

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Управљање енерго и еко пројектима

Број индекса: 326/2013

Александар Д. Радовановић

**Пројекат мале хидроелектране са Пелтоновом
турбином за производњу електричне енергије
коришћењем водотока реке Бјелице у Србији са
посебним освртом на истраживање параметара
водотока ради избора турбине**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Милун Бабић - ментор**
2. **Др Вања Шуштершич**
3. **Др Слободан Савић**

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да

Препоручена литература:

- [1] М. Ј. Бабић, С. Стојковић: Турбомашине, теорија и математичко моделирање, Просвета, Београд, 1997.
- [2] Г. Душан: Обновљиви извори енергије 2 – мале хидроелектране, скрипта, Машински факултет Крагујевац, Крагујевац, 2010.
- [3] Suraj Yadav: Some Aspects of Performance Improvement of Pelton Wheel Turbine with Reengineered Blade and Auxiliary Attachments. International Journal of scientific & Engineering Research Volume 2, Issue 9, September-2011 1 ISSN 2229-5518.

...

Крагујевац, 2015.

ментор:

Проф. др Милун Бабић

РЕЗИМЕ

Студентски тим који чине Ивана Терзић, Никола Петровић, Никола Стојановић и Александар Радовановић је добио задатак да опише, прикаже и представи пројекат мале хидроелектране са Пелтоновом турбином за производњу електричне енергије коришћењем водотока реке Бјелице у Србији.

У уводном делу овог мастер рада приказан је значај, генералне карактеристике и општа класификација обновљивих извора енергије. Даље је описан историјски развој малих хидроелектрана, као и енергетски потенцијал водотокова у Србији. Дат је детаљан опис функционисања хидроелектрана, значај и подела истих; затим, кратак опис законских регулатива, које се односе на добијање дозвола за изградњу малих хидроелектрана у Србији. Приказан је географски слив реке Бјелице, као и улазни параметри на основу којих је извршен детаљан прорачун за постројења са Пелтоновом турбином. Представљене су основе инжењерства водне хидраулике у оквиру којих се налазе основне једначине струјања флуида. Разматран је значај и опис Пелтонове турбине, њено регулисање, извођење и димензионисање. Приказани су 3D модели Пелтонове турбине и извршена је спецификација изабраног генератора. Урађена је детаљна економска анализа мале хидроелектране са Пелтоновом турбином, као и период повраћаја инвестиционих улагања. Као кључна ставка овог мастер рада детаљно је описана израда лабораторијског модела мале хидроелектране са Пелтоновом турбином на коме се могу вршити разна испитивања.

Самостална подстудија овог мастер рада, која не захтева учешће осталих чланова студентског тима, укључује истраживање параметара водотока реке Бјелице који утичу на избор турбине.

Кључне речи: Мале хидроелектране, Пелтонова турбина, Електрична енергија, Река Бјелица

ABSTRACT

Student team consisting of Ivana Terzić, Nikola Petrović, Nikola Stojanović and Aleksandar Radovanović was given the task to describe, display and present a project of small hydroelectric power plant with Pelton turbine for the production of electricity using the watercourse of the river Bjelica in Serbia.

In the introductory part of this master work, the importance, general characteristics and overall classification of renewable energy sources is shown. Further is described the historical development of small hydroelectric power plant, as well as the energy potential of watercourses in Serbia. Detailed description of functioning hydroelectric power plant, the significance and the division of the same; then, a brief description of the legal regulations related to obtaining permits for construction of small hydroelectric power plant in Serbia was given. The geographical basin of the river Bjelica, as well as input parameters on which it was carried out a detailed calculation for the plant with Pelton turbine were shown. The basics of water hydraulics engineering in within are the basic equations of fluid flow were presented. The significance and description of Pelton turbine and its regulation, designing and dimensioning were considered. 3D models of Pelton turbine is shown and the specification of the selected generator is carried out. Detailed economic analysis of small hydroelectric power plant with Pelton turbine, as well as the payback period of investments was also done. As a key component of this master work, construction of laboratory model of a small hydroelectric power plant with Pelton turbine on which can be perform various tests, were detail explained.

Independent substudy of this master work, which does not require the participation of other members of the student team, includes research parameters of watercourse of the river Bjelica, which influence the choice of turbines.

