као што су: прорачунска динамика флуида (CFD), структурна анализа (FEM), оптимизација, прототипи и моделирање пумпи, вентилатора, компресора и турбина [5]. Главна одлика овог софтвера је способност комбиновања модерног моделирања са нумеричким методама. На слици 4.4 је приказан изглед радног окружења при покретању **CFturbo**.



Слика 4.4 Радно окружење у CFturbo

4.2.1 Пројектовање геометрије радног кола центрифугалног вентилатора

Као што се види са претходне слике, у оквиру радног окружења, активирањем команде за вентилатор вентилатор започиње се пројектовање геометрије, најпре радног кола, а потом и спиралног кућишта. Кликом на поље са вентилатором отвори ће се дијалог, **Global Setup**, као што је приказано на слици 4.5.

Global setup

Specification of global project values.

Design point

Flow rate Q m³/h

Energy transmission Δp_t bar

Revolutions n /min

General

Direction of rotation ☒ Right (clockwise) ☐ Left (counter-clockwise)
(seen toward hub backside)

Casing efficiency (Stators + Volute) η_c

Fluid

Fluid ρ kg/m³

Inflow

Flow angle | Swirl number

$\alpha_s = \arctan(c_{ms}/c_{us})$ Hub °
Shroud °

Information

Specific speed (SI)	n_q	0.0
Specific speed (Asia)	n_q	0.0
Specific speed (US)	N_s	0
Type number (ISO)	ω	0.00
Speed coefficient	σ	0.00
Specific work	Y	0 m²/s²
Power output	PQ	0 kW
Mass flow	m	0 kg/s

OK Cancel Help

Слика 4.5 Global Setup (генерално подешавање)

У оквиру целине **Design point**, треба унети претходно усвојене вредности за проток (Q), разлику притиска (Δp_t), и број обртаја (n). Такође је битно и дефинисати густину проточног флуида у одељку **Fluid**. Као радни флуид, усвојен метан (CH_4). Након дефинисања полазних података аутоматски се прерачунавају прерачунавају специфичну брзину (n_q), коефицијент брзине (σ), специфичан рад (Y), масени проток m , и снагу на излазу (PQ), што се да видети са следеће слике 4.6:

Global setup

Specification of global project values.

Design point

Flow rate Q m³/h

Energy transmission Δp_t bar

Revolutions n /min

General

Direction of rotation ☒ Right (clockwise) ☐ Left (counter-clockwise)
(seen toward hub backside)

Casing efficiency (Stators + Volute) η_c

Fluid

Fluid ρ kg/m³

Inflow

Flow angle | Swirl number

$\alpha_s = \arctan(c_{ms}/c_{us})$ Hub °
Shroud °

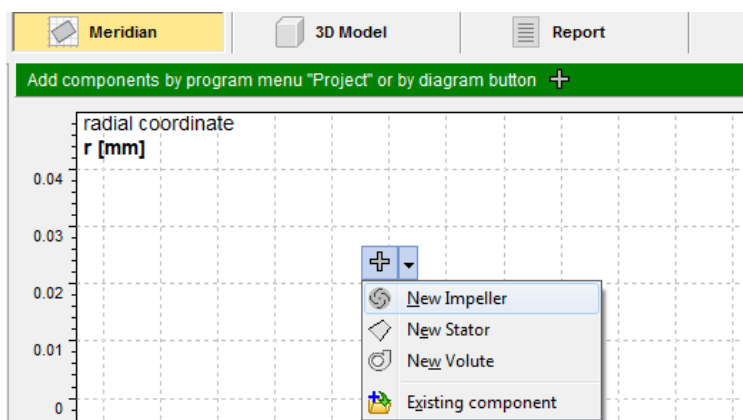
Information

Specific speed (SI)	n_q	25.2
Specific speed (Asia)	n_q	195.4
Specific speed (US)	N_s	1303
Type number (ISO)	ω	0.48
Speed coefficient	σ	0.16
Specific work	Y	18940 m²/s²
Power output	PQ	2.083 kW
Mass flow	m	0.11 kg/s

OK Cancel Help

Слика 4.6 Дефинисани полазни податаци

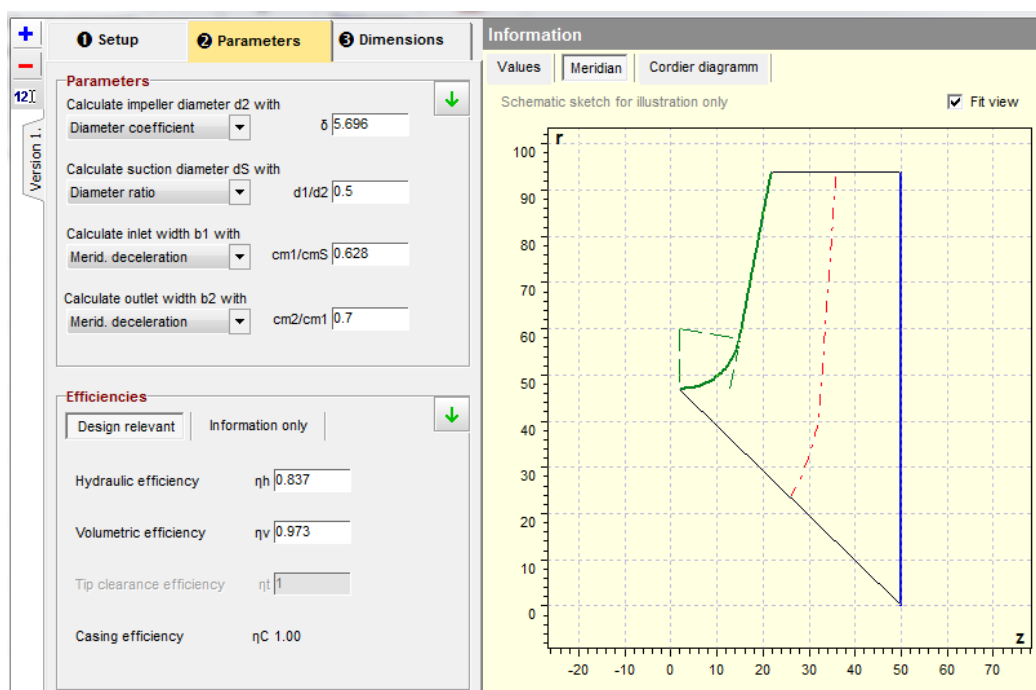
Активирањем команде **OK**, приступа се дефинисању компонената центрифугалног вентилатора. Активирати команду **New Impeller**, ради почетка дефинисања изгледа и величине радног кола као што се види на слици 4.7:



Слика 4.7 Одабир новог радног кола у меридијанском пресеку

По одабиру новог радног кола појавиће отвара се дијалог **Main dimensions**, где треба дефинисати пар параметара и прорачунати главне димензије радног кола.

У картици **Parameters** подесити вредност односа улазног и излазног пречника радног кола d_1/d_2 на 0.5, а сотале вредности остају као што су већ подешене (слика 4.8).

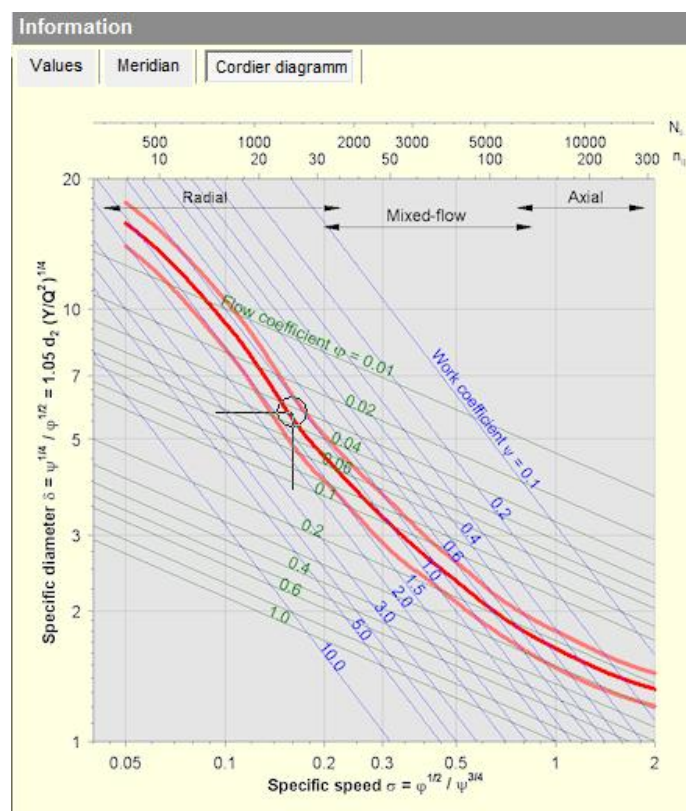


Слика 4.8 Дефинисање параметара

Одељак **Dimesnions** се тиче прорачуна минималног потребног пречника вратила (d_w), на основу задатог напона смицања (τ) и фактора безбедности (SF). Такође се врши прорачун главних демиензија као што су: ширина радног кола на улазу (b_1), ширина радног кола на излазу (b_2), усисни пречник (d_s) и пречник радно кола (d_2). Активирањем команде **Calculate** прерачунавају се описане димензије (слика 4.9). Са десне стране, у пољу **Information**, је дат меридијански пресек радног кола и кориговањем димензија ће се аутоматски изменити изглед радног кола у пресеку.

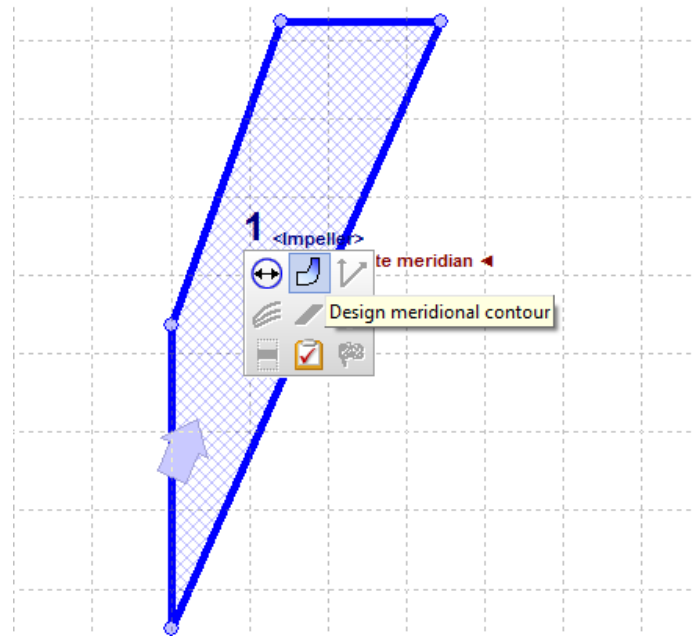
Слика 4.9 Прорачун пречника вратила и главних димензија радног кола

Поред тога у пољу **Values** добијају се на увид вредности попут просечних протока на улазу и иллазу из радног кола, као и коефицијенти протока, рад итд. Такође у одељку **Cordier diagram**, који представља зависнот специфичне брзине (σ) од специфичног пречника (δ), могу се одредити коефицијети рада (ψ) и протока (φ) као и ком типу припада моделирани вентилатор (радијални, радијално-аксијални, аксијални), слика 4.10.



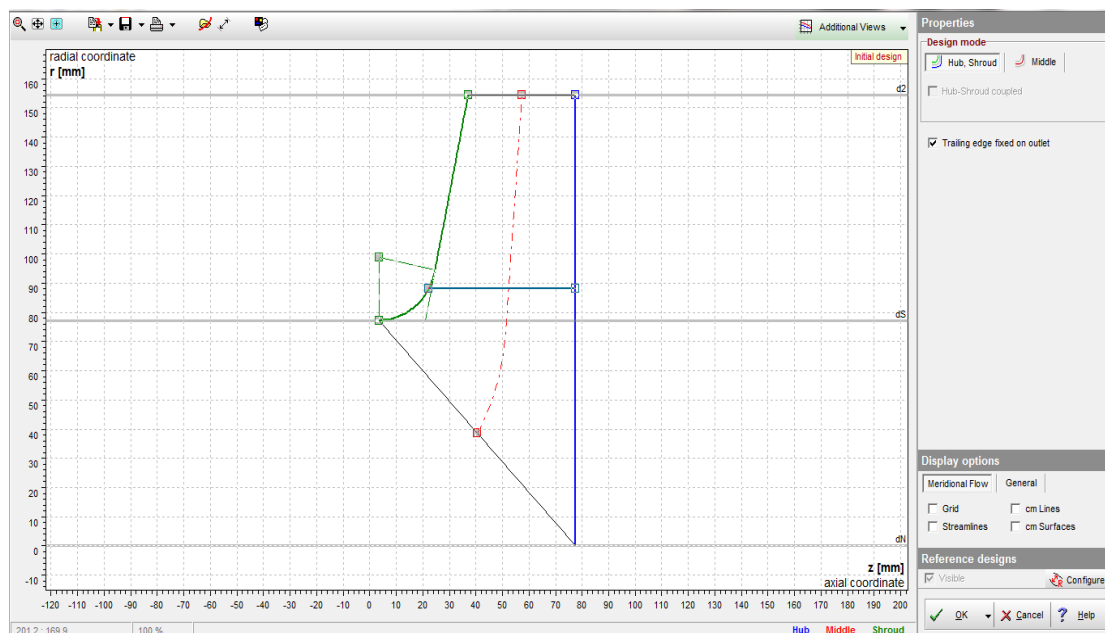
Слика 4.10 Кордијеров дијаграм

По завршеном прорачуну пречника вратила и главних димензија радног кола кликом на диугме **OK** у прозору **Main dimensions**, прелази се у меридијански пресек где ће се појавати некомплетно радно коло јер ће бити потребна додатна подешавања о којима ће бити речи у наредном тексту. Прво од тих додатних подешавања представља дизајнирање меридијанске контуре (слика 4.11).



Слика 4.11 Опција за подешавање меридијанске контуре

Кликом на ову опцију се прелази у прозор за профилисање меридијанског пресека радног кола (слика 4.12). Црвеном испрекиданом линијом је означена средња линија **Middle**, зеленом је означена предња бочна страна надомак предње бочне стране **Shroud**, и плавом је означена задња бочна страна **Hub**. Овде треба усвојити пресек датог радног кола активирањем команде **OK**.



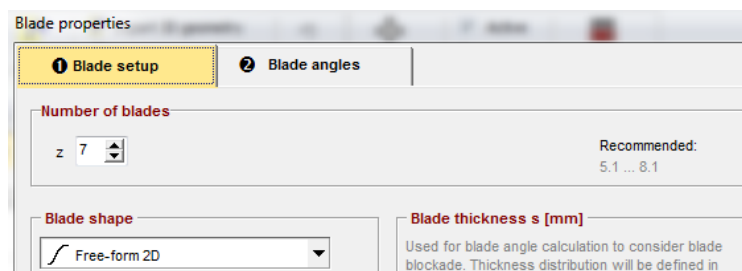
Слика 4.12 Мердијански пресек радног кола

Следећи корак у пројектовању је дефинисање нападних углова и прорачун трогулова брзина активирањем команде **Define blade angles** као на слици 4.13:



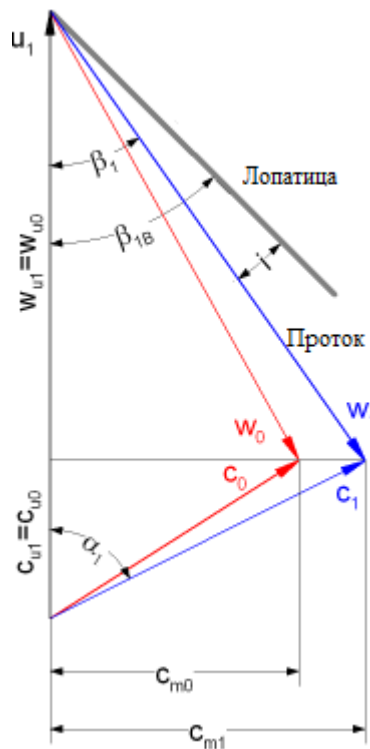
Слика 4.13 Опција за подешавање улазних и излазних углова

Активирањем ова команде отвориће се дијалог са две картице **Blade setup** (подешавање лопатица) и **Blade angles** (улазни и излазни углови) (слика 4.14). Приликом подешавања лопатица потребно је дефинисати број лопатица у пољу **Number of blades** (у овом делу је са десне стране приложен препоручени опсег број лопатица) и изглед лопатица из падајуће листе **Blade shape** (**Free form 2D** је препоручен за вентилаторе).



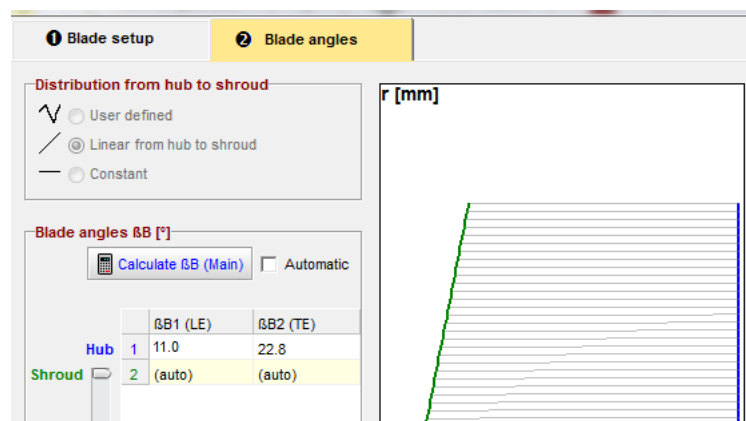
Слика 4.14 Подешавање лопатица

У картици **Blade angles** се на основу троуглова брзина, врши прорачун улазних и излазних углова. Троуглови брзина представљају векторски збир релативне (w) и преносне брзине (u) и као резултат имају апсолутну брзину (c) (слика 4.15).



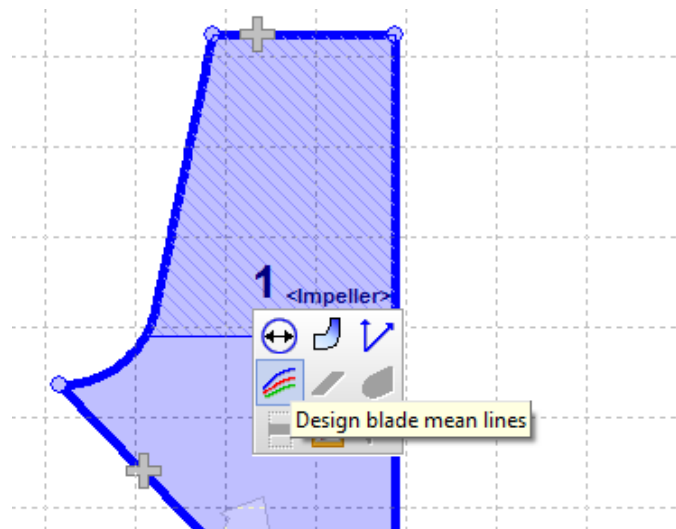
Слика 4.15 Троуглови брзина

Прорачун се врши активирањем команде **Calculate β_B** (слика 4.16), и притом треба узети у обзир да се улазни углови, на предњој бочној страни (β_{B1}), крећу у опсегу од 10-40°.



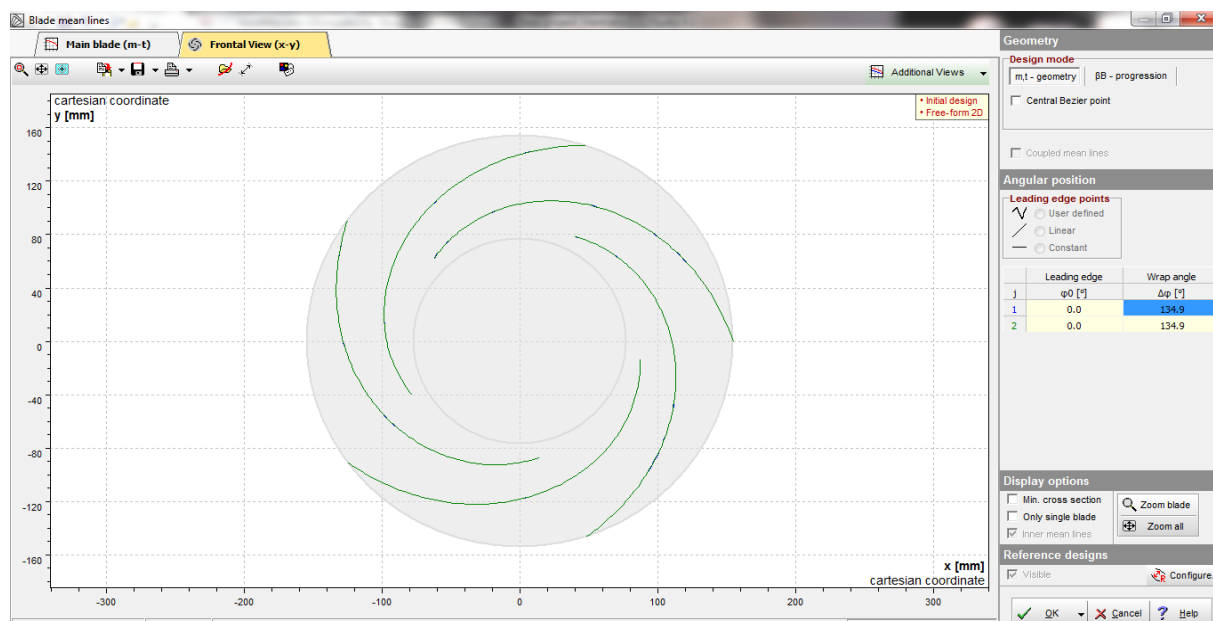
Слика 4.16 Прорачун улазних углова и излазних углова

Након прорачунатих углова, прелази се на подешавање средње линије (слика 4.17) лопатица, што ће директно утицати на профил лопатица и њихов изглед.