Keywords: Small hydroelectric power plant, Pelton turbine, Electrical energy, The river Bjelica

САДРЖАЈ

1	Увод	4
2	Хидроенергија	7
2.1	Историјат	7
2.2	Енергија воде	9
3	Хидроелектране	12
3.1	Основни делови хидроелектране	13
3.2	Велике хидроелектране	16
3.3	Мале хидроелектране	17
3.3.1	Проточне мале хидроелектране	18
3.3.2	Акумулационе мале хидроелектране	19
3.3.3	Деривацијске мале хидроелектране	20
3.4	Предности малих хидроелектрана	23
3.5	Недостаци малих хидроелектрана	24
4	Законска регулатива	25
4.1	Уводне напомене	25
4.2	Управљање водама	25
4.3	Водни услови и акта	26
4.4	Мале хидроелектране – правни прописи	27
4.5	Надлежне институције и извори права	28
4.6	Стицање дозволе за градњу мале хидроелектране	29
5	Река	31
5.1	Слив Западне Мораве	31
5.2	Река Бјелица	33
6	Основи теорије водних турбина	34
6.1	Коришћење енергије воде	34
6.2	Јединични рад турбина	36
6.3	Јединични рад акцијских турбина	38

6.4	Хидраулични степен корисности	40
7	Пелтонова турбина	42
7.1	Хоризонталне Пелтонове турбине	42
7.2	Вертикалне Пелтонове турбине	43
7.3	Основни елементи Пелтонове турбине	45
7.3.1	Лопатице	45
7.3.2	Основа радног кола са вратилом и лежиштима	46
7.3.3	Кућиште турбине	47
7.3.4	Спроводни апарат	48
7.4	Протицање воде кроз турбину	49
7.5	Максимална снага турбине	53
7.6	Број лопатица и корак	55
7.7	Положај сечице лопатице	56
7.8	Губици енергије	57
7.9	Коефицијент корисног дејства и карактеристике	61
7.10	Извођење	62
7.11	Начини регулисања Пелтонове турбине	64
8	3D модел Пелтонове турбине	66
9	Генератор	72
10	Економска анализа МХЕ са Пелтоновом турбином	74
11	Истраживање параметара водотока ради избора турбине	83
11.1	Дефиниција водотока	83
11.2	Одређивање протока водотока	83
11.2.1	Директне методе мерења протока	85
11.2.2	Индиректни метод	90
11.3	Мерење нивоа – водостаја	94
11.4	Мерење бруто напора	97
11.5	Параметри реке Бјелице	98
11.6	Дијаграми водостаја и протицаја реке Бјелице	99

11.7	Избор турбине	103
12	Израда лабораторијског модела МХЕ са Пелтоновом турбином	105
13	Закључак	115
14	Литература	116
	Прилог 1	118
	Прилог 2	134

1 Увод

Никола Тесла (слика 1): „Енергија, то је кључни проблем будућности – питање живота или смрти. Садашњи извори енергије су непоуздани и трују нашу планету. Можда преживимо то тровање, али доћи ће дан када ће ти извори енергије пресушити.” [1]



Слика 1 Енергија будућности [1]

Занемарујући фундаменталне вредности као што су здравље и опстанак сопствене врсте, основни идеал човека данас је увећање материјалног богатства и сопственог стандарда, често на штету планете Земље. У трци за већим профитом неопходан је сваки атомом доступних извора енергије, било обновљивих или необновљивих.

Необновљивих извора енергије има све мање, а њихов штетни утицај на животну средину и повећање ефекта стаклене баште је све већи. Човечанство улази у светску енергетску кризу чији корени потичу из ранијих епоха. При садашњем тренду раста потребне енергије, резерве угља биће исцрпљене за око сто година, а нафте, земног гаса и урана за око тридесет година. Сагоревање фосилних горива је довело до критичног загађивања животне средине. Изнад Земље је створена димна завеса од честица угљен-диоксида, дима и ситне прашине, која се и даље образује. Димна завеса смањује зрачење Сунца које доспева на површину Земље, што има за последицу њено хлађење. Међутим, угљен-диоксид у димној завеси пропушта краткоталасно Сунчево зрачење према Земљи, али не пропушта дуготаласно зрачење које Земља зрачи у

космос. На тај начин између површине Земље и димне завесе ствара се ефекат стаклене баште, због чега се температура Земље повећава. Од односа ова два ефекта зависи да ли ће на Земљи наступити снижење или повишење средње годишње температуре [2].

Решење ове ситуације је у замени конвенционалне класичне енергије добијене сагоревањем фосилних горива и у све већем коришћењу неконвенционалних обновљивих извора енергије (слика 2).



Слика 2 Обновљиви извори енергије [2]

Обновљиви извори енергије представљају енергетске ресурсе који се користе за производњу електричне или топлотне енергије, односно сваки користан рад, а чије резерве се константно или периодично обнављају. Сам назив обновљиви, базиран је на чињеници да се енергија троши у износу који не премашује брзину којом се ствара у природи.

Према дефиницији усвојеној у Најробију¹ 1981. године у обновљиве изворе енергије спадају:

- сунчева енергија,
- биомаса,
- дрво и дрвени угаљ,
- геотермална енергија,
- енергија плиме и осеке,
- енергија морских таласа,
- термални градијент мора,
- енергија ветра,
- **хидроенергија,**
- вучна енергија животиња.

¹ Одржана је конференција Уједињених нација о обновљивим изворима енергије.

Развој обновљивих извора енергије (нарочито ветра, воде, Сунца и биомасе) важан је из неколико разлога:

- Обновљиви извори енергије имају врло важну улогу у смањењу емисије угљен-диоксида (CO₂) у атмосферу.
- Повећање удела обновљивих извора енергије повећава енергетску одрживост друштва (привреде).
- Повећање удела обновљивих извора енергије побољшава сигурност извора енергије, а самим тим смањује зависност од увоза енергетских сировина и електричне енергије.
- Очекује се да ће обновљиви извори енергије постати конкурентни конвенционалним изворима енергије.

Неколико технологија, нарочито енергија ветра, **мале хидроцентrale**, енергија биомасе и Сунчева енергија су економски конкурентне [2], [3], [4].

2 Хидроенергија

2.1 Историјат

Хидроенергија је енергија која потиче од снаге воде, па отуда и њен назив. Представља конвенционалан обновљив извор енергије, који се вековима користи за добијање механичке, а већ дуже од сто година и електричне енергије.

Око 3/4 Земљине површине на прекривено је водом и процењује се да је укупна количина воде на земљиној кугли око 1,4 милијарде km^3 . Коришћење енергије воде први пут се спомиње чак пре 2000 година у старој Грчкој и Египту, где су водени точкови били повезани са млинским каменом да би самлели жито (слика 3).



Слика 3 Радно коло воденице [3]

Касније, ти исти водени точкови су били повезани са основном опремом као што су струг, тестере и разбој да би се производио намештај и тканине. Водена снага је отворила нову еру 1876. године, када је у Баварској изграђена прва хидроелектрана на свету, а служила је за снабдевање електричном енергијом дворца Линдерхоф, који се налазио у близини. Прва јавна хидроелектрана изграђена је у Швајцарској 1883. године и имала је снагу од 135 kW. Даљи развој хидроелектрана био је омогућен када се проширила употреба виших напона за пренос електричне енергије (далековод – први

пренос 1891. године на удаљеност од 177 km Луфен-Франкфурт) и развојем турбина и генератора.

Прва права хидроелектрана која је производила наизменичну струју, по замислима Николе Тесле, изграђена је на Нијагариним водопадима, између САД и Канаде. Пуштена је у рад 1895. године.

Прва хидроелектрана у Србији са Теслиним системом трофазних струја пуштена је у рад 2. августа 1900. године у Ужицу на реци Ћетињи „Под градом” (слика 4). Зауостављена је 1970. године, па поново покренута 2000. године и ради и данас. Такође, 1900. године покренута је хидроелектрана на реци Градац код Ваљева.



Слика 4 Хидроелектрана на реци Ћетињи [5]

Следећа хидроцентрала пуштена је у рад 1903. године на реци Вучјанка у Вучју код Лесковца. Наредна изграђена хидроцентрала била је „Света Петка” на Нишави 1908. године, затим „Гамзиград” на Црном Тимоку код Зајечара 1909. године. Све три хидроелектране раде и данас.

После Другог светског рата прва хидроелектрана која је направљена, била је „Соколовица” на Тимоку код Чокоњара (близина Зајечара) 1948. године. Прва хидроелектрана на Дрини је била „Зворник” која је пуштена у рад 1955. године.

Наша највећа хидроелектрана „Ђердап 1” је пуштена у погон августа 1970. године. Сви генератори су прорадили пуном снагом 16. маја 1972. године. Последња значајнија хидроелектрана „Пирот” на Височкој реци, пуштена је у погон 1990. године. Од тада није било значајнијих инвестиција у нове објекте хидроенергетике.

После открића електричног генератора у 19. веку, почеле су да се граде све веће хидроелектране, где се механичка енергија воде претвара у електричну у генератору.

Предност је да се енергија преко проводника може пренети на велике удаљености. Раније фабрике су често морале да буду на обалама река, како би директно искористиле хидроенергију, поготово пре открића парне машине. Парне машине нису биле погодне за мале потрошаче, па је појава „јефтиног” електрицитета из хидроелектрана решила тај проблем [3], [5].