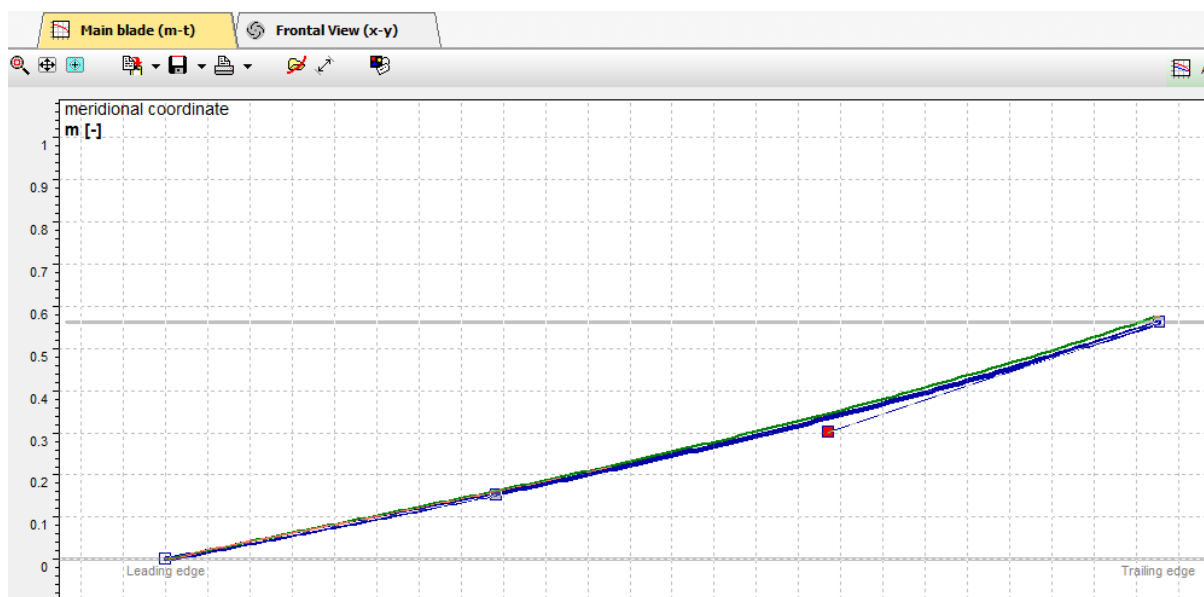
Слика 4.17 Подешавање средње линије лопатица

Уласком у поље намењено за подешавање средње линије отвара се прозор са одељком изгледа поједине лопатице и одељак фронталног прегледа радног кола (слика 4.18).



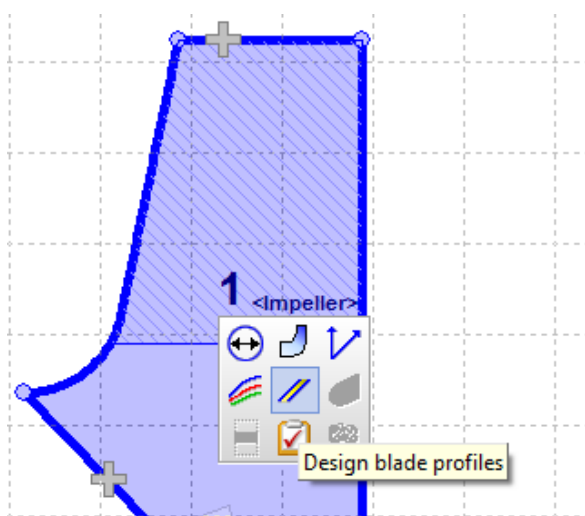
Слика 4.18 Фронтални изглед лопатица радног кола

Могуће је модификовање средње линије повлачењем црвеног квадратића за излазну ивицу (**Trailing edge**), као и за улазну ивицу (**Leading edge**) (слика 4.19). Али је овде само потребно усвојити дати изглед пресека активирање команде **OK**.



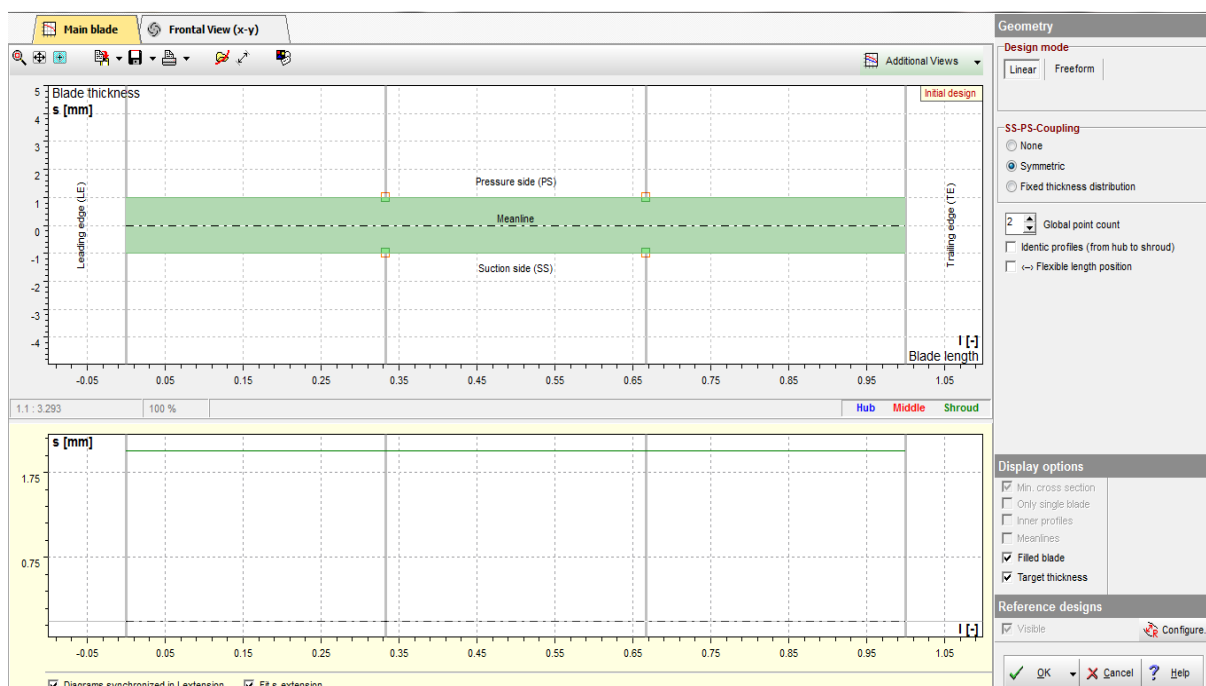
Слика 4.19 Подешавање средње линије лопатице

Предпоследњи корак у формирању комплетне геометрије радног кола центрифугалног вентилатора је дефинисање профила лопатица активирањем опцију **Design blade profiles** (слика 4.20).



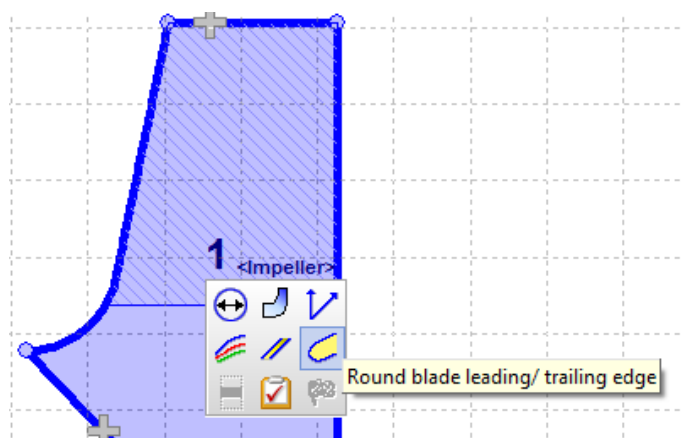
Слика 4.20 Опција за подешавање профила лопатица

Практично у овом одељку се дефинише дебљина лопатица тј. његова расподела дуж средње линије (**Mean line**) лопатице ка усисном делу (**Suction side SS**) и притисном делу (**Pressure side PS**) унутар радног кола. Расподела усвојена да буде симетрична, а може се и ручно подесити (слика 4.21). Са одабраном симетричном расподелом и датим профилем лопатице, активирањем команде **OK**, се усваја дати профил.



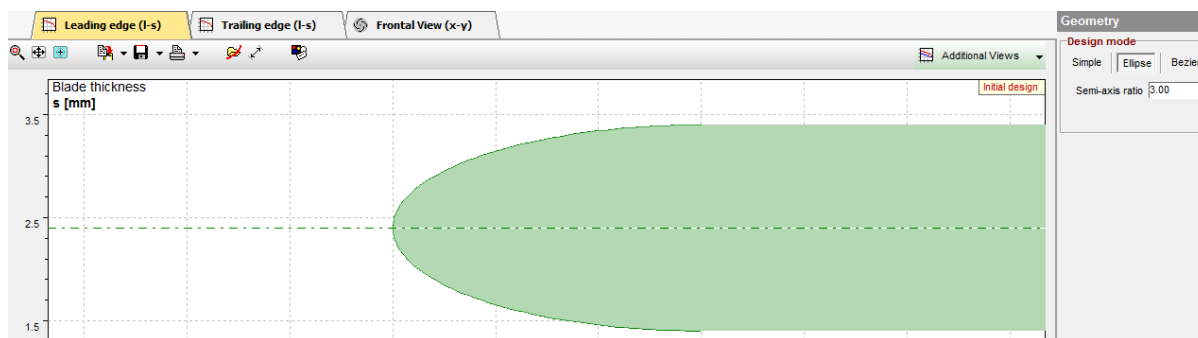
Слика 4.21 Одељак за подешавање дебљине профила лопатице

Последња опција у низу подешавања у сфотверу **CFturbo**, представља дефинисање спајања ивица између улазне (**Leading edge**) и излазне ивице (**Trailing edge**). Ово се постиже кликом да опцију **Round blade leading/trailing edge** (слика 4.22).



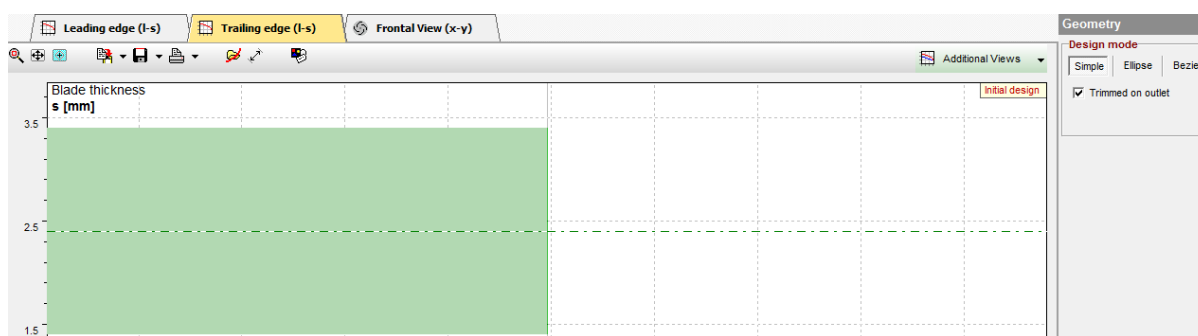
Слика 4.22 Дефинисање спајања ивица

Уласком у ову опцију увиђа се да је начин спајања претходно поменутих ивица изводљив на три начина: Једнотавним повезивањем ивицица правом линијом (**Simple**), повезивањем ивица елипсом (**Ellipse**), или варијанта кружног повезивања ивица (**Bezier**) (слика 4.23).



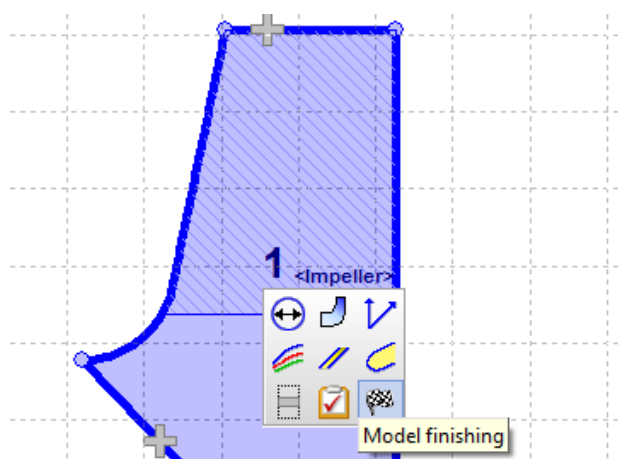
Слика 4.23 Повезивање ивица у елипсу

За улазни ивицу (*Leading edge*) одабрана је опција повезивања елипсом (*Ellipse*), док је за излазну ивицу (*Trailing edge*) одабрана опција једноставног повезивања правом линијом (*Simple*) (слика 4.24).



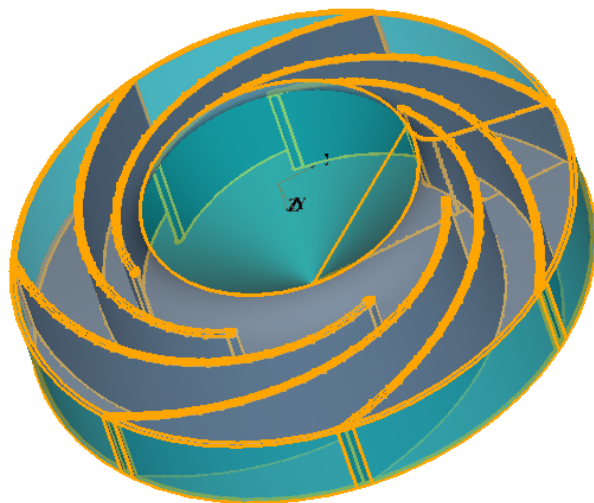
Слика 4.24 Повезивање ивица правом линијом

Након дефинисања спајања ивица, притиском на дугме **OK** ће бити потврђене изабрана подешавања. Још остаје опција за ажурирање претходних опција на крају чега се добија геометрија радног кола центрифугалног вентилатора за број обртаја 10000. Активирањем команде **Model Finishing** завршава се формирање геометрије радног кола (слика 4.25).



Слика 4.25 Ажурирање геометрије радног кола

Активирањем ове команде након неколико тренутака појављује се команда са ознаком , што је знак да је добијена геометрија (слика 4.26) валидна и без грешака.

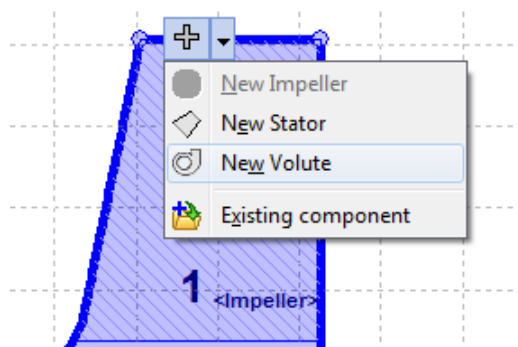


Слика 4.26 3Д модел добијене геометрије радног кола

Треба напоменути да је процес формирања геометрије за преостала два радна кола вентилатора од 14000 и 10000 обртаја потпуно исти, стим што се у почетним условима дефинишу бројеви обртаја датих радних кола.

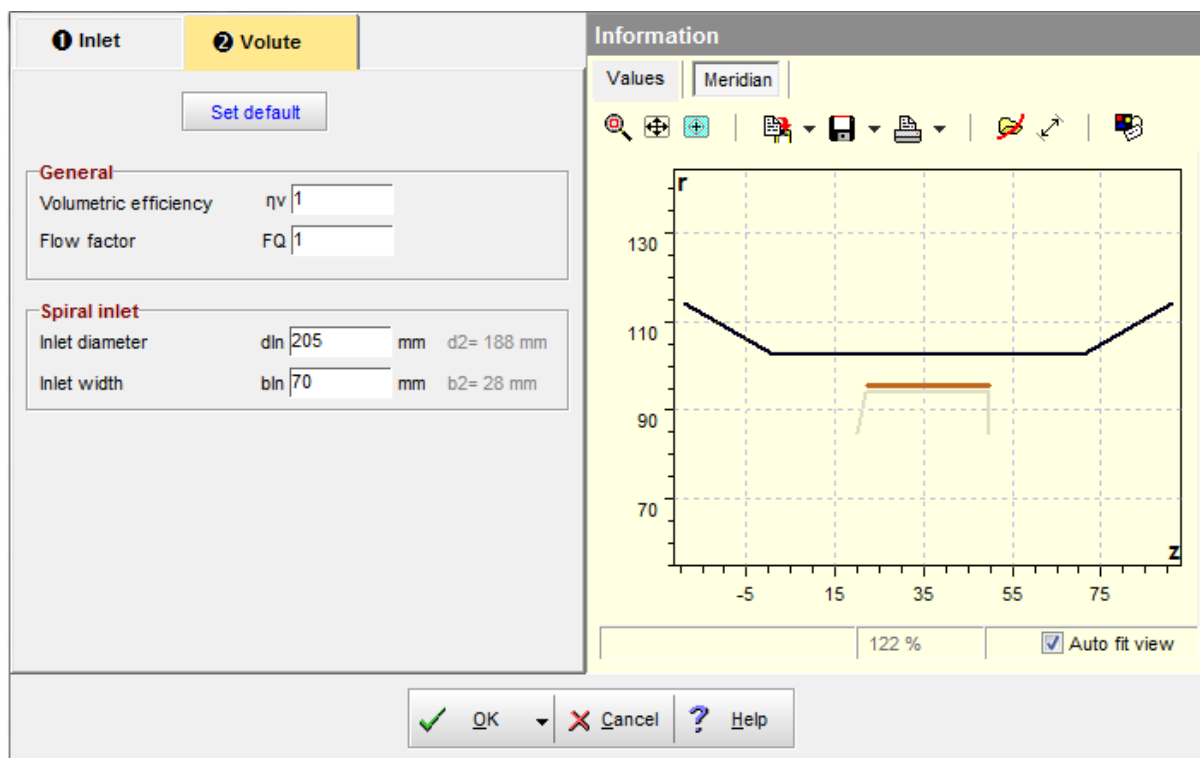
4.2.2 Пројектовање геомтерије спиралног кућишта центрифугалног вентилатора

По завршетку геометрије радног кола следећи корак, је израда геометрије спиралног кућишта за дато радно коло претходно објашњено (број обртаја 18,000). Активирањем команде **New Volute** (слика 4.27), започиње дефинисање геометрије спирланог кућишта.



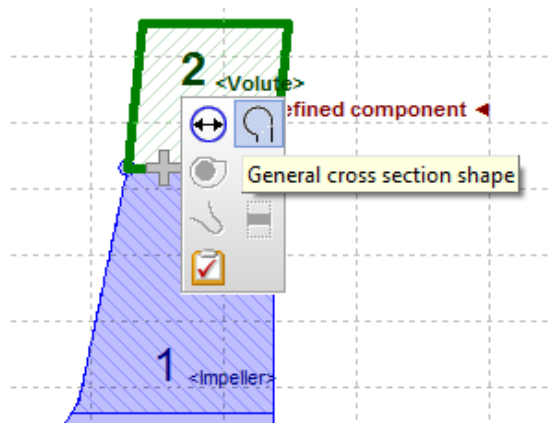
Слика 4.27 Опција за спирлано кућиште

Након активирањем ове опције отвара се дијалог (слика 4.28) где треба дефинисати величине као што су пречник спирале на улазу (Inlet diameter) и ширина спирале (Inlet width). Притом Треба узети у обзир да постоји зазор између радног кола и сприланог кућишта, као и да ширина спирале буде два и по пута већа од ширине радног кола на излазу.



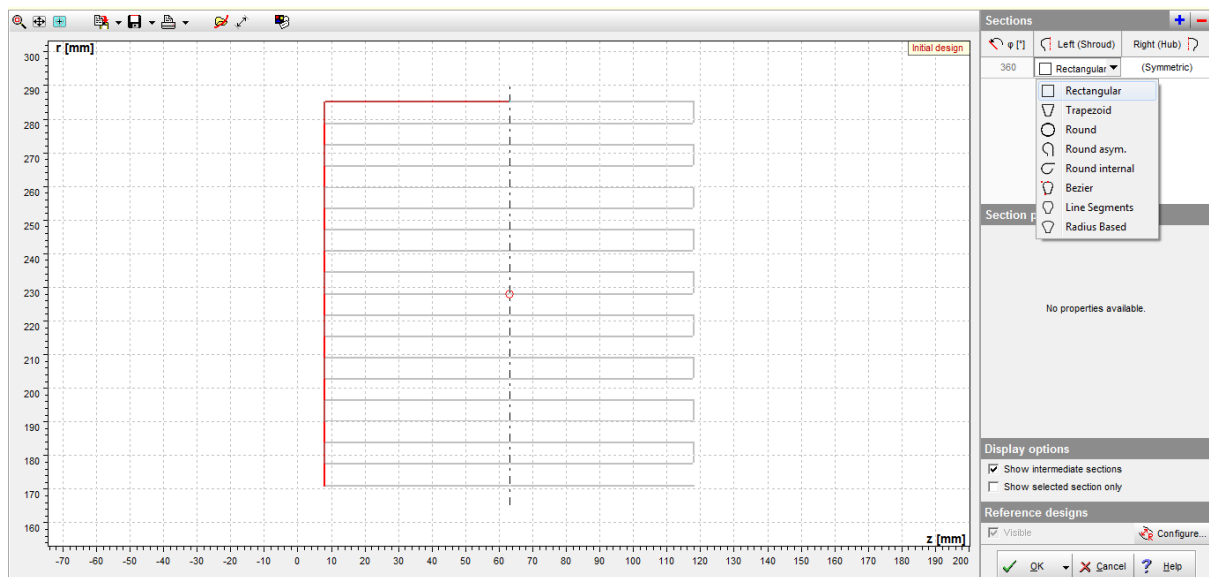
Слика 4.28 Дефинисање полазних карактеристика спиралног кућишта

Активирањем команде **OK**, прелази се на дефинисање попречног пресека спиралног кућишта кликом на опцију **General cross section shape** (слика 4.29).



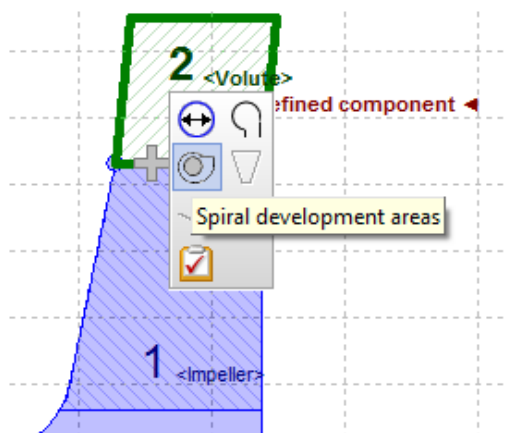
Слика 4.29 Опција за дефинисање попречног пресека спирале

Попречни пресек спиралног кућишта може бити: кружни, правоугаони, трапезни, кружно асиметрични, сегментни, Безијер итд (слика 4.30). Из падајуће листе изабрати **Rectangular** за правоугаони попречни пресек.



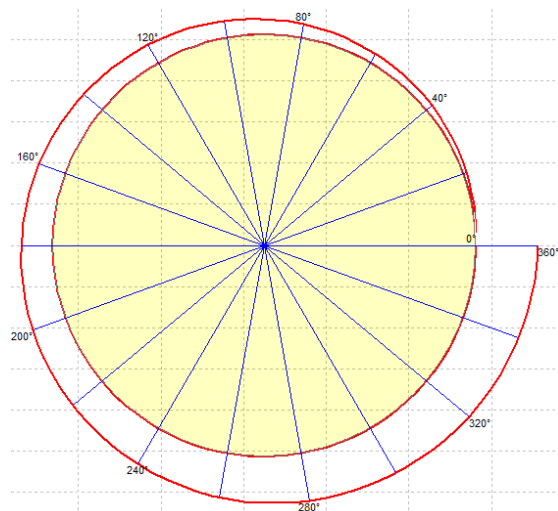
Слика 4.30 Понуђени попречни пресеци спирале

Након одабраног попречног пресека потврдом на дугме **OK**, следи дефинисање отварања спиралног кућишта кликом на команду **Spiral development areas** (слика 4.31). Постоје три начина отварања спирале: **Pfleiderer**-ов, **Stepanoff**-ов или начин дефинисња корисника (**Self**).



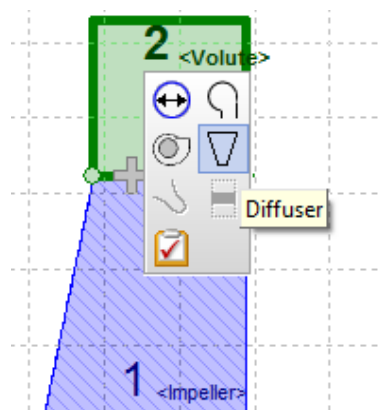
Слика 4.31 Опција за дефинисање развоја спирале

Pfleiderer-ов начин отварања спирале користи једначину: $c_u \cdot r^x = \text{const.}$, при чему је c_u - константна апсолутна брзина, $c_u \cdot r$ - коснтантно вртложење а x - експонент вртложења. Код **Stepanoff**-овог начина користи је једначина: $c_u = \text{const.} = k_s \cdot \sqrt{2gH}$, где је k_s - емпиријски фактор који је у зависноти од специфичне брзине обртања радног кола. Изабрано је развијање спирале по **Stepanoff**-ову (слика 4.32).



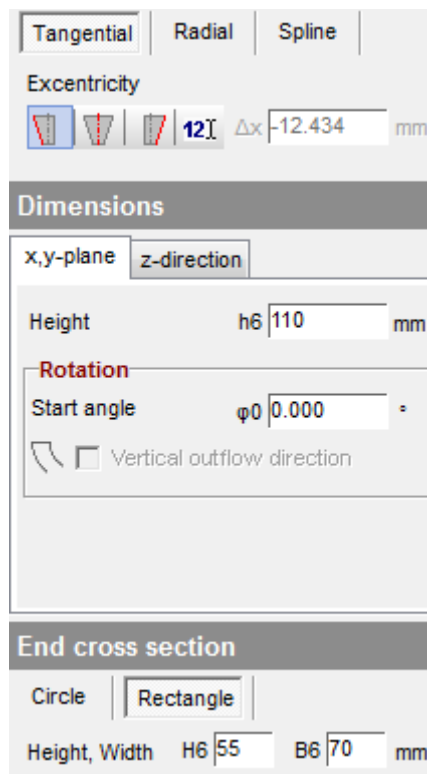
Слика 4.32 Усвојено отварање спирале по Степанофу

Предпоследња команда у дефинисању геометрије спиралног кућишта је дефинисање дифузора. То се остварује кликом на опцију **Diffuser** (слика 4.33).



Слика 4.33 Опција за дефинисање дифузора

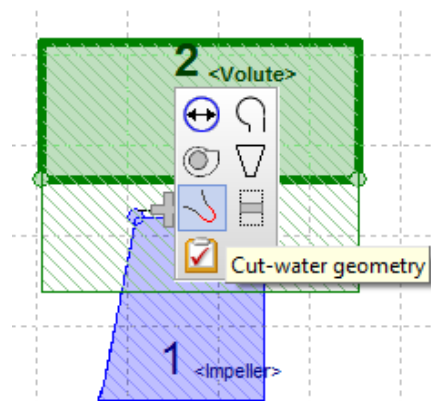
Уласком у ову опцију потребно је дефинисати да је дифузор постављен тангентан на завршетак спирале, затим да је приближно у висини са спирланим кућиштем (110 mm) и да је правоугаоног попречног пресека, стим да је ширине (70 mm) колико и спирално кућиште (слика 4.34).



Слика 4.34 Подешавање дифузора

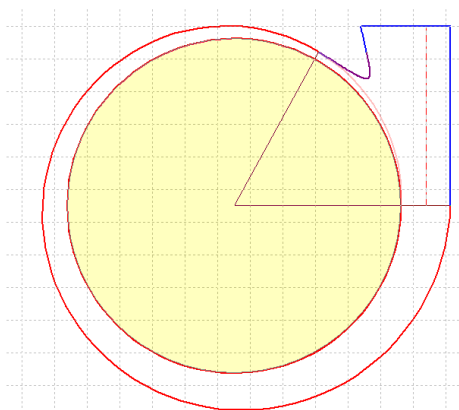
Активирањем команде **OK**, завршава се са дефинисањем дифузора.

Последњи корак представља дефинисање спајања спиралног кућишта и дифузора кликом на опцију **Cut-Water** (слика 4.35). Спајање се може извести на два начина: **Simple** (једноставно), и **Fillet** (заобљавањем).



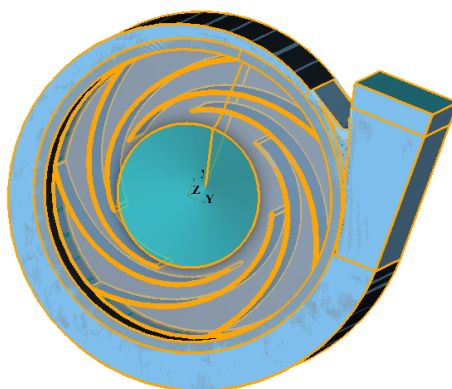
Слика 4.35 Опција за дефинисање спајања спирале и дифузора

У суштини оба случаја се свде на заобљавање ивица на месту пресека спирале и дифузора, стим што се то код опције **Fillet** врши у равни пресека. У овом случају је изабрана опција **Simple**, где је заобљење дефинисано угаоним положајем $\varphi_{c,0}$, додатно дифузор се може изместити у радијалном правцу за вредност Δr_c да би се смањило преклапање спирале и дифузора (слика 4.36).



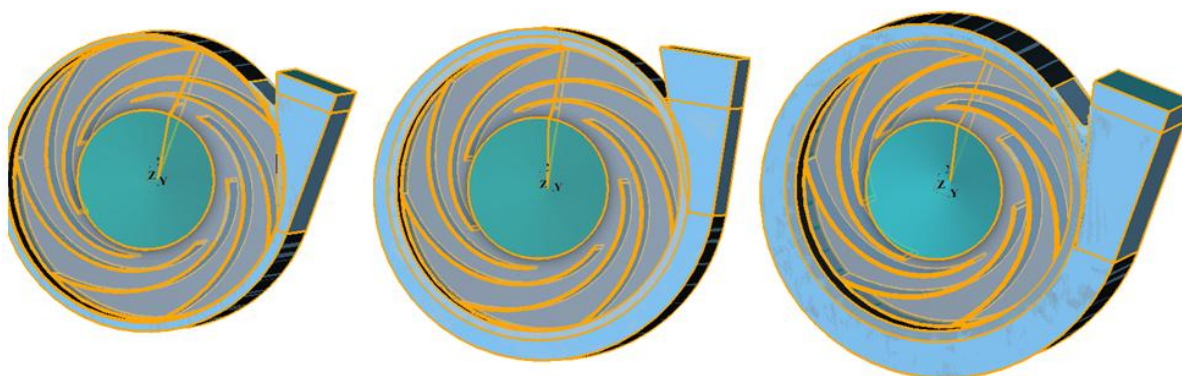
Слика 4.36 Спајање спирале и дифузора

На крају се добија геометрија спиралног кућишта за радно коло центрифугалног вентилатора од 18 000 обраћаја у минути (слика 4.37).



Слика 4.37 Геометрија радног кола и спиралног кућишта

Поступак добијања геометрије спиралног кућишта за преостала два случаја када су бројеви обраћаја 10000 и 14000 обраћаја у минути, је потпуно исти, стим што се за дефинисање геомтрије спиралног кућишта започиње од датих радних кола. Из подешавања се може увидети да са порастом броја обраћаја, радно коло се смањује, а спирално кућиште постаје веће (слика 4.38).



1.) Центрифугални вентилатор
Број обраћаја, $n_1=10000$ o/min.
Пречник радног кола $d_2=342$ mm.

2.) Центрифугални вентилатор:
Број обраћаја, $n_2=14000$ o/min.
Пречник радног кола, $d_2=246$ mm.

3.) Центрифугално вентилатор:
Број обраћаја, $n_3=18000$ o/min.
пречник радног кола, $d_2=188$ mm.

Слика 4.38 Упоредни приказ добијене геометрије

5. НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА ЦЕНТРИФУГАЛНОГ ВЕНТИЛАТОРА

5.1 Нумеричка анализа

Нумеричка анализа је грана математике која се бави проналажењем приближних решења за проблеме чије тачно решење није могуће, или је неизводљиво.

При решавању многих практичних проблема, теоријска математика може доказати да постоји решење или да је јединствено, али не и дати поступак доласка до тог решења. Зато **нумеричка анализа** има за циљ да пронађе приближно нумеричко решење одређеног проблема, да би се оно могло искористити у разним инжењерским дисциплинама (као што је нпр. софтверско инжењерство).

У софтверском инжењерству најчешће се користи итеративни поступак, чије се решење приближава тачном, али због коначног броја понављања увек незнатно одступа. Циљ је наћи решење које што мање одступа од тачног. Одступање приближног од тачног решења је грешка (нпр. апсолутна, релативна, грешка приближне вредности функције, итд).

Неке од нумеричких метода су: Метода коначних разлика (FDM), метода коначних елемената (FEM), метода коначних запремина (FVM), метод спектралних елемената, слободна мрежа метода (FMM) итд.

У случају нумеричке анализе центрифугалног вентилатора, коришћени је метод је метод коначних запремина (FVM).

Метод коначних запремина користи интегралну форму конзервативних једначина као полазну тачку. Први га је користио McDonald за симулацију 2Д невискозног флуида. Простор који треба решити је подељен на коначан број континуалних контролних запремина и за сваку контролну запремину се примењују конзервативне једначине. У средини сваке контролне запремине налази се прорачунски чвор у коме је потребно израчунати променљиве. Интерполација се користи за добијање вредности променљивих на површини контролне запремине у зависности од чворне вредности контролне запремине. Површински и запремински интеграл се апроксимирају коришћењем одговарајућих квадратурних формула. Као резултат добија се алгебарска једначина за сваку контролну запремину у којој се појављују вредности суседних чворова.

Метод коначних запремина може се прилагодити било ком типу мреже, па је због тога прикладан за сложене геометрије. Мрежа дефинише само границе контролне запремине и није потребно поклапање са осама координатног система. Метод је конзервативан по конструкцији све док су површински интеграл, који представљају конвективне и дифузионе флуксе, једнаки за контролне запремине које деле границу. Метод коначних запремина је можда најлакши за разумевање и програмирање. Сви чланови, који морају бити апроксимирани, имају физичко значење због чега је популаран код инжењера.

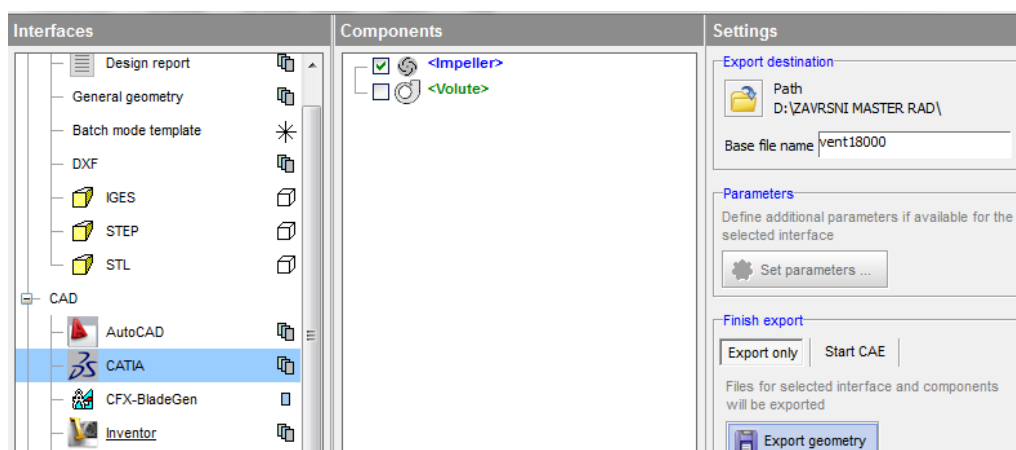
5.2 Анализа вентилатора у програмском пакету Ansys

Ansys представља програмски пакет за нумеричку анализу и велики опсег механичких проблема. Ти проблеми обухватају статичку као и динамичку структурну анализу (линеарне и нелинеарне), пренос топлоте, проблем струјања флуида, као и акустичне и електромагнетне проблеме у свакодневном свету инжењеринга.[6]

У овом мастер раду показате се поступак решавања струјања радног флуида кроз центрифугални вентилатор чија је брзина обртаја 18000 у минути. Решавање проблема се састоји из три целине: дефинисање геометрије CAD модела, генерисање прорачунске мреже, и нумеричка симулација.

5.2.1 Пројектовање виртуелног CAD модела радног кола и спирале

Добијена геометрија физички представља скуп тачака и линија које је потребно пројектовати у виртуелни CAD модел који ће се касније користити у нумеричкој анализи. Да би се то извело потребно је претходно формирану геометрију експортирати у програмски пакет **CATIA V5R20**. Потребно је трансформисати одвојене геометрије радног кола и спирале коришћењем команде **Export** у програмском пакету **CFturbo**. Активирањем ове опције отвара се нови прозор у коме је потребно дефинисати коју геометрију желимо да експортујемо и за коју врсту програмског пакета (слика 5.1).



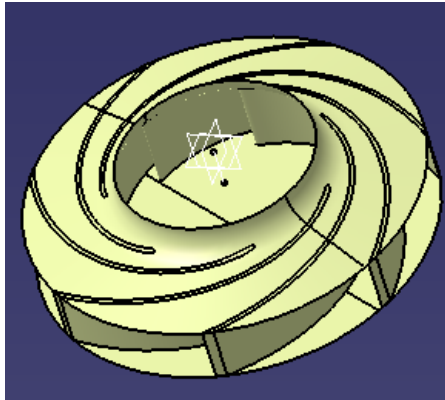
Слика 5.1 Експортовање геометрије у сафтвер Catia V5R20

Укључивањем опције **Impeller** и активирањем команде **Export geometry**, трансформише се геометрија радног кола за учитавање у програмски пакет **CATIA V5R20**. За пројектовање спиралног кућишта потребно је укључити опцију **Volute**. На овај начин добијају се датотеке под екстензијом CATIA Script (слика 5.2) помоћу којих се врши учитавање геометрије.

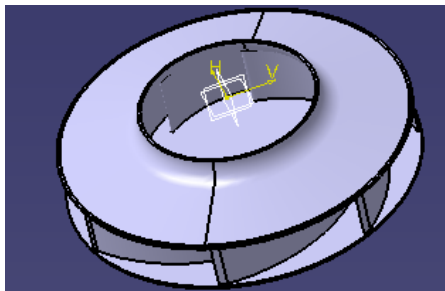
	radno kolo v18000	3/3/2014 3:07 PM	CATIA Script	179 KB
	spiralno kuciste v18000	3/3/2014 3:09 PM	CATIA Script	2,779 KB
	vent18000	3/4/2014 10:33 AM	Turbo design by C...	35 KB

Слика 5.2 CATIA Script фајлови за модификовање геометрије путем Catia-e

По учитаном Script фајлу (слика 5.3) за радно коло у програму CATIA-e коришћењем одређених типских форми врши се формирање CAD модела. (слика 5.4)

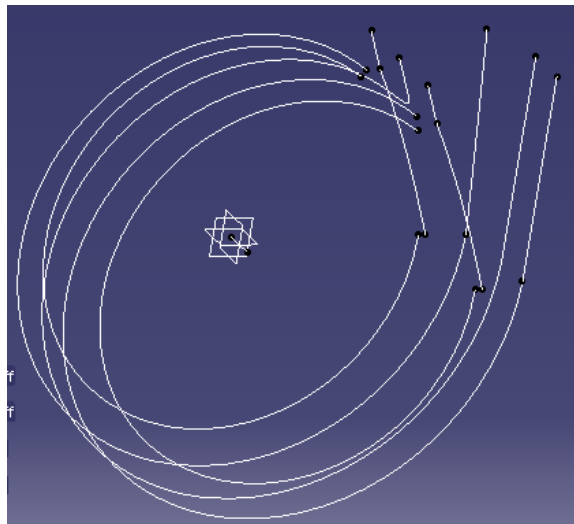


Слика 5.3 CATIA Script учитан у Catia-и



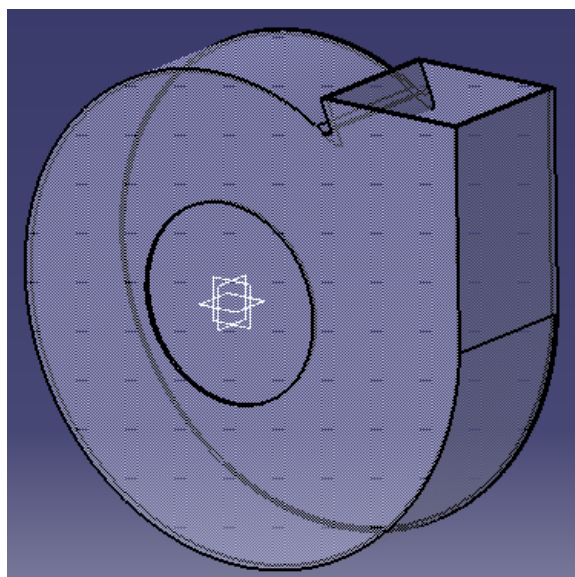
Слика 5.4 CAD модела радног кола

По уčitаном Script фајлу спирланог кућишта у Catia-и ће се добити скуп ививца и тачака спирланог кућишта (слика 5.5).



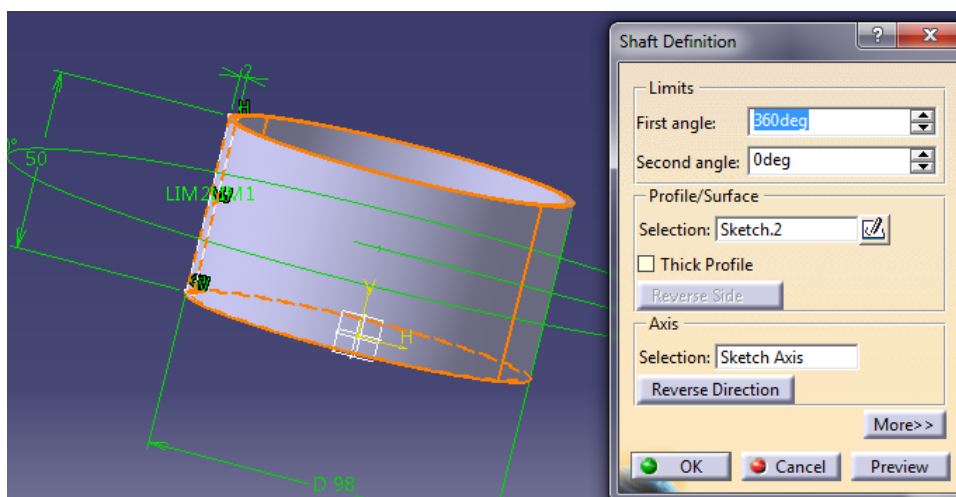
Слика 5.5 Учитани CATIA Script фајл спирланог кућишта

Као у случају радног кола, након низа операција (**Pad**) формира се CAD модел спиралног кућишта (слика 5.6).



Слика 5.6 CAD модел спирланог кућишта

Као и за радно коло тако и за спирлано кућиште важи да је процес добијања тела пуних запремина спирала за преостала два случаја вентилатора од 14 и 10 000 обртаја у минути, потпуно исти само се учитавају дати CATIA Script фајлови.

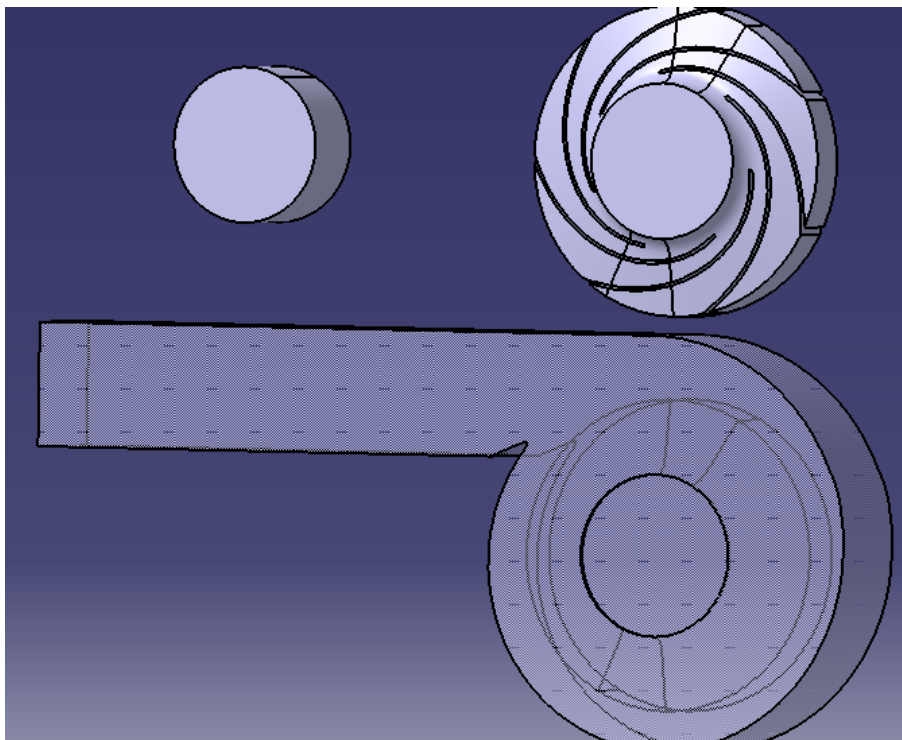


Слика 5.7 Формирање CAD модела усисног грла

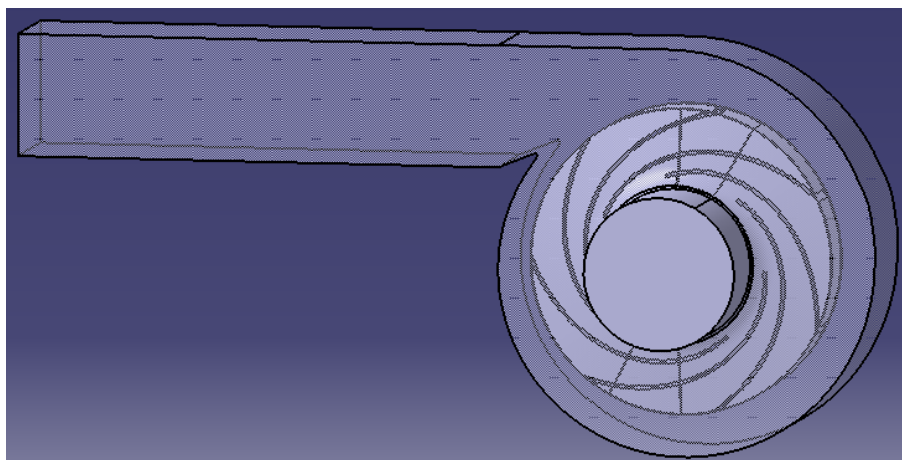
Остао је још формирања усисног грла, дебљина његовог зида је 2 mm, пречник му је сагласан пречнику улаза у радно коло (98mm), висина му је усвојена да буде 50 mm, и изводи се коришћењем **Shaft** типске форме (слика 5.7). Усисна грла код преостала два случаја се такође исто формирају само су других димензија сагласно улазном пречнику радних кола (код радног кола од 10 000 обртаја пречник је 175 mm, док је код радног кола од 14 000 обртаја у минути, пречник приближно 127 mm).