2.2 Енергија воде

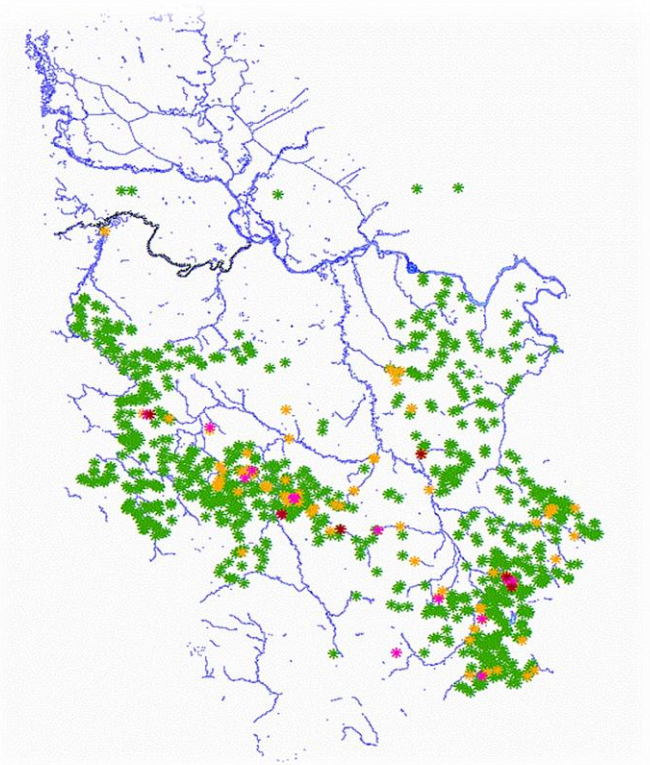
Повећање цене нафте у свим деловима света, као и повећана забринутост о негативним утицајима сагоревања угља, нуклеарне енергије, па и великих хидроелектрана на животну средину, повећали су интересовање за коришћење хидроенергетског потенцијала малих водотокова у разним деловима света. То је условило развој модерних хидротурбина, које могу да раде под условима малих протока и малих падова водене масе. Мале хидроелектране (МХЕ) пружају одређене предности у том смислу, јер је инсталација релативно мала и може бити и естетски и еколошки прихватљива.

После много година експерименталног рада у многим земљама, мале хидроелектране постају све атрактивније и еколошки прихватљиве у многим деловима света, док је њихова цена конкурентна новим термо и нуклеарним електранама, а утицај нових брана на околину је минималан у поређењу са великим хидроелектричним пројектима.

Хидроелектрична енергија се добија кроз две фазе. У првој фази потенцијална енергија водене масе покреће хидрауличну турбину и претвара се у механичку енергију, а у другој фази ова механичка енергија покреће генератор који је претвара у електричну енергију. Снага генерисане електричне енергије зависи од протока водене масе и разлике у нивоу између извора водотока и испуста акумулације (пад) [6].

Енергетски потенцијал малих водотокова у Србији

Укупни хидропотенцијал Србије процењен је на око 31.000 GWh годишње. Већи део тог потенцијала (око 62%) је већ искоришћен, јер је економски оправдано грађење већих производних капацитета. Остатак хидропотенцијала је искористив грађњом мањих и скупљих објеката, посебно ако се рачуна на мини и микро електране. Неке процене потенцијала малих хидроелектрана, које укључују мини и микро електране на преко хиљаду могућих локација са инсталисаном јединичном снагом испод 10 MW, показују да је на малим водотоковима могуће остварити укупну инсталисану снагу од око 500 MW и производњу 2.400 GWh/god. Од тога се половина потенцијала (1.200 GWh/god.) налази у ужичком, нишком и крљевачком региону, где може бити искоришћен у бројним малим постројењима са укупном инсталисаном снагом од око 340 MW распоређеном на око 700 локација (слика 5).



Слика 5 Енергетски потенцијал малих водотокова у Србији [7]

Данас је у погону само 31 мини хидроелектрана укупне снаге 34 MW и годишње производње од 150 GWh. Међутим, иако мање значајан у енергетском смислу, значај малих хидроелектрана је стратешки много већи, како са становишта сигурности снабдевања локалних потрошача електричном енергијом произведеном из обновљивих извора, тако још више са становишта запошљавања домаћих капацитета за производњу опреме и извођење радова.

Индиректни економски ефекти градње малих хидроелектрана

Полазећи од тога да за погон користи обновљив извор енергије, свака, па и мала хидроелектрана замењује потрошњу угља (око 1,4 kg по сваком kWh произведне електричне енергије) или/и природног гаса, те је у функцији одрживог развоја не само у погледу очувања постојећих природних ресурса, већ и у погледу заштите животне средине. Значајни економски ефекти градње малих хидроелектрана могу настати и због релативно великог домаћег учешћа радне снаге и индустрије, практично без увоза опреме из иностранства. Домаће учешће у оваквим малим пројектима је много веће него што је у случају великих постројења.