За потребе нумеричке анализе неопходно је формирати геометрију центрифугалног вентилатора, састављену од флуидних делова (слика 5.8) тј. запремине коју радни флуид заузима од улаза до излаза из вентилатора. Тако да након низа **Boolean** добијају се флуидни делови и касније склоп флуидних делова вентилатора

(слика 5.9). Треба напоменути да је флуидни део дифузора спирланог кућишта продужен за 300 mm ради тачнијег прорачуна у нумеричкој анализи.

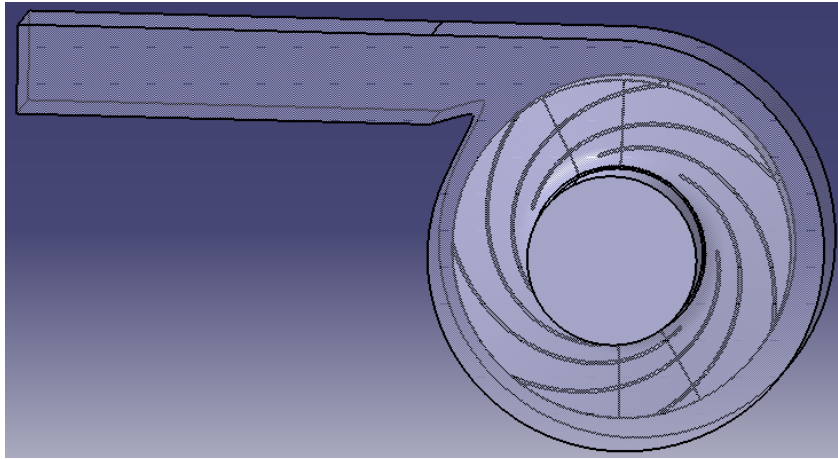


Слика 5.8 Флуидни делови вентилатора од 18000 обртаја

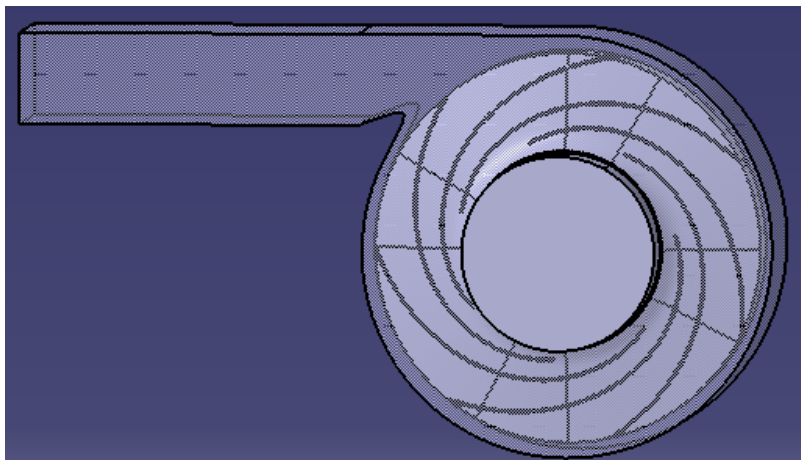


Слика 5.9 Склоп флуидних делова вентилатора од 18000 обртаја

Не претходно описан начин се долази и до добијања флуидних делова и њиховог формирања траженог склопа, тако да ће бити дат само приказ добијених склопова, за вентилатор од 14000 (слика 5.10) и вентилатор од 10000 обртаја у минути (слика 5.11).



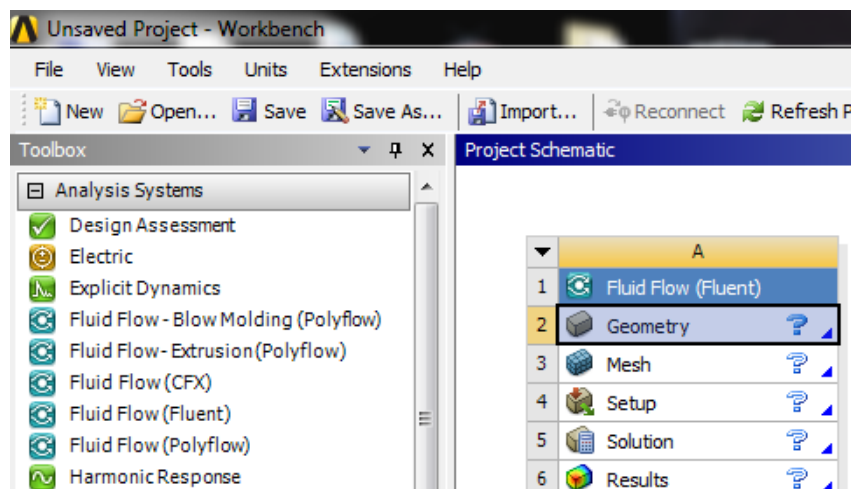
Слика 5.10 Склоп флуидних делова вентилара од 14000 обртаја



Слика 5.11 Склоп флуидних делова вентилатора од 10000 обртаја

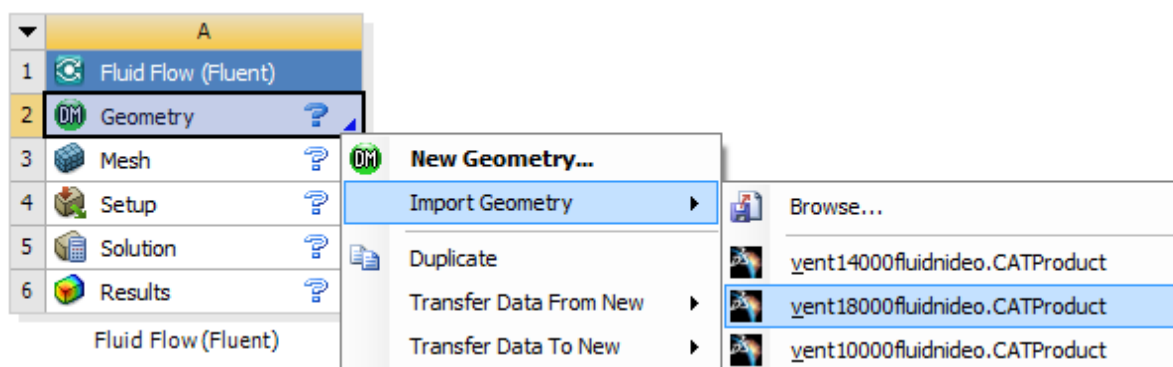
5.2.2 Генерисање прорачунске мреже

Следећи корак је дискретизација физичког простора у коме се врши прорачун. Превући систем **Fluid Flow (Fluent)** на радну површину (слика 5.12) [8].



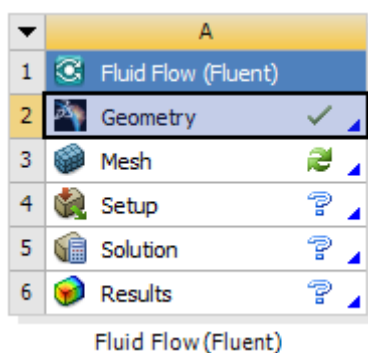
Слика 5.12 Одељак **Fluid Flow (Fluent)** у *Ansys*-у.

Прво је потребно учитати геометрију флуидног дела вентилатора (слика 5.13), у делу **Geometry**, да би се касније након тога генерисала мрежа [10].



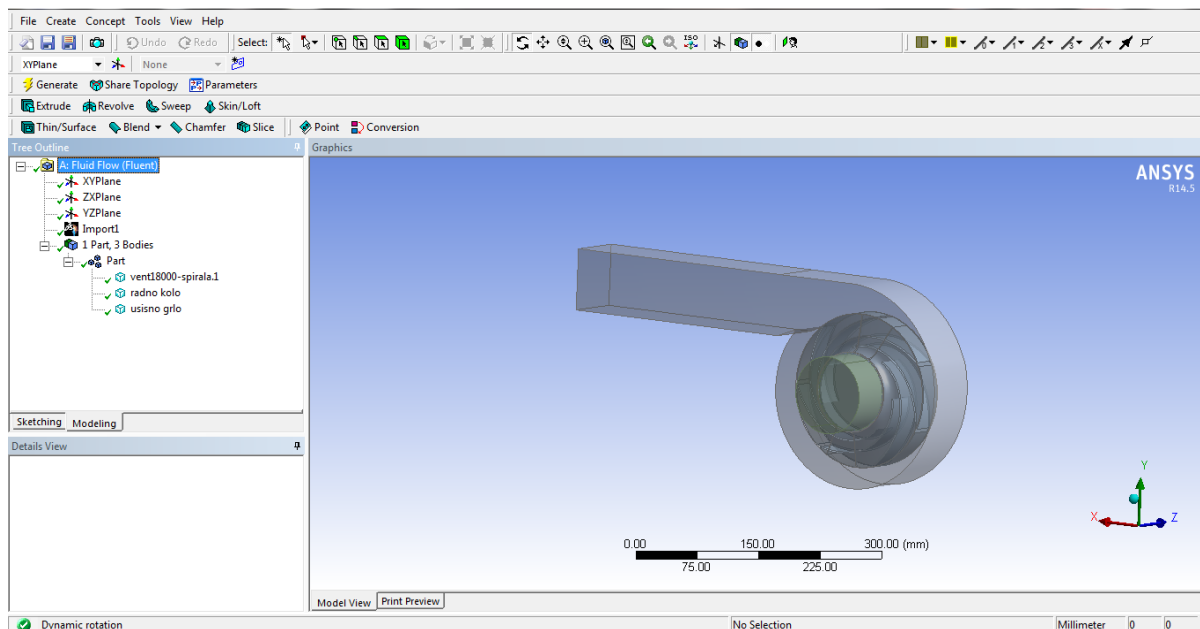
Слика 5.13 Уношење добијене геометрије флуидног дела вентилатора

Након унете геометрије одељак **Geometry** ће се променити у иконицу уčitаног фајла, а са десне стране ће се појавити знак , што значи да је геометрија успешно учитана (слика 5.14).



Слика 5.14 Успешно унета геометрија

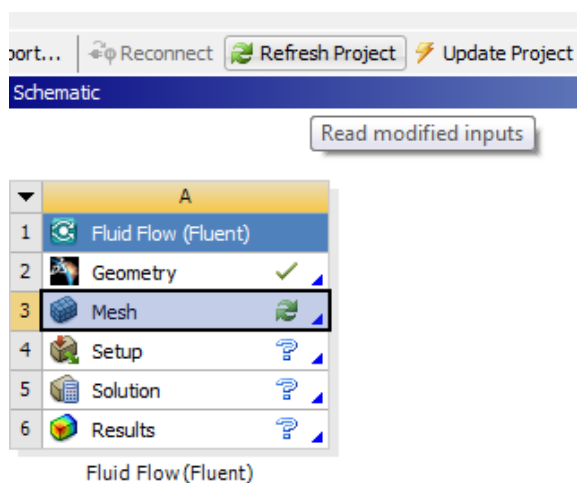
Пре преласка на одељак **Mesh**, потребно је отворити учитану геометрију како би се извршило преименовање делова вентилатора ради лакшег распознавања. Двоструки левим тастер миша на одељак **Geometry**, отвара се модул **Design modeler** (слика 5.15).



Слика 5.15 Изглед формиране геометрије у модулу **Design modeler**

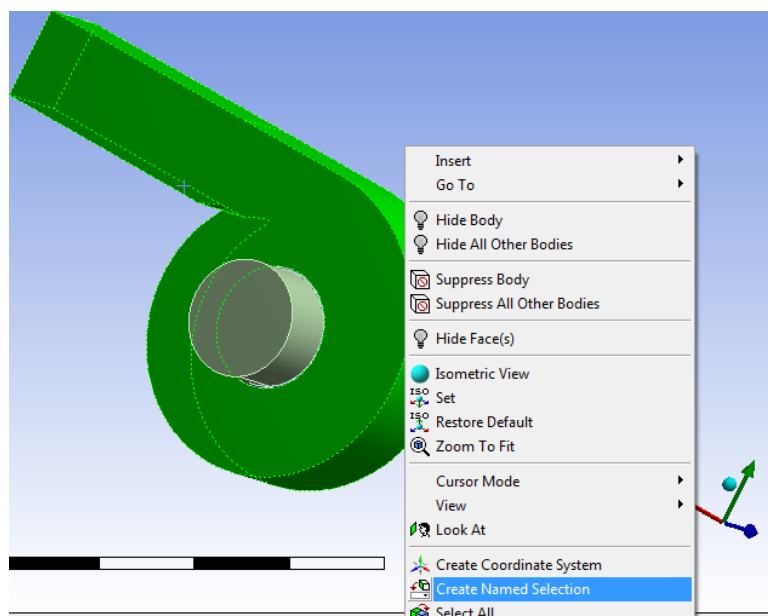
Селектовати преименоване запремине, притиснути десни тастер миша и из падајуће листе изабарати команду **Form New Part**. На овај начин омогућено је формирање конформних мрежа између запремина склопа. Затворити **Design modeler** на **File-close**. [9]

Следећи корак обухвата дискретизацију (меширање) запремине склопа. Сада је потребно геометрију учитати у модул за генерисање мреже. Активирати комадну **Refresh Project** (слика 5.16).



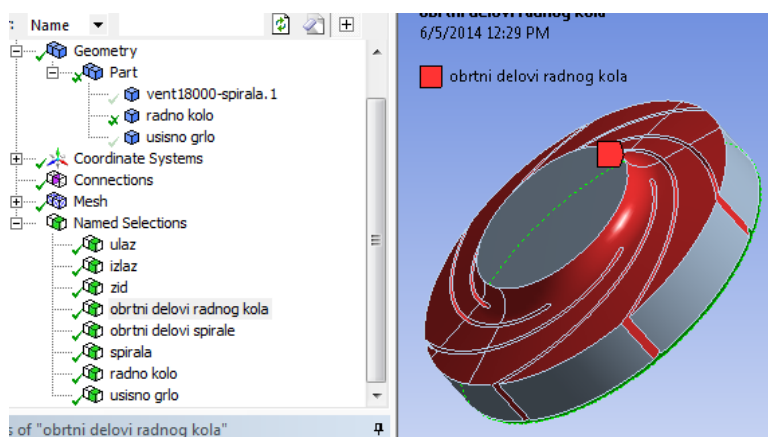
Слика 5.16 Освежавање секције за меширање

По уласку у модул за меширање (**Meshing**) неопходно је именовати све површине и запремине склопа ради лакшег препознавања у добијеним резултатима након нумеричке симулације. Активирањем команде **Face** могуће је селектовати само површине. Селектовати жељену површину, притиснути десни тастер миша десним тастером миша и из падајуће листе изабрати опцију **Create Named Selection**. Отвара се дијалог у коме се дефинише име. На овај начин формирају се гранични услови (“ulaz”, “izlaz”, “zid”, “obrtни delovi spirale”, “obrtни delovi radnog kola”) (слика 5.17).



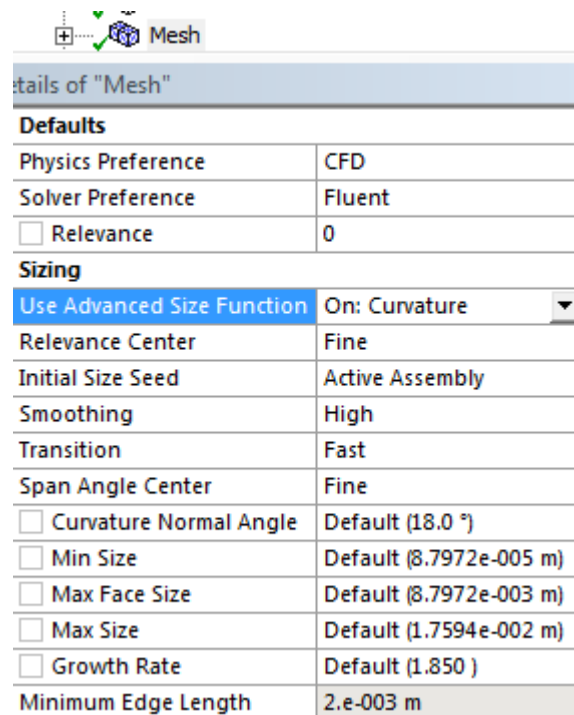
Слика 5.17 Именовање површине у овом случају селектована је површина спољашњег зида спирале

Активирањем команде **Body**  могуће је селектовати само запремине. Извршити преименовање запремина у “spirala”, “radno kolo”, “usisno grlo” према претходно описаној процедури. (слика 5.18).



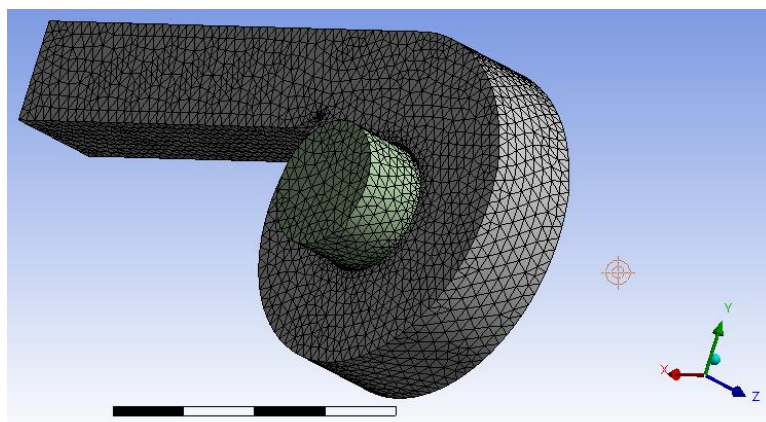
Слика 5.18 Селектоване и именоване површи које представљају обртни део радног кола

Након дефинисање граничних услова, потребно је дефинисати параметре генерисања прорачунске мреже. Тип прорачунске мреже је аутоматски подешен у тетраедре. Левим тастером миша на грану **Mesh** и у оквиру гране **Sizing** извршити подешавања према слици 5.19.



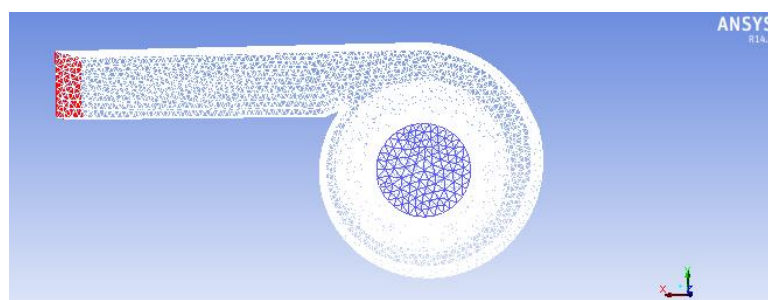
Слика 5.19 Подешавање везано за мрежу коначних запремина

Активирати команду **Generate mesh**. Након одређеног времена долази до формирања прорачунске мреже (слика 5.20).



Слика 5.20 Изглед добијене мреже коначних запремина вентилатора

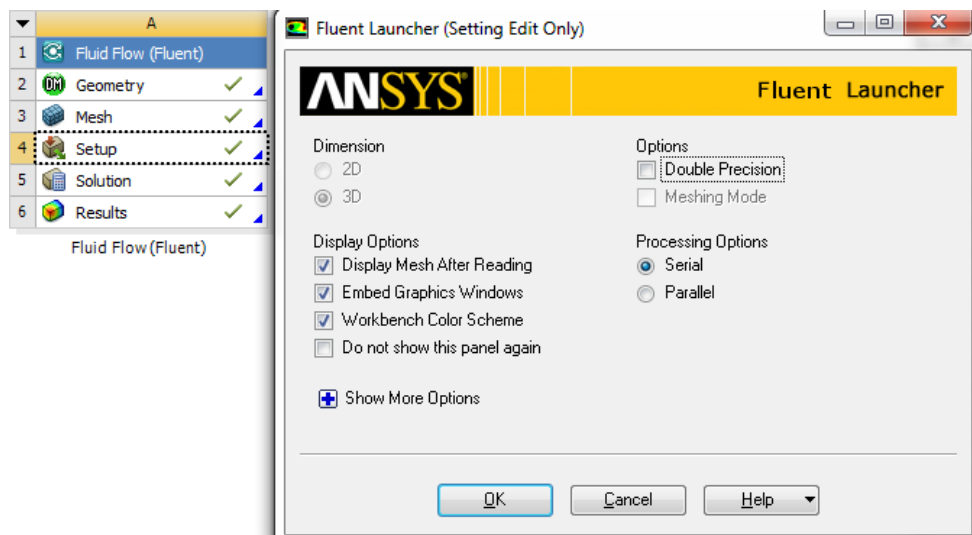
Овако добијену мрежу је потребно учитати у модул за решавање (слика 5.21).



Слика 5.21 Изглед прорачунске мреже учитане у модул за решавање

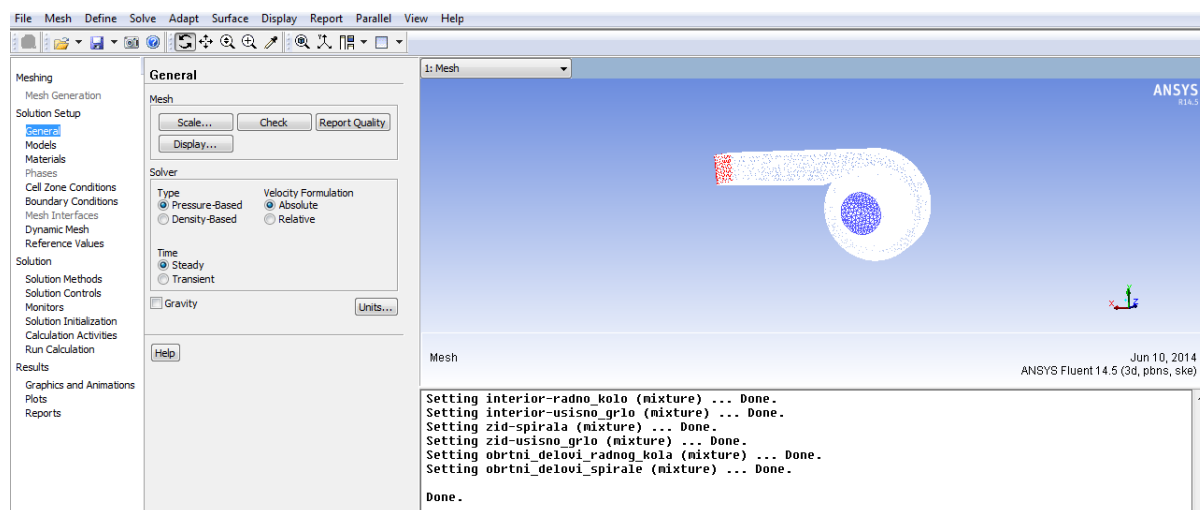
5.2.3 Нумеричка симулација

Приликом покретања модула **Fluent** отвара се почетни прозор у коме се врше нека основна подешавања (серијско или паралелно решавање, димензија проблема 2Д или 3Д...).



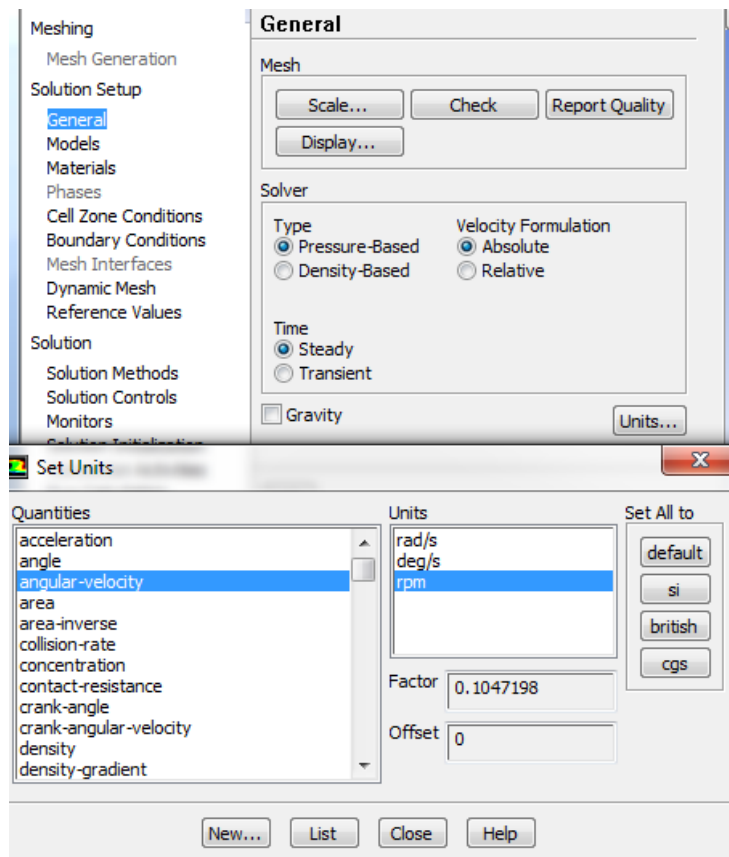
Слика 5.22 Подешавање Fluent-а пре његовог покретања

Након активирања команде **OK** покреће се модул **Fluent**. Пре почетка нумеричке симулације потребно је извршити одређена подешавања (слика 5.23)[11].



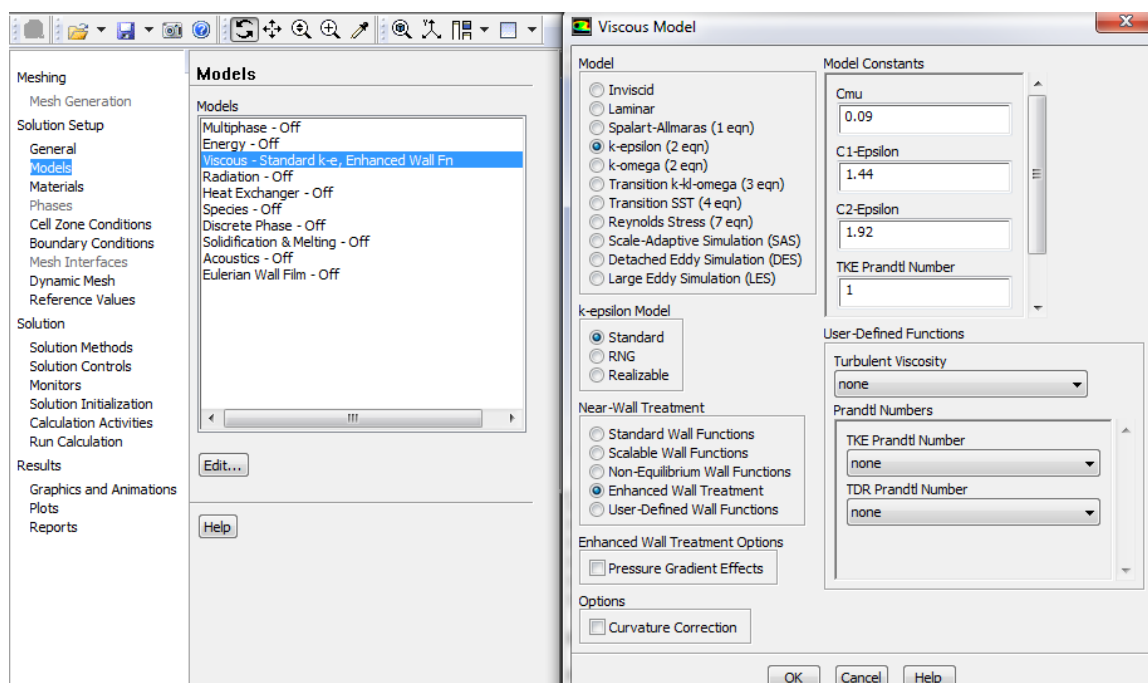
Слика 5.23 Радно окружење Fluent-а

Прво у низу од тих подешавања представља дефинисање начина кретања покретних делова генерисане мреже. У овом случају то представља кружно кретање радног кола које се мери бројем обртаја у минути (rpm). Ово подешавање се врши активирањем команде **Units** у ковиру одељка **General** и ту треба селектовати поменуто кретање и његову основну јединицу (слика 5.24).



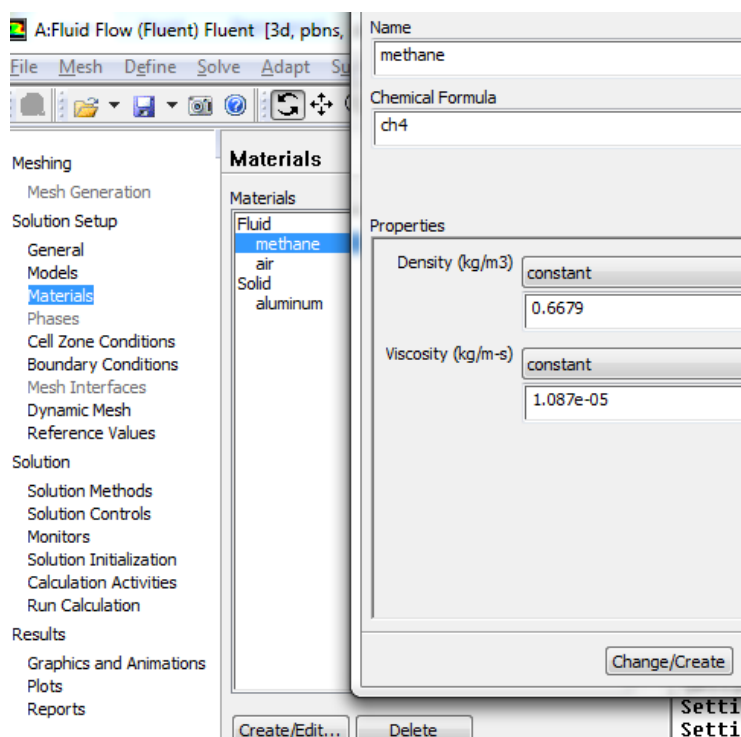
Слика 5.24 Дефинисање начина кретања покретних делова мреже

Следећи корак представља одабирање математичког модела који одговара турбулентном режиму струјања, активирањем команде **Edit** у оквиру одељка **Models**. При анализи турбулентног режима струјања изабран је турбулентни модел ***k-epsilon (2 eqn)***. Активирана је опција Enhanced Wall Treatment.



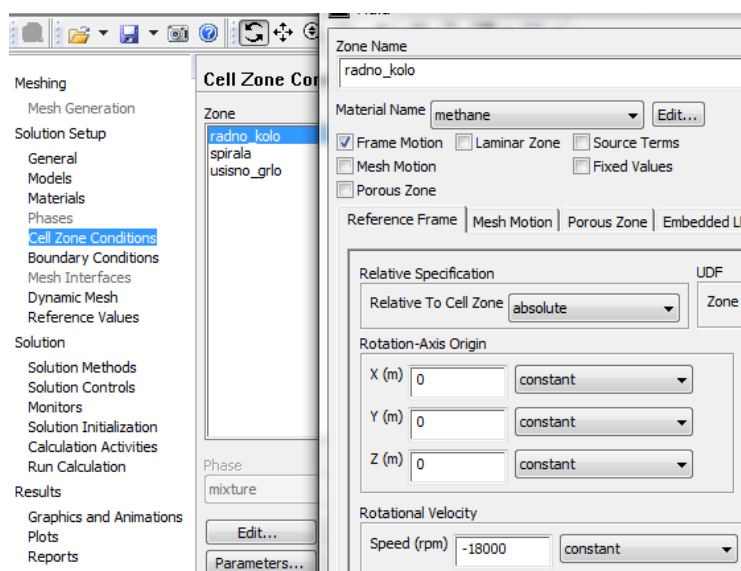
Слика 5.25 Одабирање математичког модела ***k-epsilon (2 eqn)***

Након изабраног математичког модела потребно је дефинисати радни флуид. Активирати команду **Create/Edit** у оквиру одељка **Materials** (слика 5.26).



Слика 5.26 Дефинисање радног флуида

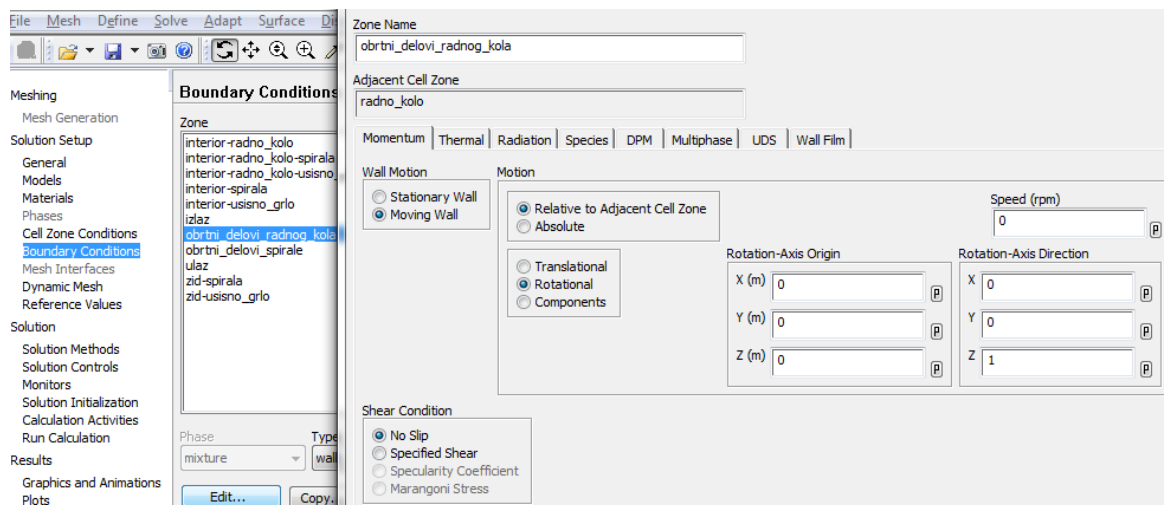
Следећи корак представља дефинисање стања запремине где се дефинишу покретне запремине и радни флуид запремина.



Слика 5.27 Дефинисање стања запремине радног кола

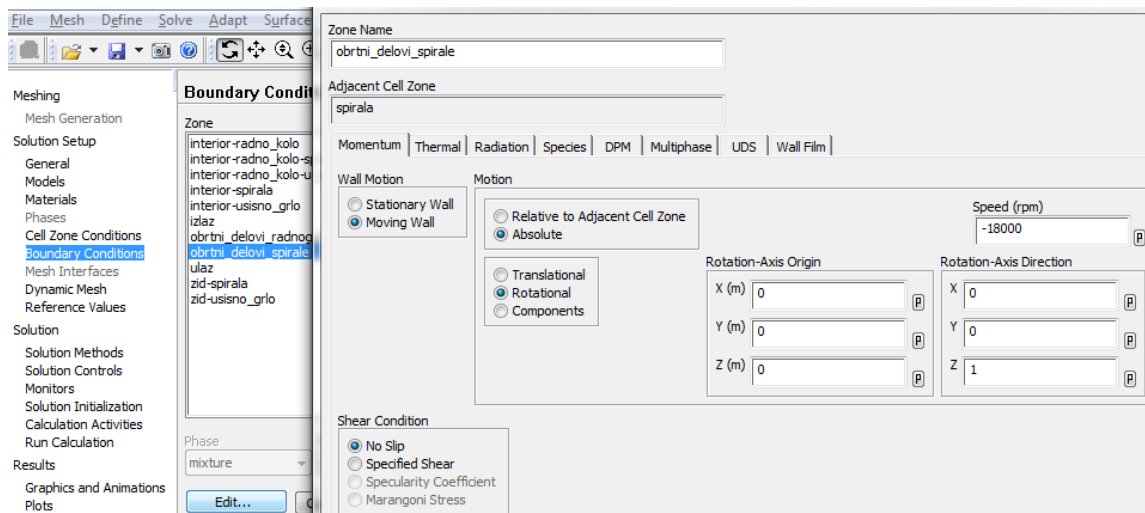
За све три запремине (радно коло, спирала, усисно грло) радни флуид је метан, једино је радно коло покретно (18000 обртаја у минути) и то треба дефинисати у секцији **Cell Zone Condition** активирањем команде **Edit** (слика 5.27). У случају спирала и усисног грла (који су непокретни елементи запремине) сличним поступком само треба дефинисати радни флуид (метан) и потврдити активирањем команде **OK**.

Поред дефинисања услова стања запремина, неопходно је дефинисати и граничне услове. Дефинисање се врши тако што се одабиром одређене зоне у делу **Boundary conditions**, активира команда **Edit** (слика 5.28).



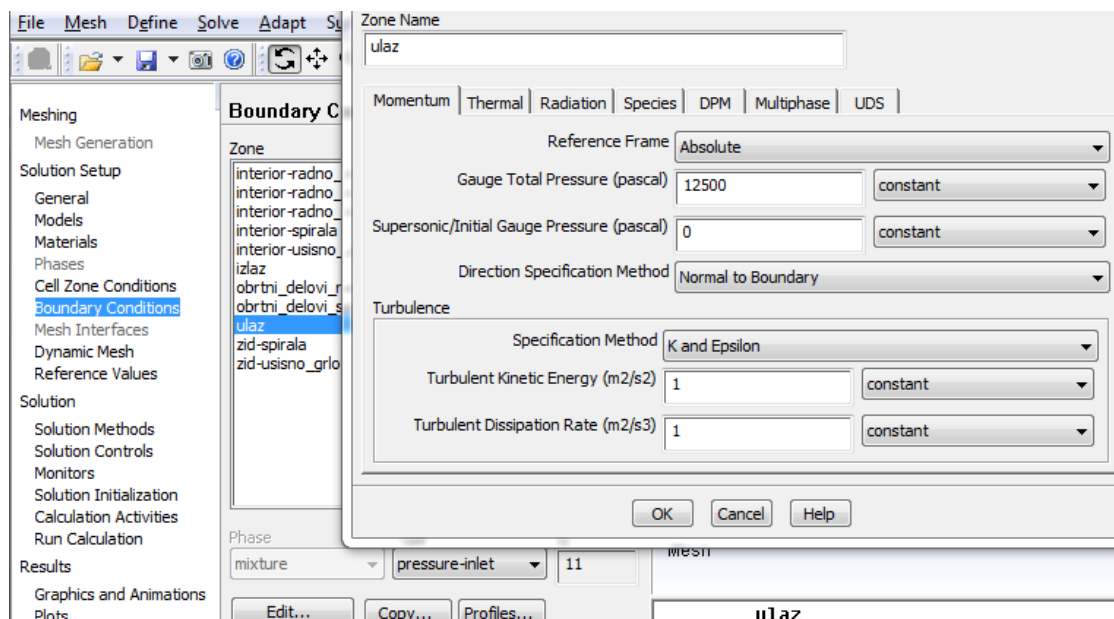
Слика 5.28 Дефинисање граничних услова за обртне делове радног кола

Као што се види са претходне слике за обртне делове радног кола (предња, задња бочна страна и лопатице) се усваја да су покретни зидови релативно у односу на одговарајућу запремину. Док се код обртних делова спирале (спољашња предња, задња бочна страна) усваја да су покретни и то апсолутно у односу на одговарајућу запремину, брзином од 18000 обртаја по минути (слика 5.29).



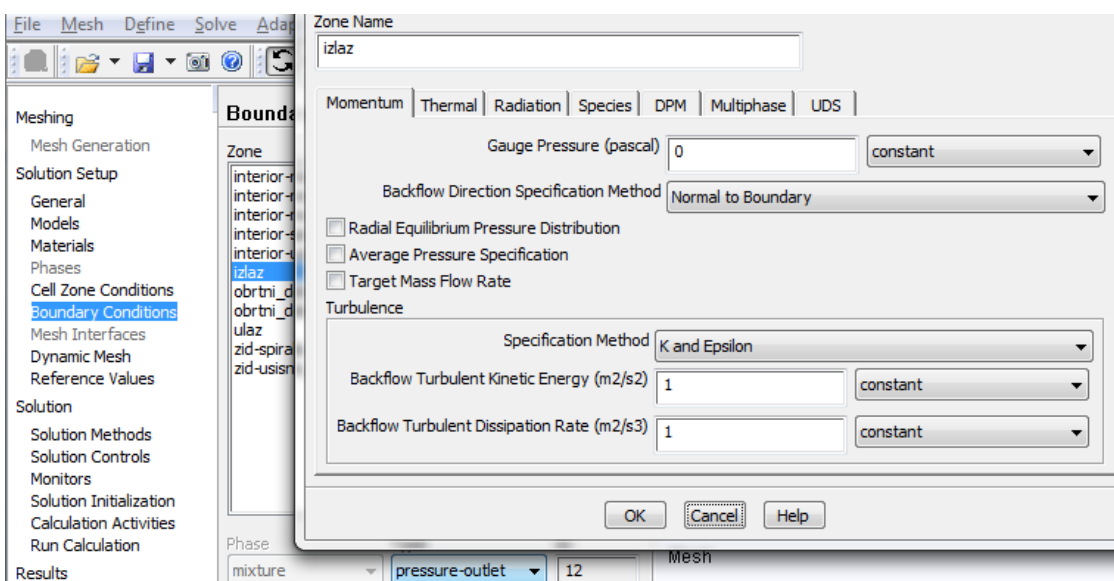
Слика 5.29 Дефинисање граничних услова обртних делова спирале

За зону “ulaz” дефинише се тип **pressure-inlet**. Вредност притиска на улазу је 12500 Па (слика 5.30).



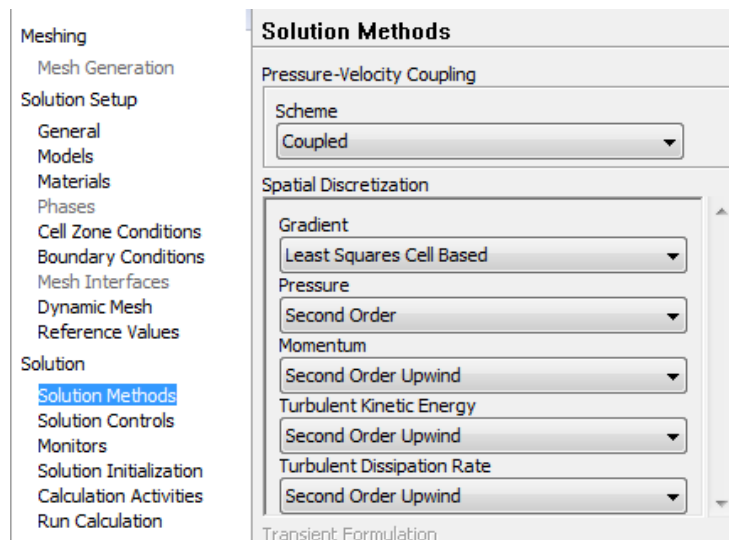
Слика 5.30 Дефинисање зоне улаза радног флуида

Остало је још да се дефинишу гранични услови на излазу. Селектовати гранични услов “izlaz”, дефинисати тип **pressure-outlet**. Вредност притска на излазу је 0 Pa (слика 5.31).



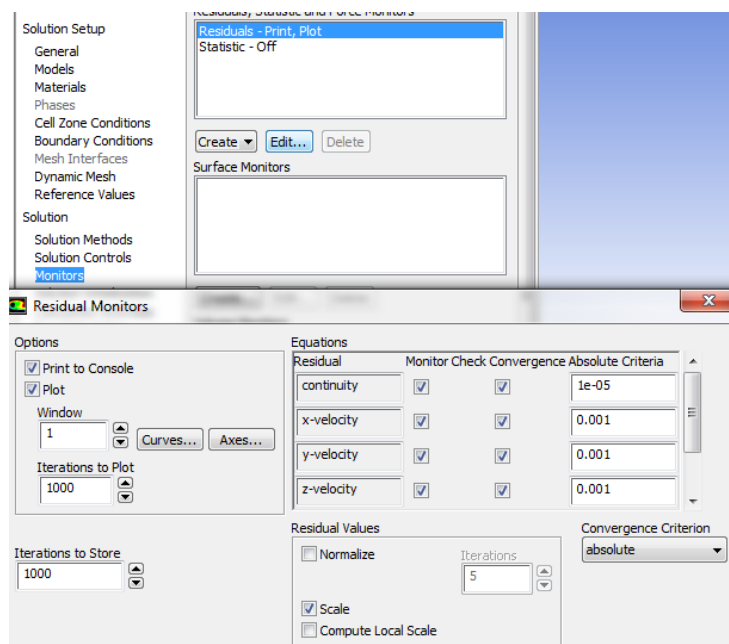
Слика 5.31 Дефинисање зоне излаза радног флуида

Параметри итеративног поступка подешавају се у одељку **Solution Methods**.