Динамика и ефекти градње малих хидроелектрана

Економска ситуација у Србији не иде у прилог развоју и инвестирању у обновљиве изворе енергије и то ће се одразити у будућности повећаним увозом

енергената и већим задуживањем. Сама чињеница да се ради о релативно великим почетним улагањима јасно се указује да је иницијатива државе неопходна и да је првенствено потребно донети и спровести законску регулативу уз финансијски подстицај. Држави треба да буде највећи интерес управо у индиректним ефектима који ће се огледати у смањењу увоза електричне енергије, коришћењу обновљивих извора енергије ради чувања необновљивих, смањењу загађивања животне средине, регулисању водотокова и запошљавању домаће индустрије. Цена електричне енергије у Србији у будућности треба знатно да порасте и тада директни ефекти у периоду експлоатације од педесет година могу да буду много већи.

3 Хидроелектране

Хидроелектране су енергетска постројења у којима се потенцијална енергија воде помоћу турбине претвара у механичку (кинетичку) енергију, а која се затим у генератору користи за производњу електричне енергије. Хидроелектрану чине све грађевине и постројења која служе за прикупљање (акумулирање), довођење и одвођење воде (брана, захват, доводни и одводни канали, цевоводи итд.), претварање енергије (турбине и генератори), трансформацију и дистрибуцију електричне енергије (трансформатори и далеководи), као и за смештај и управљање целог система (машинска зграда).

Искоришћавање енергије водног потенцијала економски је конкурентно производњи електричне енергије из фосилних горива и нуклеарног горива. Зато је хидроенергија најзначајнији обновљиви извор енергије (представља 97% енергије произведене од свих обновљивих извора).

Значај хидроелектрана је вишеструк: хидроенергија је чиста, нема отпада, нема трошкова горива (вода је бесплатна, под условом да је има у довољним количинама); модерне хидроелектране могу и до 90% енергије воде претворити у електричну енергију, постављање хидроелектране у погон за покривање наглих повећања потрошње врло је брзо, вештачка језера настала изградњом хидроелектрана локално доприносе економији и омогућавају наводњавање, водоснабдевање, туризам и рекреацију.

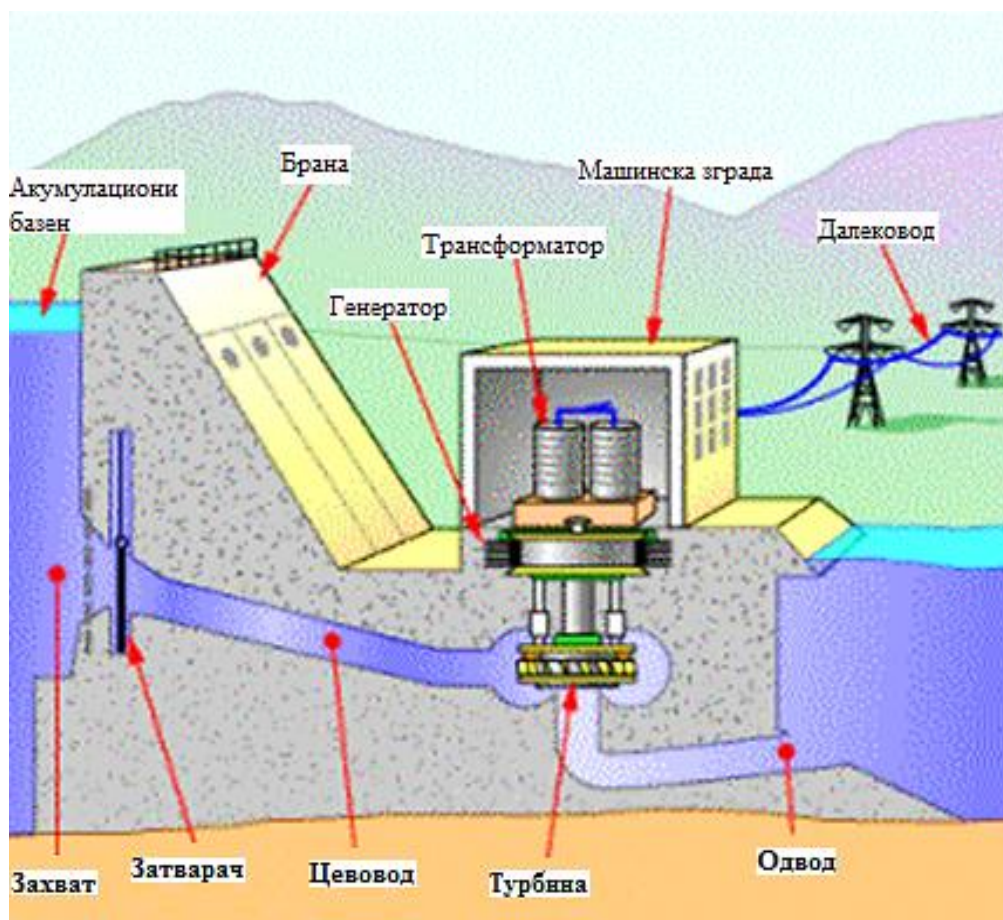
Хидроенергија значајно заостаје за производњом у нуклеарним електранама и термоелектранама. Коришћење хидроенергије има битна техничка и природна ограничења. Главно ограничење је захтев за постојањем довољне количине воде током целе године. Како би се избегле осцилације водостаја на одређеним локацијама потребно је изградити бране и акумулациона језера. Изградња акумулационих језера често захтева потапање великих делова долина, а понекад целих насеља и историјских споменика.