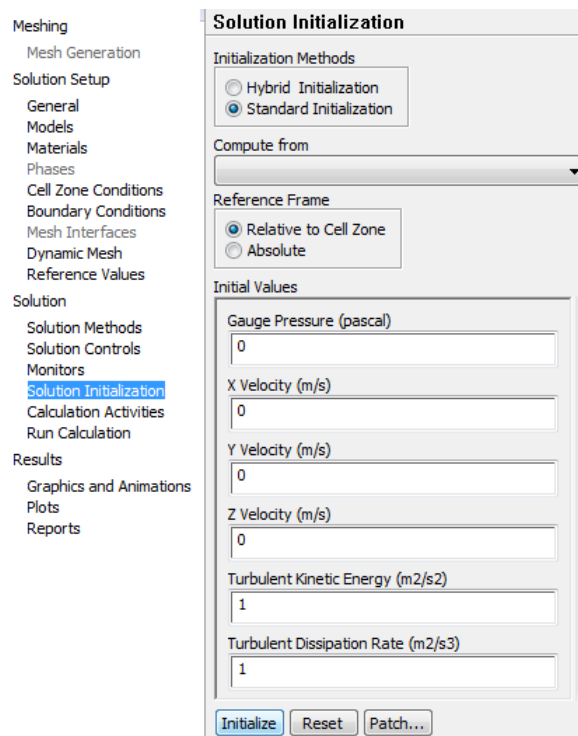
Слика 5.32 Подешавање методе решавања

Следећи корак представља дефинисање параметара за мониторинг, тј. праћење током итеративног процеса. То се врпи одабиром опције **Residuals** у секцији **Monitors**, активирањем команде **Edit**. Параметри који се прате током итеративног поступка су: једначина континуитета (continuity), параметри брзине (дуж x, y и z осе), кинетичка енергија турбуленције (k) и дисипација кинетичке енергије (epsilon). Подесити вредност критеријума конвергенције за једначину континуитета на 10^{-5} . Активирати команду Plot да би се омогућило графичко праћење итеративног поступка (слика 5.33).



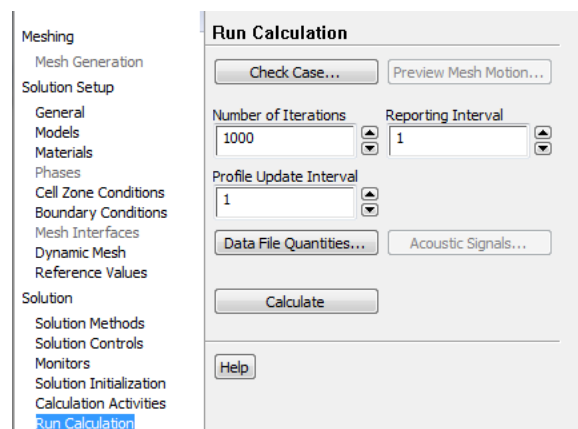
Слика 5.33 Постављање параметара за праћење током итеративног поступка

Наредни корак се састоји од постављања почетног решења тј. иницијализације итеративног процеса. Овај поступак се изводи тако што се у делу **Solution initialization** одабира стандардна иницијализација (**Standard Initialization**) и активира команда **Initialize** (слика 5.34).



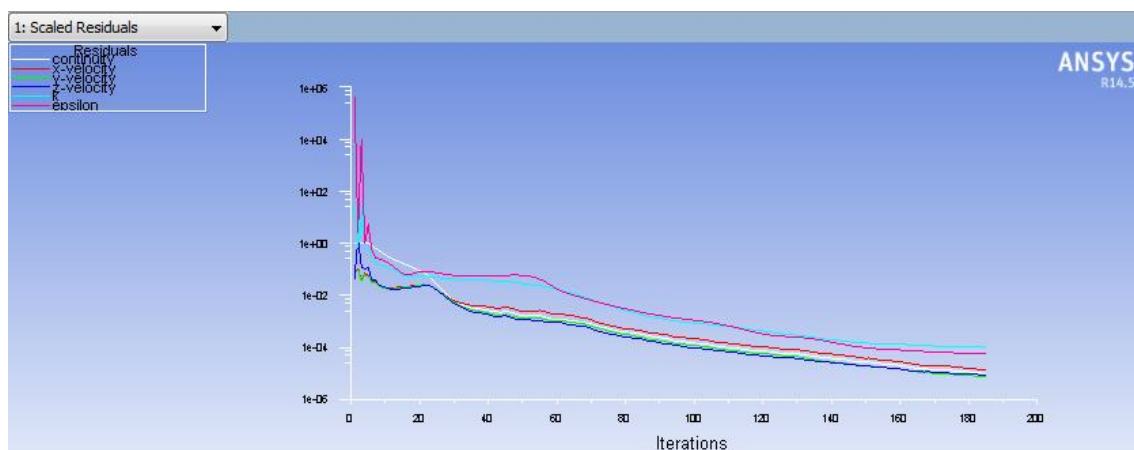
Слика 5.34 Иницијализација итеративног процеса

Након завршетка подешавања, прелази се на стартовање итеративног поступка. Стартовање се изводи у одељку **Run calculations**, где пре самог стартовња прорачуна је потребно дефинисати број итерација (1000). Прорачун започиње активирањем команде **Calculate** (слика 5.35).



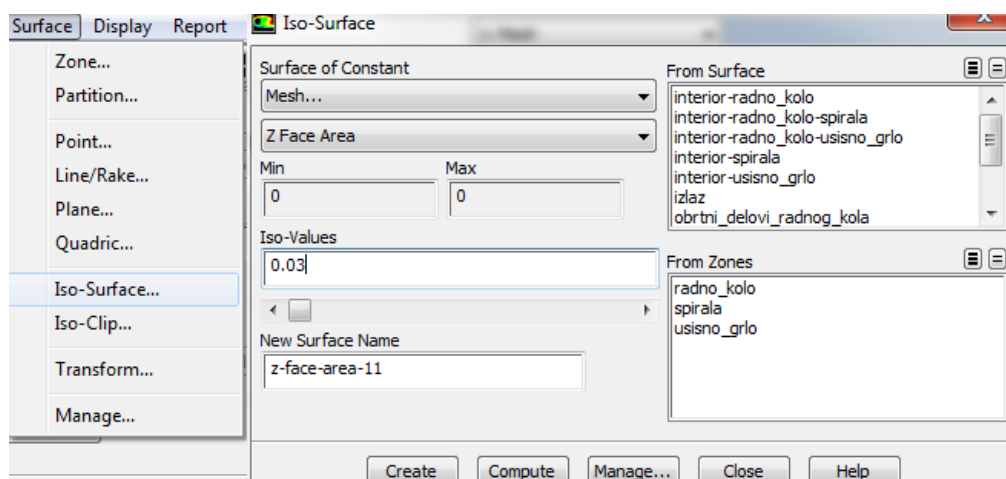
Слика 5.35 Стартовање итеративног процеса

Итеративни поступак ће се завршити при 185-ој итерацији (слика 5.36).



Слика 5.36 Графички приказ итеративног поступка

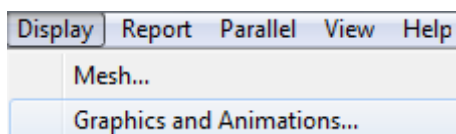
По заврешном итеративном поступку могу се приказати добијени подаци. У одабраној равни (управној на z осу) ће бити приказани вектори и линије (контуре) једнаких вредности параметара струјног тока. Најпре ће бити дефинирана раван у којој ће бити графички престављени резултати. Та раван се дефинише активирањем команде ***Iso-surface*** у одељку ***Surface*** (слика 5.37).



Слика 5.37 Дефинисање равни графичког приказа добијених резултата

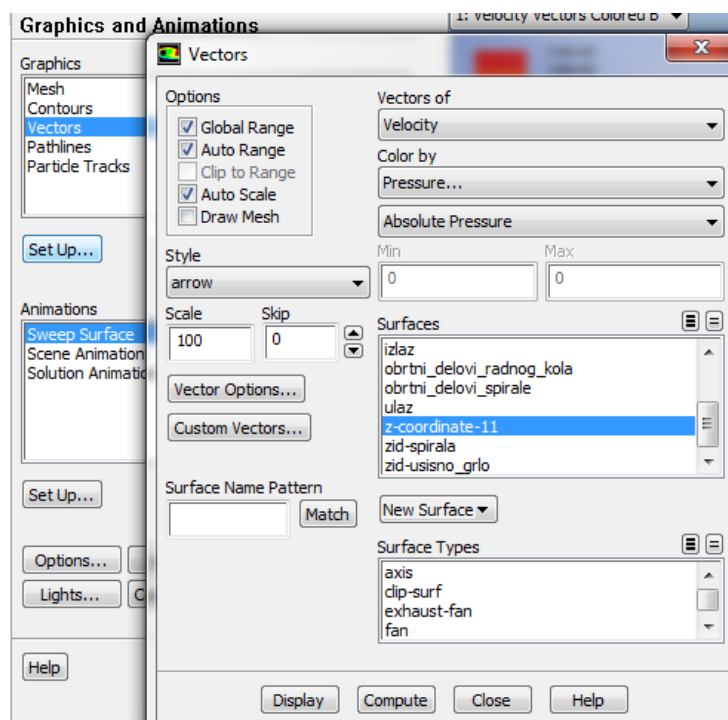
Као што се види са претходне слике у прозору опције ***Iso-surface*** одабира се да се раван управна на z осу и удаљена је од координатног почетка на 0.03 m. Активирањем команде ***Create***, креира се дата раван.

Након формирања равни прелази се на графичко приказивање добијених резултата и то се постиже активирањем команде ***Graphics and animations*** у одељку ***Display*** (слика 5.38).

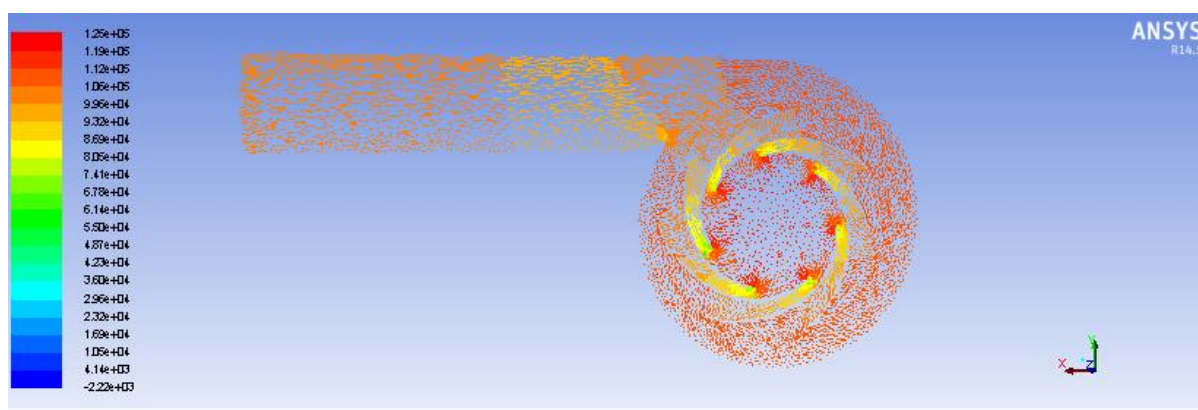


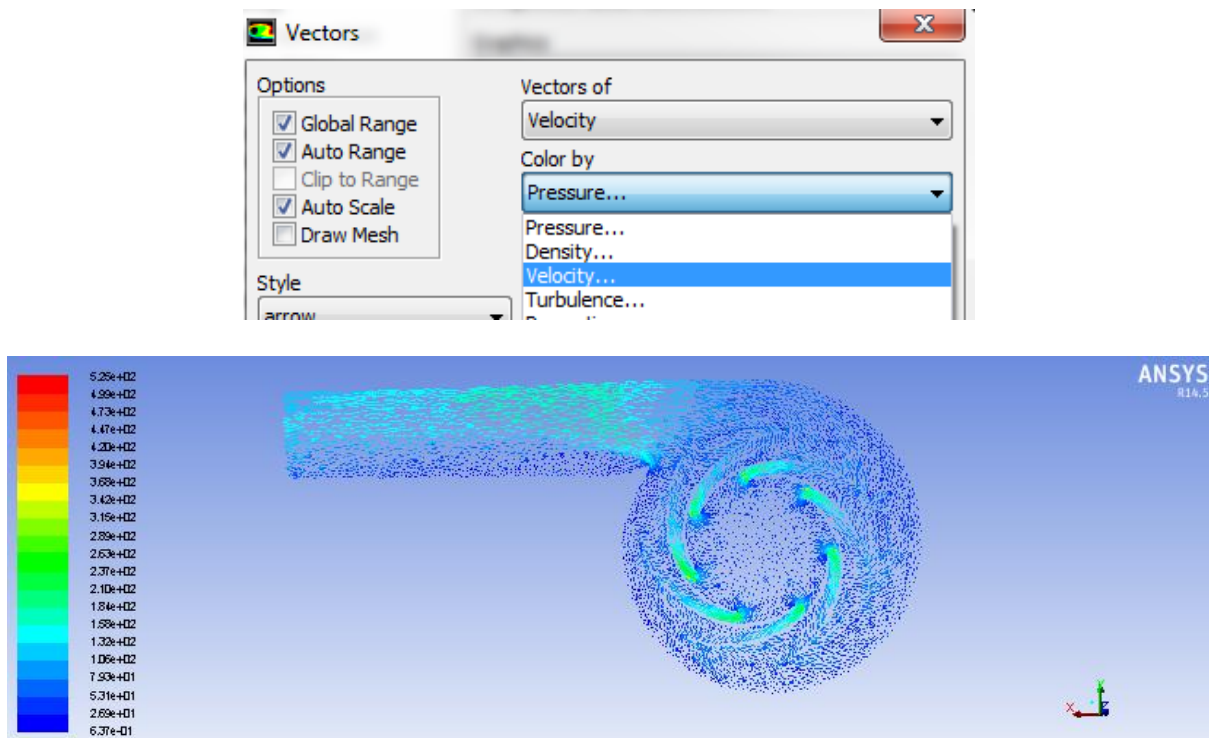
Слика 5.38 Опција за приказ резултата

Отвара се дијалог везан за резултате нумеричке анализе и његов приказ. Овде је могућ приказ мреже коначних запремина, контура, вектора, струница итд. У овом мастер раду рада приказаће се вектори као и контуре притисака, брзина и турбуленције. Одабиром поља **Vectors**, у делу **Graphics** и активирањем команде **Set up** прелази се на подешавање графичког приказивања вектора праћених параметара током итеративног поступка. Активирањем команде **Display** омогућава се графички приказ поља вектора апсолутног притиска у датој равни (слика 5.39).



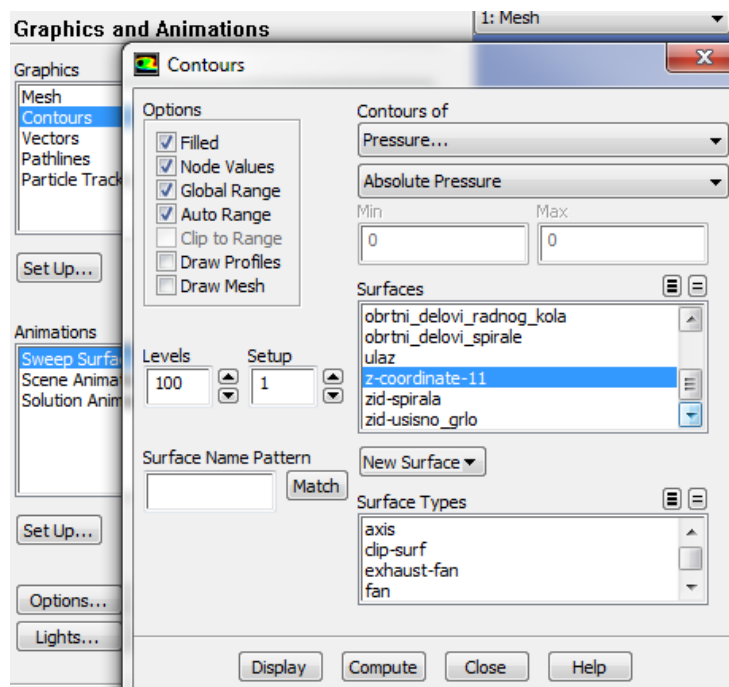
Слика 5.39 Подешавање приказивања вектора апсолутног притиска





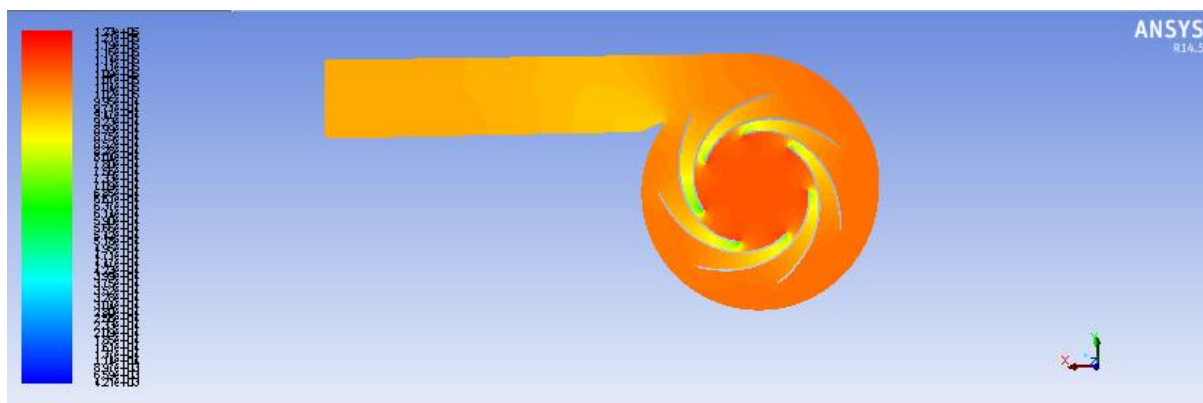
Слика 5.40 Графички приказ поља вектора брзина вентилатора од 18000 обртаја по минути

Одабиром опције **Contours**, у делу **Graphics**, и активирањем команде **Setup**, врши се прелазак у дијалог за дефинисање контура једнаких вредности параметера струјног тока (слика 5.41).

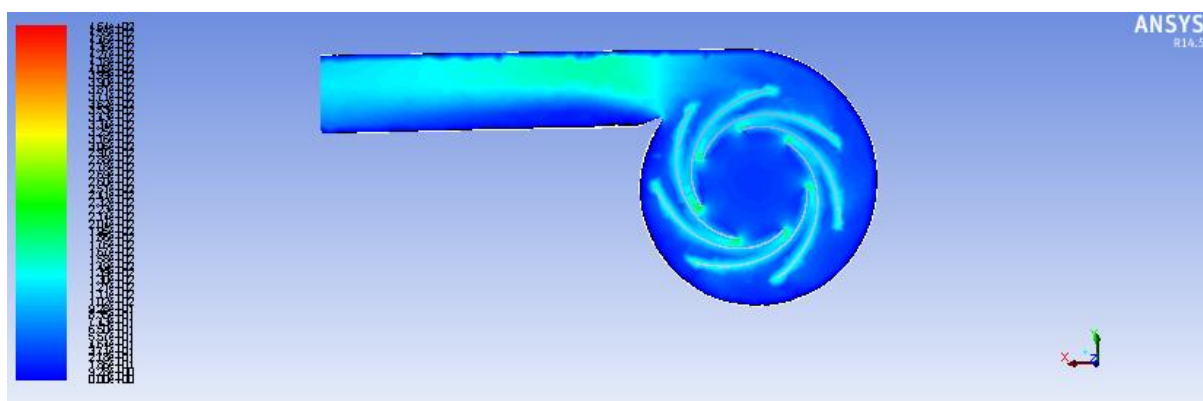


Слика 5.41 Подешавање приказа контура притиска

Слично као у случају поља вектора, тако и код контура је потребно дефинисати раван графичког приказа као и врсту праћеног параметра током итеративног поступка.

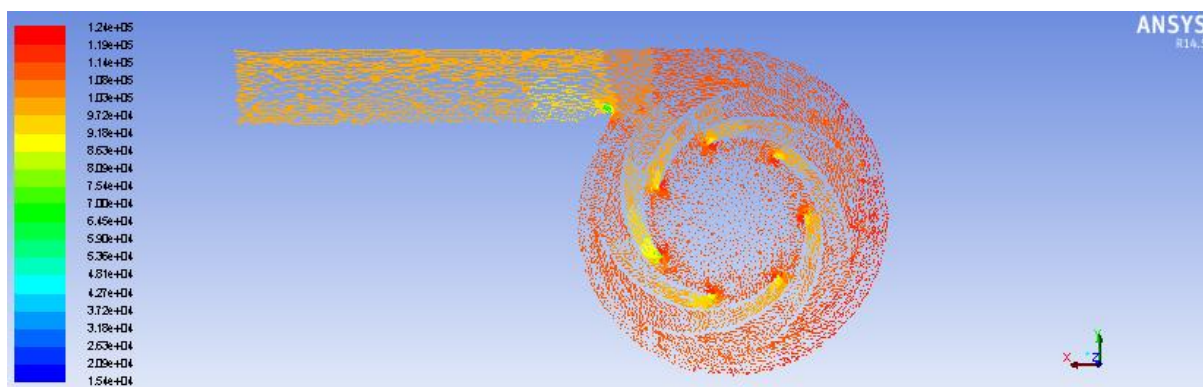


Слика 5.42 Графички приказ поља контура апсолутног притиска вентилатора од 18000 обртаја по минути

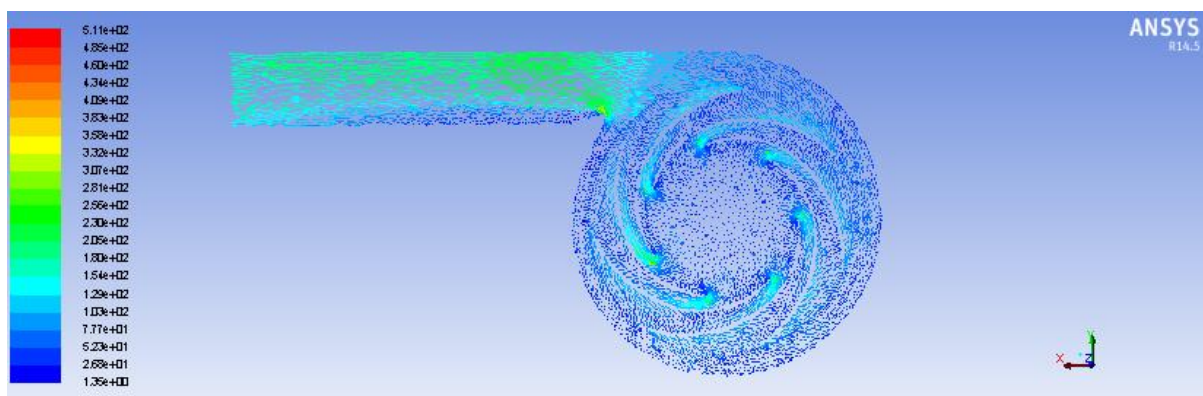


Слика 5.43 Графички приказ поља контура брзина вентилатора од 18000 обртаја по минути

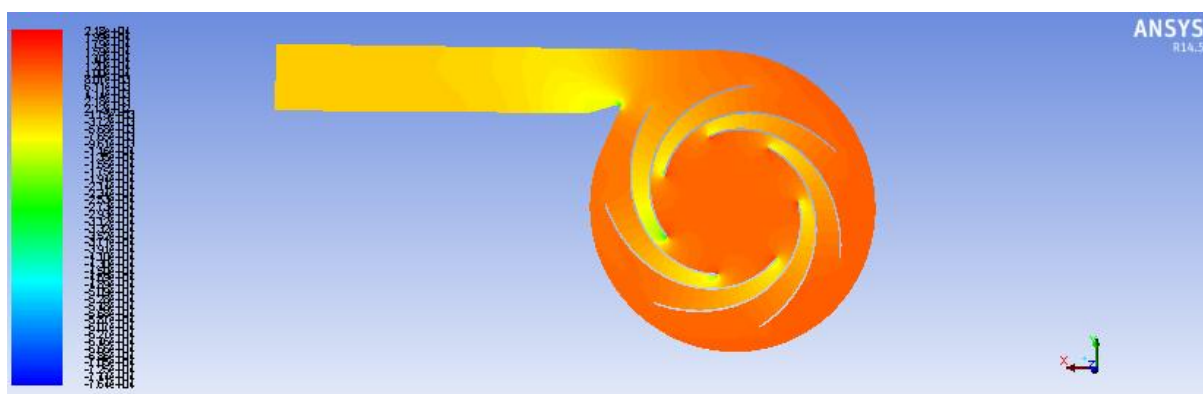
Пошто је поступак добијања графичког приказа података исти и за преостала два центрифуглана вентилатора (од 14000 и 10000 обртаја по минути), приказане су слике поља веткора и контура једнаких параметара.