Осим што се на тај начин повећава цена изградње, јавља се и проблем подизања нивоа подземних вода око акумулације. Ниво подземних вода утиче на биљни и животињски свет. Долази и до промена односа седиментације и ерозије унутар речног корита и око њега (клизишта). То све указује да хидроенергија није потпуно безопасна за животну околину. Велику опасност могу представљати и земљотреси па је у неким зонама потребна и додатна заштита.

Хидроенергија, за разлику од осталих начина искоришћавања обновљивих извора енергије, нема проблем са недостатком потребне технологије, већ недостатком потребних локација. Многе од најбољих локација широм света су већ искоришћене. За разлику од капиталних пројеката којих је све мање, још увек је довољно пројеката малих хидроелектрана, код којих су ризици лошег утицаја на околину много мањи, а енергетске потребе и сигурност инвестиције много веће [8].

3.1 Основни делови хидроелектране

Сви делови хидроелектране који су у непосредном контакту са водом, односно служе за њено прикупљање, довођење и одвођење, као и претварање њене енергије чине хидротехнички систем хидроелектране (слика 6).



Слика 6 Основни делови хидроелектране [8]

Основни делови хидроелектране су:

- брана или преграда,
- захват воде,
- довод воде,
- прекидна комора (водостан) или водена комора,
- цевовод под притиском,
- водене турбине или хидротурбине,
- систем заштите од хидрауличног удара,
- генератор,
- машинска зграда,

- трансформаторска станица,
- одвод воде.

Брана или преграда

Брана је основни део хидротехничког система, па и целог постројења хидроелектране, а има троструку улогу:

- скретање воде са њеног природног тока према захвату хидроелектране,
- повећање нивоа воде како би се повећао пад,
- формирање акумулације.

Бране се убрајају у највеће грађевине на земљи. Знатно смањују опасност од поплава и суша. Међутим, у најразвијенијим индустријским земљама света у последње време успорена је изградња брана, пошто су најпогодније локације већ искоришћене. Према висини, бране могу бити: високе и ниске, а према начину израде: масивне (бетонске) или насуте (земљане или камене). Ниске бране се називају и праговима, што је чест случај код малих водотокова, односно код малих хидроелектрана.

Захват воде

Захват воде прима и усмерава воду задржану у акумулацији према доводу, односно турбини. Постоје два типа захвата: захват на површини воде и захват испод површине. Када је преграда ниска и ниво воде готово константан изводи се на површини, док се испод површине и то на најнижем могућем нивоу изводи у случају када се ниво воде током године значајно мења. Пролаз воде кроз захват регулише се затварачима.

Довод воде

Довод воде део је хидротехничког система који спаја захват воде са прекидном комором (водостаном) односно са воденом комором. У зависности од изгледа околног земљишта и погонских услова, може бити:

- отворен (канал),
- затворен (тунел) – може бити гравитациони или под притиском.

Гравитациони тунел није потпуно испуњен водом па за промену протока воде треба вршити регулацију захвата, док код тунела под притиском вода испуњава цео попречни пресек и за промену протока не треба вршити регулацију захвата. Са гледишта еластичности система (могућности одговарања на промене у електроенергетском систему), канали под притиском су повољнији, пуно еластичнији у погону, јер без икаквог деловања могу пратити промену оптерећења.

Прекидна комора (водостан) или водена комора

Водостан представља последњи део довода, а служи за регулацију приликом промене оптерећења. Димензионисање водене коморе има велики утицај на правилно функционисање хидроелектране. Када је довод изведен као гравитациони тунел, довод мора имати одговарајућу запремину како би се у њему могле сачувати веће количине воде, а када је изведен као тунел под притиском, његове димензије морају бити такве да притисак не порасте преко допуштене границе или да ниво воде не падне испод висине улаза у цевовод под притиском.

Цевовод под притиском

Цевовод доводи воду од прекидне коморе до турбине. Израђује се од челика или бетона (код мањих падова), а према положају може бити на површини или у тунелу. На улазу у цевовод под притиском обавезно се налази затварач који има сигурносну улогу. Помоћу затварача се спречава даљи доток воде у цевовод у случају пуцања цеви. Испред главног затварача редовно се поставља и помоћни, који омогућава обављање радова на главном без потребе за пражњењем система. Обилазни цевовод је смештен на почетку цевовода под притиском и служи за његово постепено пуњење, као и за изједначавање притиска испред и иза затварача. Постављање затварача на дну цевовода под притиском зависи од броја турбина које су везане на један цевовод.

Водене турбине – хидротурбине

Хидротурбине представљају средњи део система и служе за претварање потенцијалне енергије струјања воде у кинетичку енергију, а затим променом количине кретања у радном колу, у механичку енергију окретањем вратила турбине, које је спојено са генератором. У генератору се механичка енергија претвара у електричну енергију. Турбина се састоји углавном од једног спроводног дела који води даје довољно велику брзину и преко једног обртног радног кола одузима енергију од воде.

У зависности од начина преношења енергије водотока на њих, тј. према промени притиска воде при струјању кроз радно коло, водене турбине могу бити:

- акцијске турбине²,
- реакцијске турбине³.

Турбине се често деле и према начину извођења, по правилу према имену конструктора или произвођача, па постоје: Францисове, **Пелтонове**, Капланове, Банкијеве, итд. Примена ових турбина зависи од количине протока воде и висине пада воде.

² Користе само кинетичку енергију млаза, док се притисна енергија скоро не мења од улаза до излаза из радног кола.

³ У радном колу ових турбина, мењају се сва три параметра струјне енергије (притисна, кинетичка и положајна енергија).

Систем заштите од хидрауличног удара

Систем заштите од хидрауличног удара служи за спречавање повећања притиска преко дозвољене границе, односно воденог (хидрауличног) удара у цевоводу. Висина притиска при томе зависи од времена потребног за затварање затварача на дну цевовода.

Генератор

Генератор је уређај у коме се механичка енергија окретања вратила претвара у електричну. Може бити постављен вертикално (код великих хидроелектрана) или хоризонтално (код мањих хидроелектрана или у случају када су две турбине спојене на један генератор). Код црпно акумулационих хидроелектрана, уз турбину и генератор се на истом вратилу налази и пумпа па генератор може радити и као мотор.

Машинска зграда

Машинска зграда је грађевина у којој су смештене турбине, вратила, генератори, као и сви потребни управљачки и разни помоћни уређаји. Може бити изграђена на отвореном, као зграда, или укопана у тунелу.

Трансформаторска станица

Трансформаторска станица представља везу електроенергетског система и хидроелектране. Изводи се у непосредној близини машинске зграде. Ретки су случајеви изградње трансформаторске станице на великој удаљености у односу на хидроелектрану, осим када је изградња условљена недостатком околног земљишта.

Одвод воде

Одвод воде представља завршни део хидротехничког система, а може бити изведен као канал или као тунел. Служи за враћање воде искоришћене у турбини назад у корито водотока или за довод воде до захвата следеће електране [8], [9], [10].

3.2 Велике хидроелектране

Велике хидроелектране су мега грађевине које значајно утичу на хидроенергетски потенцијал земље, доприносе развоју, али и свакако мењају локацију на којој су изграђене (позитивни и негативни еколошки ефекти).

3.3 Мале хидроелектране

За мале хидроелектране се сматра да немају никакав штетан утицај на животну околину и у томе је њихова предност, за разлику од великих чија се штетност описује кроз велике промене екосистема (градња великих брана), утицаја на земљиште, поплава, утицаја на слатководни живи свет, постојања штетних емисија у читавом животном циклусу хидроелектране које су углавном везане за период изградње електране, производњу материјала и транспорт.

Појам мале хидроелектране може се посматрати са различите тачке гледишта и разликује се од земље до земље, у зависности од њеног економског стандарда, хидролошких, метеоролошких, топографских и морфолошких карактеристика локације, као и од степена технолошког развоја.

Разлика између великих и малих хидроелектрана је у инсталисаној снази. Гранична снага која одређује мале хидроелектране такође се разликује од земље до земље. Неке земље попут Португалије, Шпаније, Ирске, Грчке и Белгије су прихватиле 10 MW као горњу границу инсталисане снаге за мале хидроелектране. У Италији је та граница 3 MW, у Шведској 1,5 MW, у Француској 8 MW, у Индији 15 MW, а у Кини 25 MW.