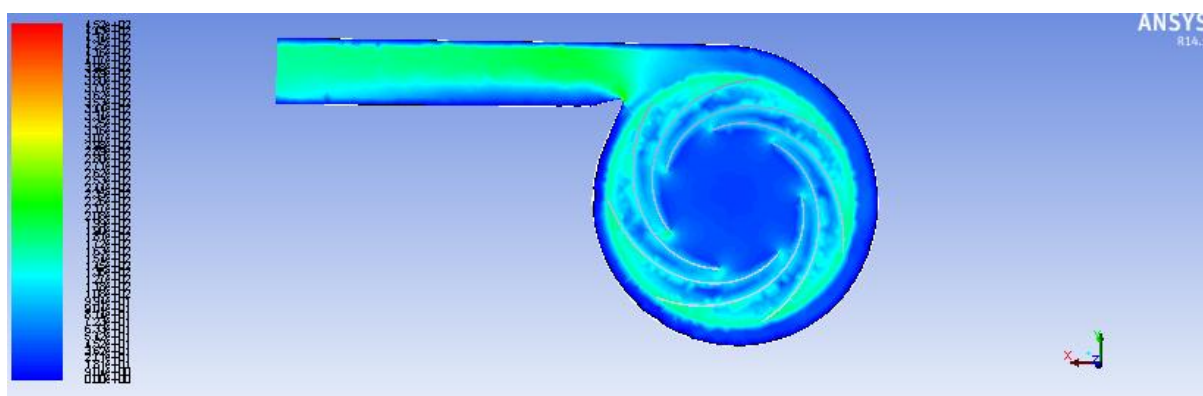
Слика 5.44 Графички приказ поља вектора апсолутног притиска вентилатора од 14000 обртаја по минути



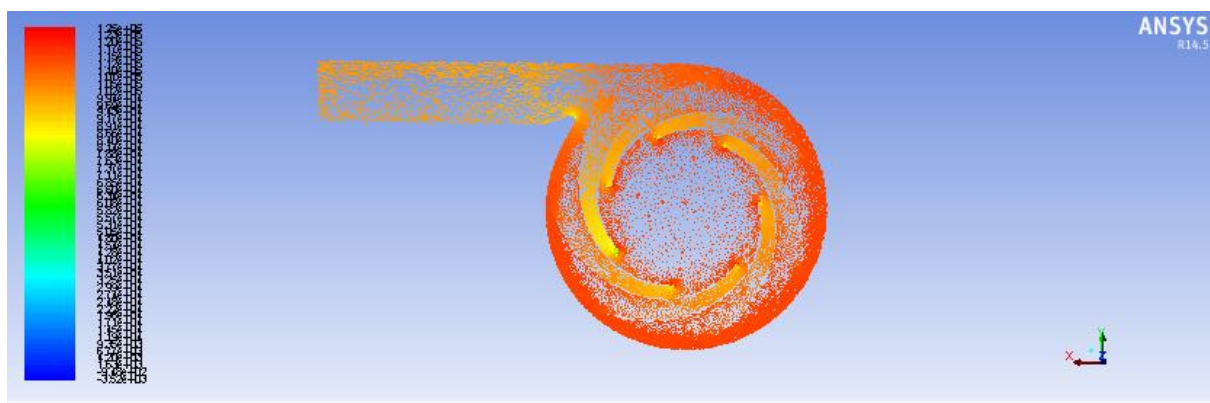
Слика 5.45 Графички приказ поља вектора брзина вентилатора од 14000 обртаја по минути



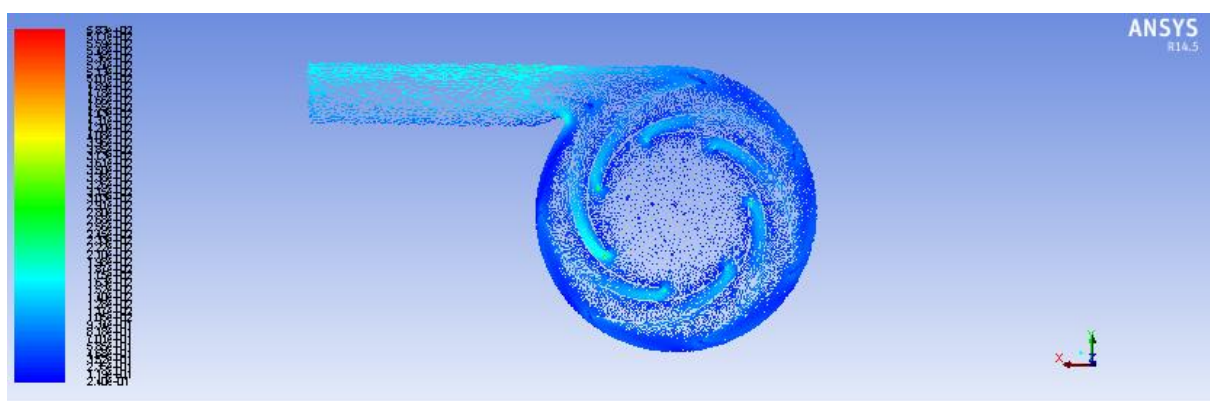
Слика 5.46 Графички приказ поља контура апсолутног притиска вентилатора од 14000 обртаја по минути



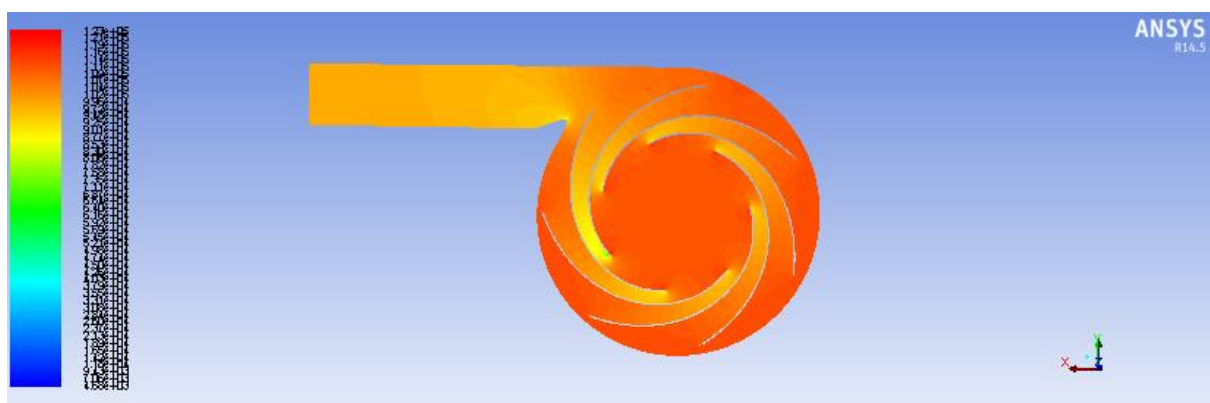
Слика 5.47 Графички приказ поља контура брзина центрифугалног вентилатора од 14000 обртаја по минути



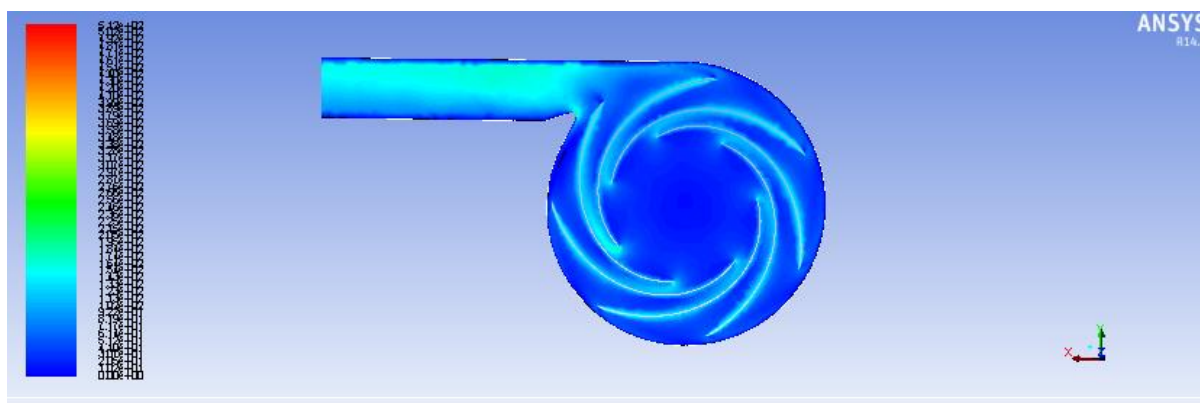
Слика 5.48 Графички приказ поља вектора притиска центрифугалног вентилатора од 10000 обртаја по минути



Слика 5.49 Графички приказ поља вектора брзина центрифугалног вентилатора од 10000 обртаја по минути



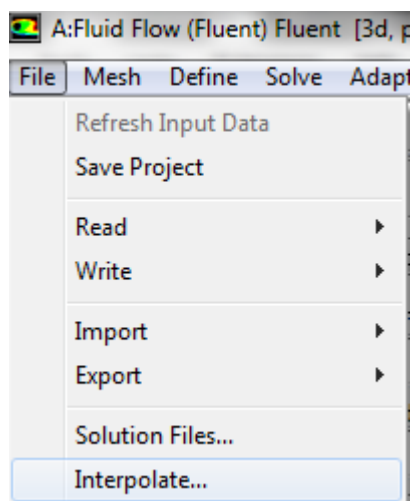
Слика 5.50 Графички приказ поља контура апсолутног притиска вентилатора од 10000 обртаја по минути



Слика 5.51 Графички приказ поља контура брзина вентилатора од 10000 обртаја по минути

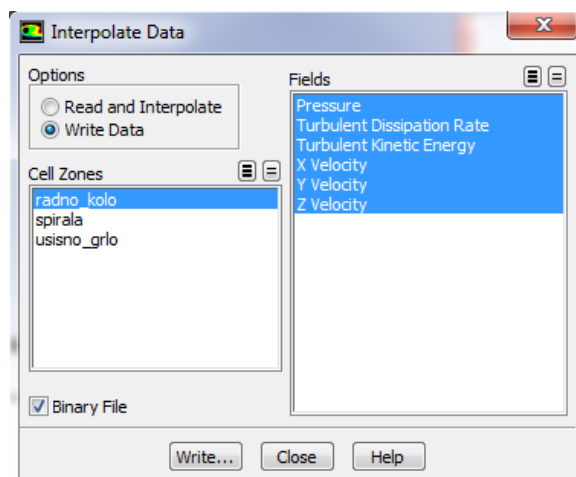
Програмски пакет **Ansyes** нуди и могућност турбо-постпроцесирања, тј. анализу резултата на појединим делова. Приказаће се турбо-постпроцесирање периодичног дела радног кола.. Да би се приступило овом процесу неопходно је претходно извршити интерполацију добијених резултата нумеричке анализе над комплетним вентилатором.

Активирати комадну **Interpolate** из **File** падајућег менија (слика 5.52).



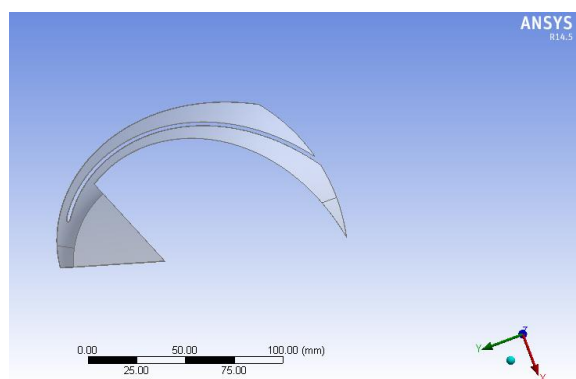
Слика 5.52 Опција за интерполирање резултата

Активирањем ове команде отвориће се дијалог у коме је потребно дефинисати који параметри ће се интерполирати и за који део прорачунске мреже. Дефинисањем као на слици и активирањем команде **Write** врши се снимање резултата радног кола (слика 5.53).

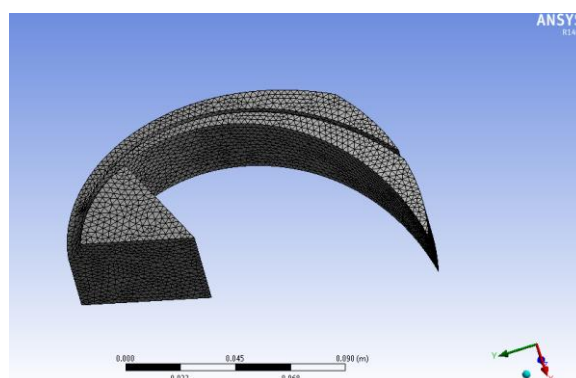


Слика 5.53 Дијалог за интерполирање резултата нумеричке анализе

Следећи корак представља учитавање геометрије, периодичног дела радног кола и генерисање његове прорачунске мреже у оквиру **Ansys** програмског пакета. Пошто је поступак исти као у случају центрифугалног вентилатора биће приказана дата геометрија (слика 5.55) и њена прорачунска мрежа (слика 5.55).

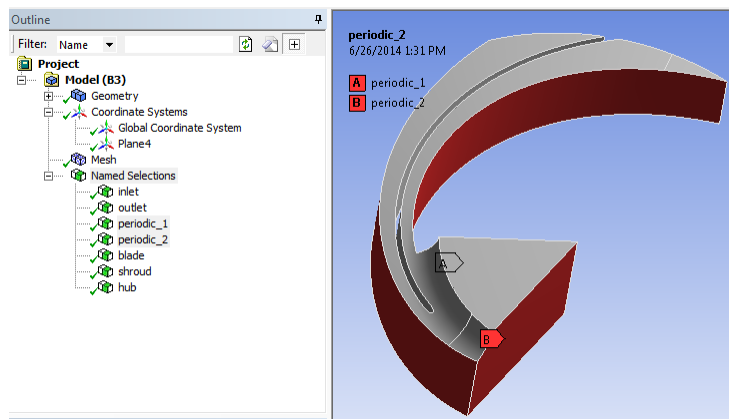


Слика 5.54 Геометрија периодичног дела радног кола



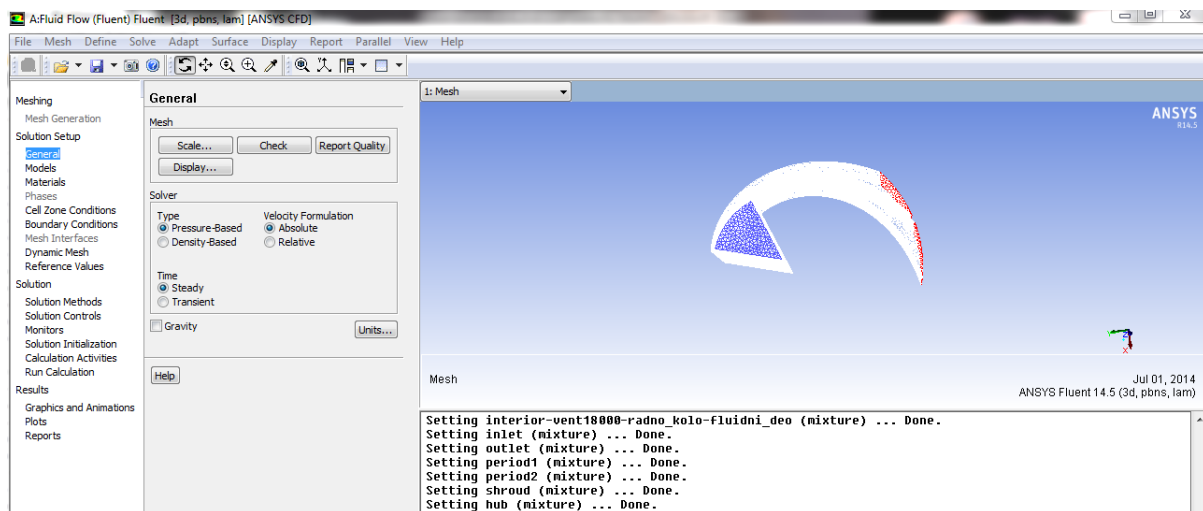
Слика 5.55 Прорачунска мрежа периодичниг дела радног кола

У оквиру формирања прорачунске мреже, у радном окружењу **Meshing**-а, потребно је именовати све површине периодичног деала радног кола по следећој аналогiji: **inlet**-улаз, **outlet**-излаз, **hub**-задња бочна страна, **shroud**-предња бична страна, **periodic_1** и **periodic_2**-периодични делови који се понављају (слика 5.56), **blade**-лопатица.



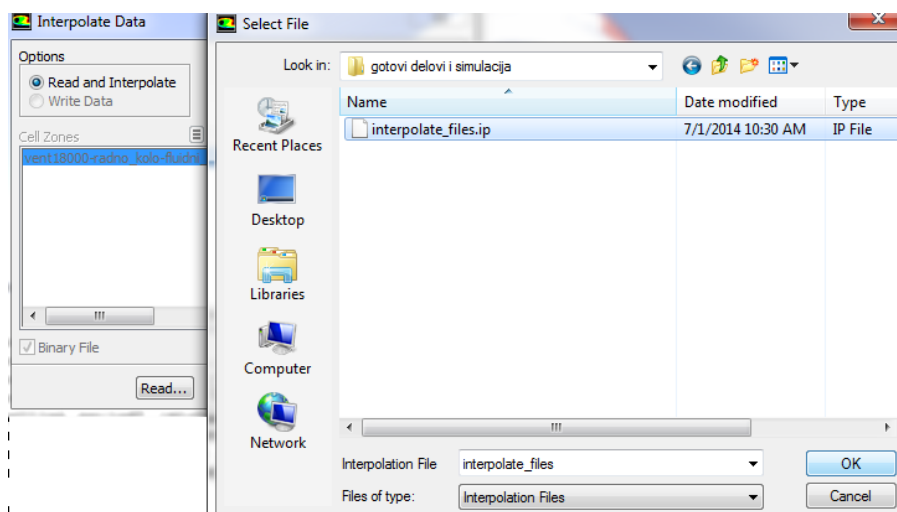
Слика 5.56 Именоване површине периодичног исечка радног кола

По истом поступку, као у случају центрифугалног вентилатора, након ажурирања прорачунске мреже периодичног исечка, прелази се у радно окружење **Fluent-a** (слика 5.57).



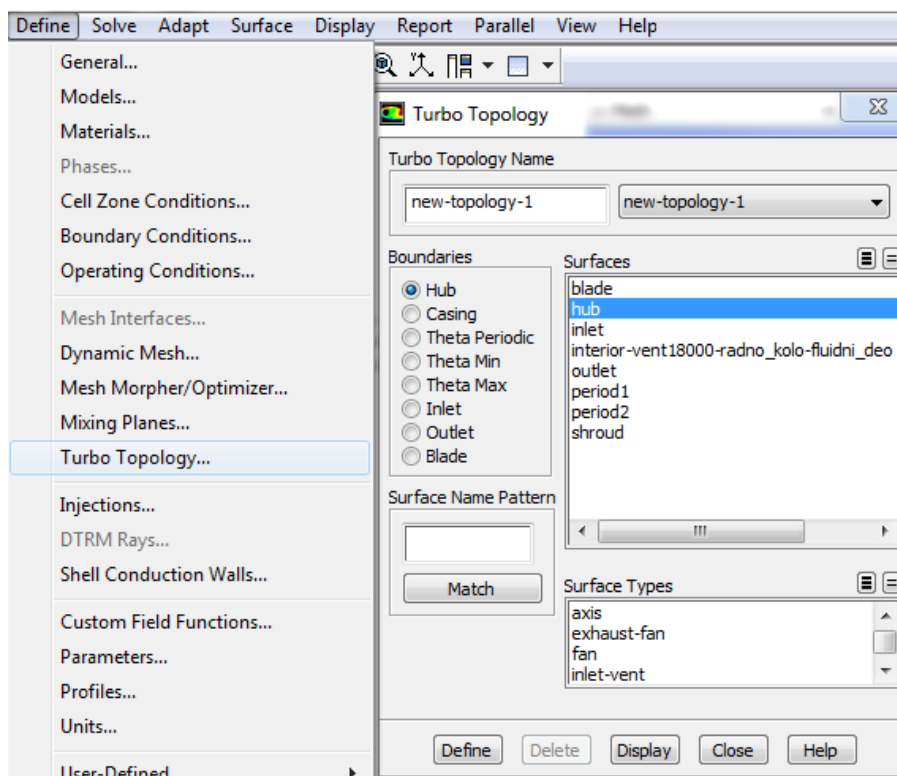
Слика 5.57 Учитана ажурирана прорачунска мрежа у програмском пакету **Fluent-a**

Пре учитавања претхоно интерполираних података, потребно је дафинисати исти математички модел, ***k-epsilon (2 eqn)*** модел и дефинисати радни флуид. Учитавање интерполираних података центрифугалног вентилатора 18000 обртаја) се изводи активирањем команде ***Interpolate*** из ***File*** падајућег менија. Након чега се отвара дијалог у коме треба активирати команду ***Read***, и учитати претходно сачувани фајл са екстензијом ***-ip*** (слика 5.58).



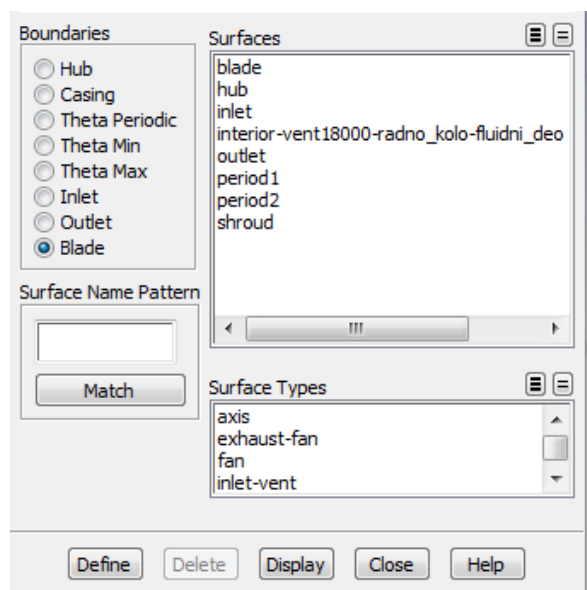
Слика 5.58 Дијалог прозор за учитавање интерполираних података венилатора

Након учитаних података, врши се дефинисање топологије проточног домена ради успостављања специфичног координатног система везаног за дату тубромашину. Дефинисање се остварује активирањем команде **Turbo Topology** из листе падајућег менија **Define** (слика 5.59). Отвара се дијалог у коме је се врши дефинисање граничних услова који обухватају: предњу бочну страну (shroud), задњу бочну страну (hub), периодичност (periodic), лопатицу (blade), улаз (inlet), излаз (outlet).



Слика 5.59 Дефинисање граничних услова топологије

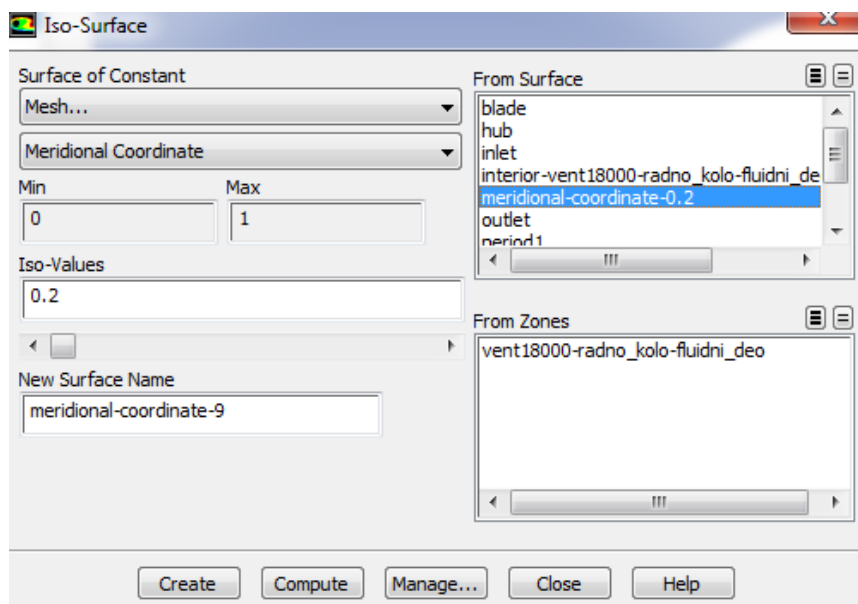
По повезивању граничних услова са именованим површинама, које се налазе у одељку **Surfaces**, активира се команда **Define** у дијалог прозору **Turbo Topology** и тиме се омогућава почетак процеса турбо-постпроцесирања. Појављује се порука да је омогућено турбо-постпроцесирање (слика 5.60).



Preparing mesh for display...
Done.
Enabling turbo postprocessing functions.

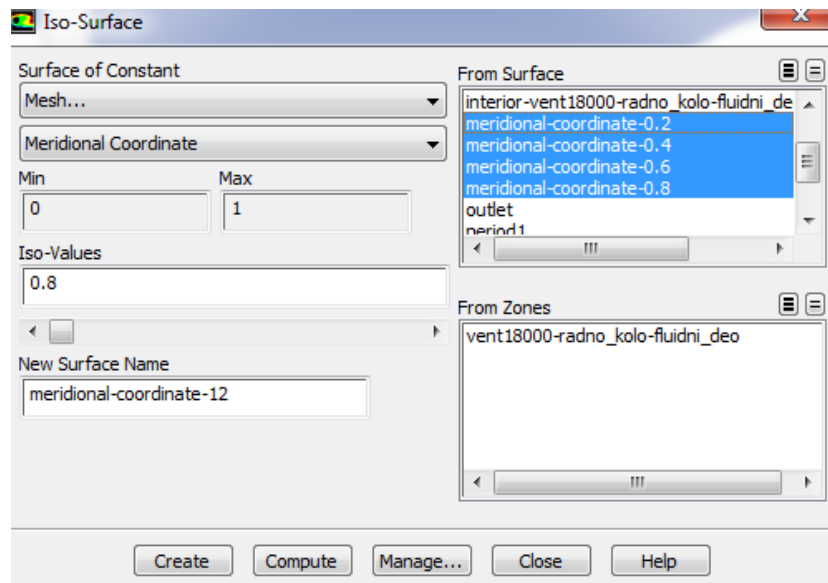
Слика 5.60 Порука на дну слике која говори да је омогућен процес турбо постпроцесирања

Пре приказивања резултата турбо постпроцесирања врши се формирање меридијанских и попречних површина. Активирати команду **Iso Surface** из падајућег менија **Surface**. Отвара се дијалог у коме се селекују опције **Mesh** и **Meridional Coordinate** из падајуће листе **Surface of Constant**. Затим се уноси вредност 0.2 у поље **Iso Values** и именује као **meridional-coordinate-0.2** у пољу **New Surface Name**. Активирањем команде **Create** формира се дата површина (слика 5.61).



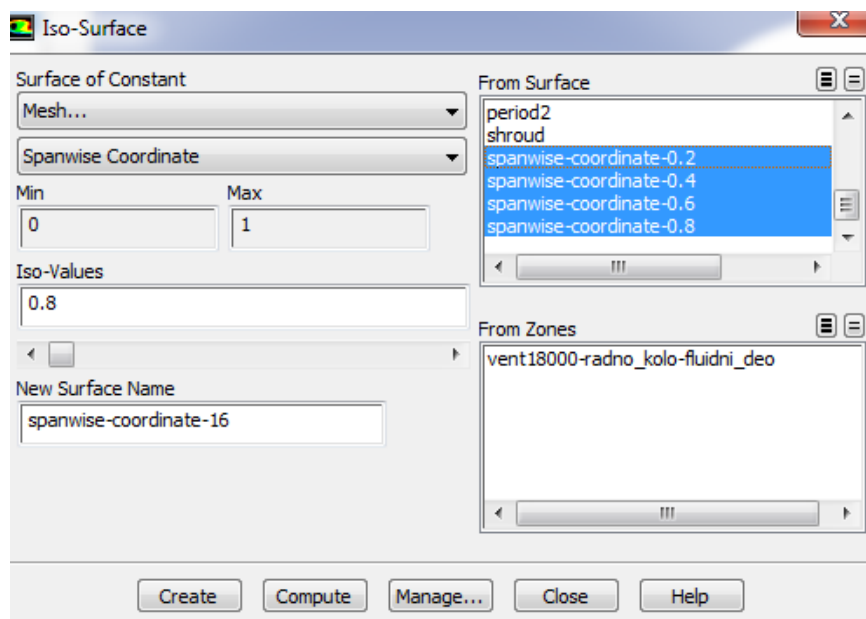
Слика 5.61 Дијалог за формирање меридијанске површине

По описаној процедури формиране си три меридијанске површине које имају вредности 0.4, 0.6 и 0.8. као са слике 5.62.



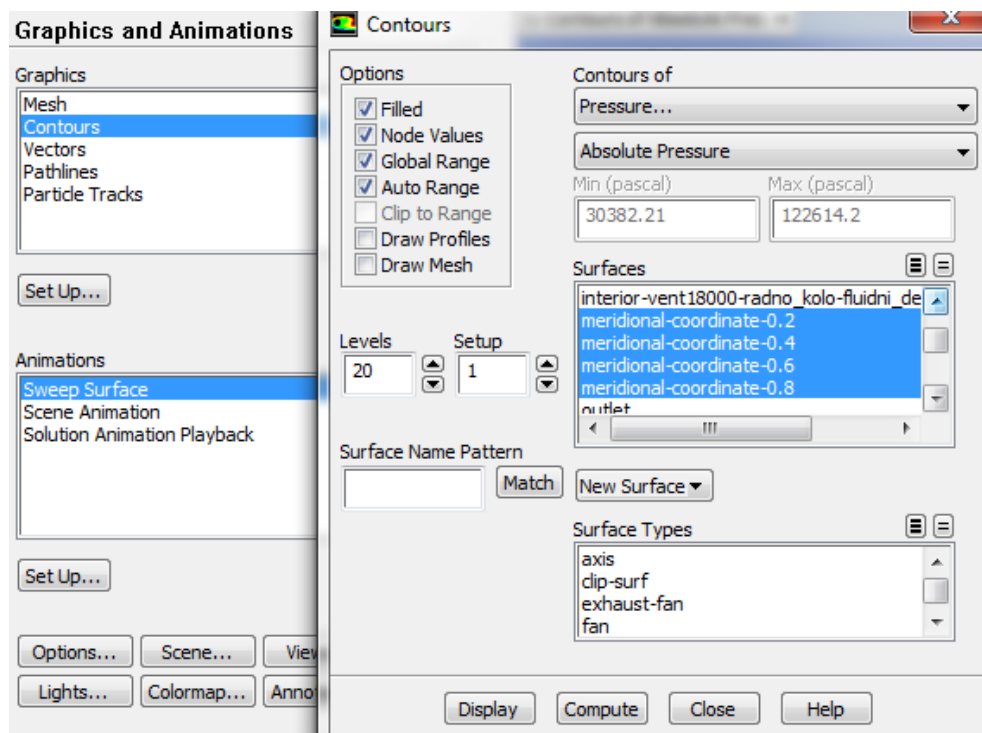
Слика 5.62 Формиране меридијанске површине

Процес формирања попречних површина је аналоган процесу формирања меридијанских површина, само што је потребно у одељку **Surface of Constant** одабрати **Mesh** и **Spanwise Coordinate**. Вредности у одељку **Iso Values** су аналогне вредностима у случају меридијанских површина, тако да се на крају формирају следеће површине (слика 5.63).



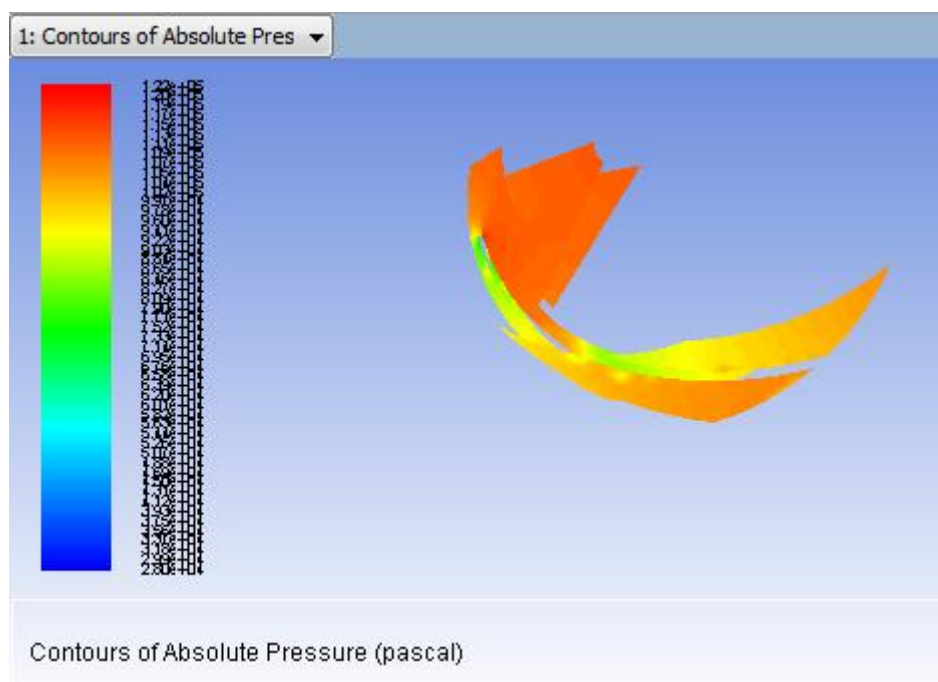
Слика 5.63 Формиране попречне површине

Након формираних површина, следи визуелизација резултата активирањем команде **Graphics and Animations** из листе падајућег менија **Display**, где се у одељку **Graphics and Animations** селекује опција **Contours** и активира команда **Set up** (слика 5.64).



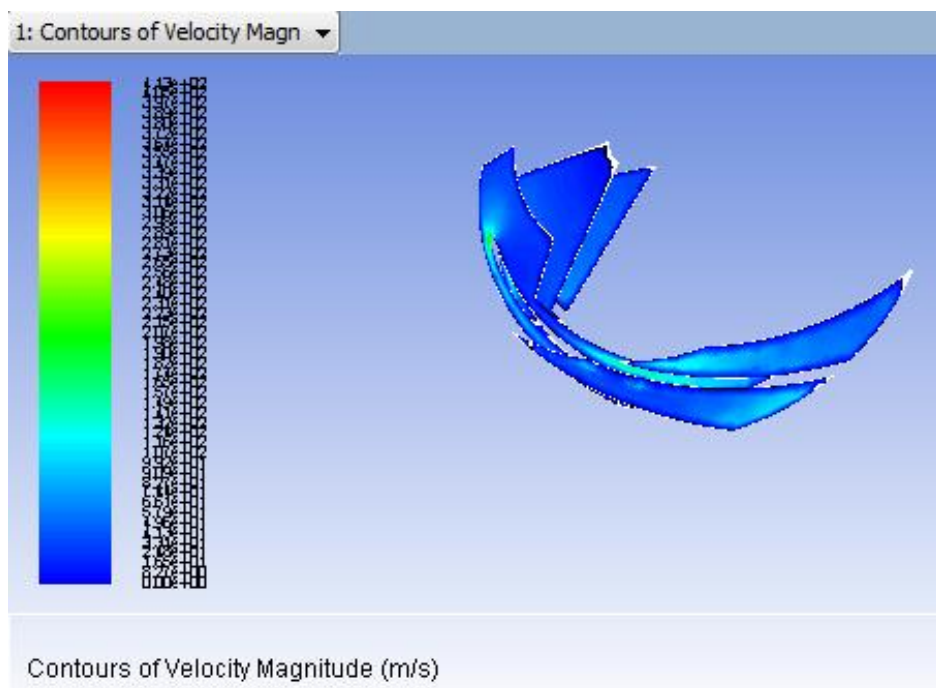
Слика 5.64 Дијалог за подешавање приказивања резулата турбо постпроцесирања

За приказ контура апсолутног притиска на мердијански равнима потребно је из падајућег менија **Contours of** изабрати **Pressure** и **Absolute Pressure**, а затим у оквиру одељка **Surfaces** изабрати меридијанске површине (слика 5.65). Активирати команду **Display**.



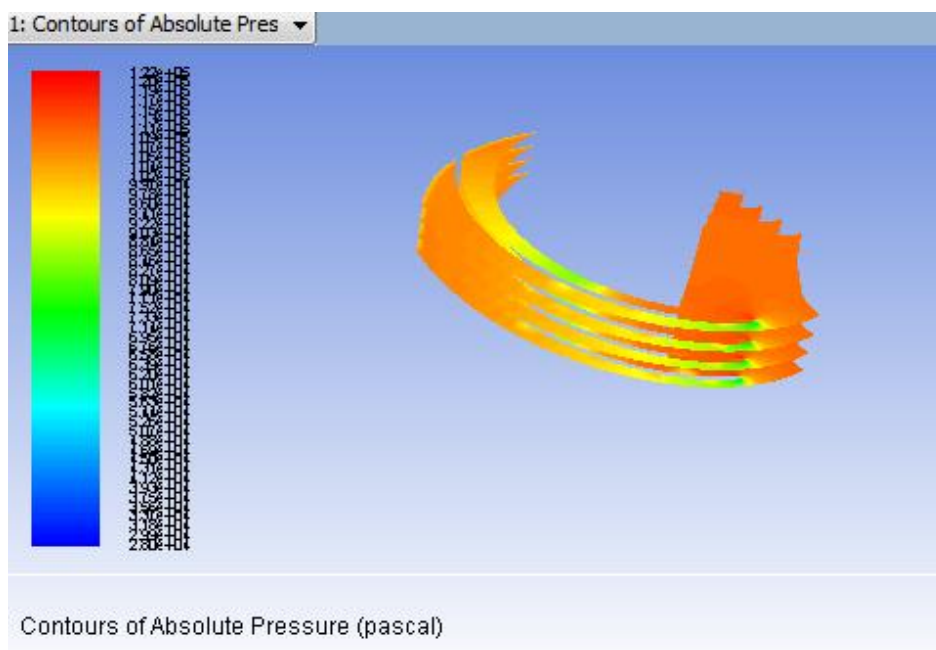
Слика 5.65 Контуре апсолутних притисака у меридијанским површинама

Одабиром опције **Velocity** из падајућег менија **Contours of** оставрује се приказ контура брзина у меридијанским површинама (слика 5.66).

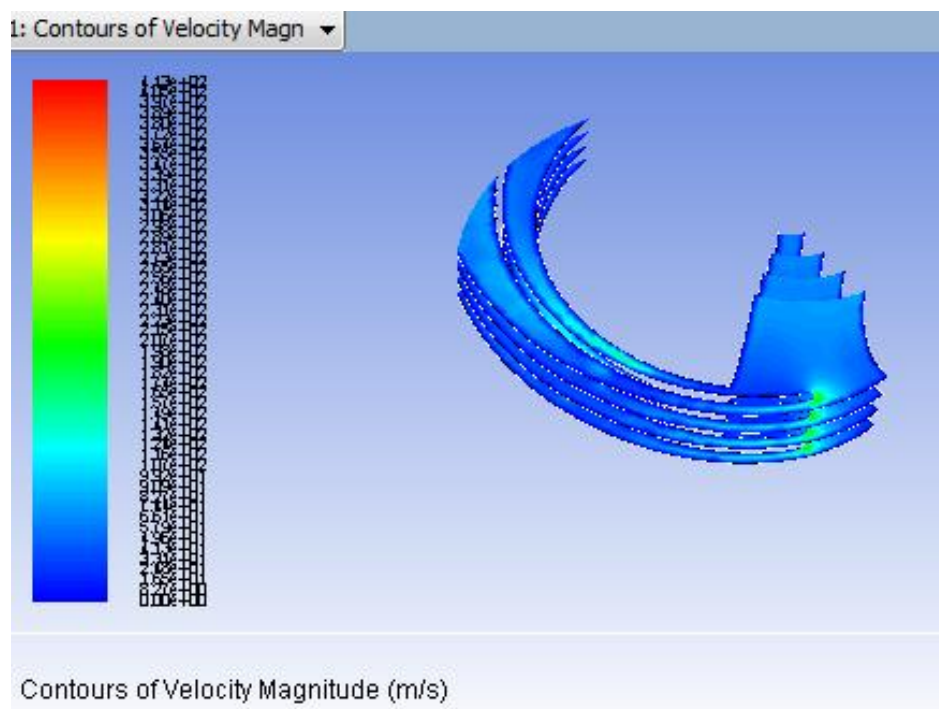


Слика 5.66 Контуре брзина у меридијанским површинама

Аналогно приказивању резултата у меридијанским површинама, чекирањем попречних површина (*spanwise-coordinate-0.2*; *spanwise-coordinate-0.4*; *spanwise-coordinate-0.6*; *spanwise-coordinate-0.8*) у одељку **Surfaces** и чекирањем датих параметара (апсолотног притиска, брзине) добијају се прикази контура у попречним површинама периодичног исечка радног кола вентилатора од 18000 обртаја у минути.



Слика 5.67 Контуре апсолотног притиска у попречним површинама



Слика 5.68 Контуре брзина у попречним површинама

Закључак

У овом мастер раду је приказано детаљно пројектовање и анализа центрифугалног вентилатора кроз програмске пакете **CFTurbo** и **Ansys**. Комплексан прорачун центрифугалног вентилатора је интегрисан унутар програмског пакета **CFTurbo** тако да је кориснику омогућено лако и једноставно добијање геометрије радног кола и спиралног кућишта као и формирање њиховог CAD модела у софтверском пакету **CATIA V5R20**. У оквиру програмског пакета **Ansys**, нумеричком симулацијом решаван је пробелм струјања метана кроз центрифугални вентилатор. Као излазни подаци добијени су графички прикази (поља вектора и конутра једнаких вредности) праћених параметара током нумеричке симулације (брзина и притисак). На основу добијених података из нумеричке симулације, могуће је сагледати проблеме који се могу јавити у раду центрифугалног вентилатора. Као што су: падови притисака услед локалних или успутних губитака, турбулентна струјања... Овакав концепт појефтиније процес тестирања вентилатора. Овако комплексни и специјализовани програмски пакети имају одговарајућу цену коју себи могу да приуште само велике компаније. Основни пакети нису превише скупи, али додатни модули свакако јесу. Али када се упореди време потребно за израду и тестирање центрифугалних вентилатора у реалним и софтверским условима, долази се до закључка да је улагање у овакве програмске пакете исплативо.

Литература

- [1] Јовичић Н., Јовичић Г., Милашиновић М., Бошковић Г., Јевтовић М., Миловановић Д.: Студија, *Идејно решење постројења за когенерацију депонијског гаса из комуналног отпада града Крагујевца*, ККрагујевац 2012
- [2] Јовичић Н., Јовичић Г., Милашиновић М., Бошковић Г., Миловановић Д.: Студија, *Истраживање енергетских потенцијала комуналних депонија за изградњу когенерационих постројења*, Крагујевац 2012
- [3] David Ranson, *Landfill Gas Management Facilities Design Guidelines*, British Columbia Ministry of environment, Септембар 2010
- [4] SCS Engineers, *Implementation guide for landfill gas recovery projects in the northeast final report*, 11260 Roger Bacon Drive, Reston, Virginia 22090, September 9, 1994, File No.0292104
- [5] <http://en.cfturbo.com>,
- [6] <http://www.ansys.com>
- [7] NREL (National Renewable Energy Laboratory) technical monitor C.Wiles, *Landfill Gas Operation and Maintenance Manual of Practice*, A national laboratory of the U.S. Department of Energy Managed by Midwest Research Institute, March 1997
- [8] ANSYS Workbench User`s Manual
- [9] ANSYS DesignModeler User`s Manual
- [10] ANSYS Meshing User`s Manual
- [11] ANSYS Fluent User`s Manual