Међутим, у Европи се све више прихвата капацитет од 10 MW инсталисане снаге као горња граница и ту границу је подржало Европско удружење малих хидроелектрана (ESHA – *The European Small-Hydropower Association*), Европска комисија и Међународна унија произвођача и дистрибутера електричне енергије (UNIPED – *International Union of Producers and Distributors of Electricity*). У категоризацији малих хидроелектрана, израз „мини” обично се односи на системе капацитета испод 1 MW, „микро” испод 100 kW и „пико” испод 5 kW. У Србији према законској регулативи та граница је 10 MW.

Мале хидроелектране се све више користе широм света за добијање електричне енергије. Оне морају бити пројектоване и изведене тако да искоришћавају хидропотенцијал малих водотокова на оптималан начин. Економски исплатива решења су базирана на новим технологијама које омогућавају висок степен искоришћења енергије и техникама које пружају максималну заштиту животне средине.

Према величини бруто напора разликују се три категорије идејних решења:

- високи напор: 100 m и изнад,
- средњи напор: 30 – 100 m,
- ниски напор: 2 – 30 m.

Према повезаности са мрежом и начином рада разликују се:

- изоловане електране – самостални рад,
- електране везане на мрежу – паралелни рад,
- електране које раде под режимом: on – off,

- електране у којима ради једна, две или више јединица,
- електране које раде по потреби, у зависности од потрошње.

Према начину извођења мале хидроелектране се могу поделити на три основне групе:

- проточне мале хидроелектране („run – off – river”),
- акумулационе мале хидроелектране,
- деривацијске мале хидроелектране [8], [11].

3.3.1 Проточне мале хидроелектране

Проточна мала хидроелектрана гради се без складиштења воде, односно без резервоара (слика 7).

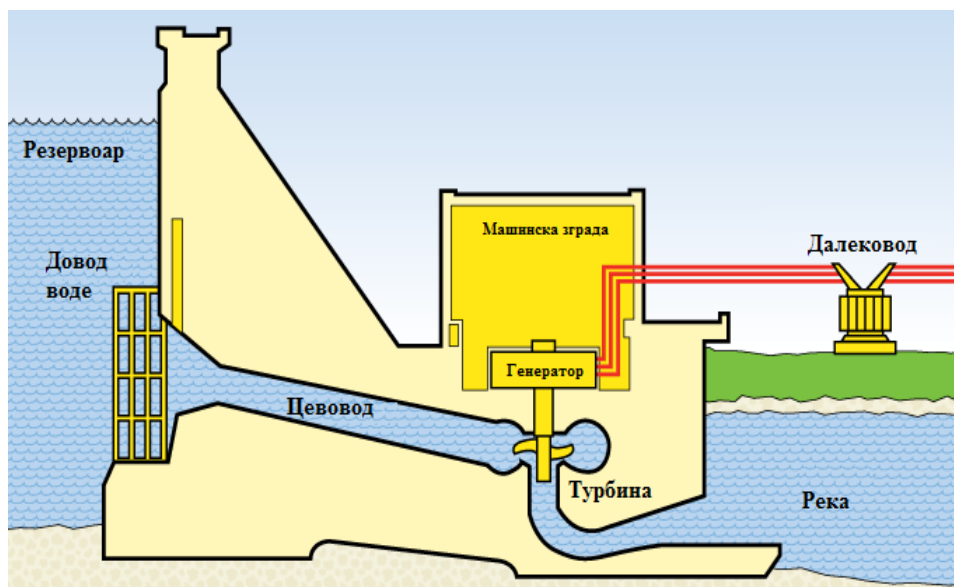


Слика 7 Проточна мала хидроелектрана [11]

Овакав начин извођења хидроелектране се заснива на малој висинској разлици испред и иза места захватања воде, тако да се не користи потенцијална енергија разлике нивоа, већ само кинетичка енергија коју поседује водоток. Зато снага овакве електране зависи од тренутне количине воде која се налази у природном току. Ови типови хидроелектрана у суштини не дају довољну снагу, па се сходно томе користе за снабдевање изолованих подручја или индустрије уколико је њихов минималан проток довољан да задовољи максималне прописане снаге. У неким случајевима при изradi мале проточне хидроелектране врши се скретање тока реке, услед чега се користи висински пад који настаје због удаљености реке. Преусмеравање тока се врши малом браном како би се ток усмерио према захвату, што за последицу има смањени проток у реци између захвата и машинске зграде.

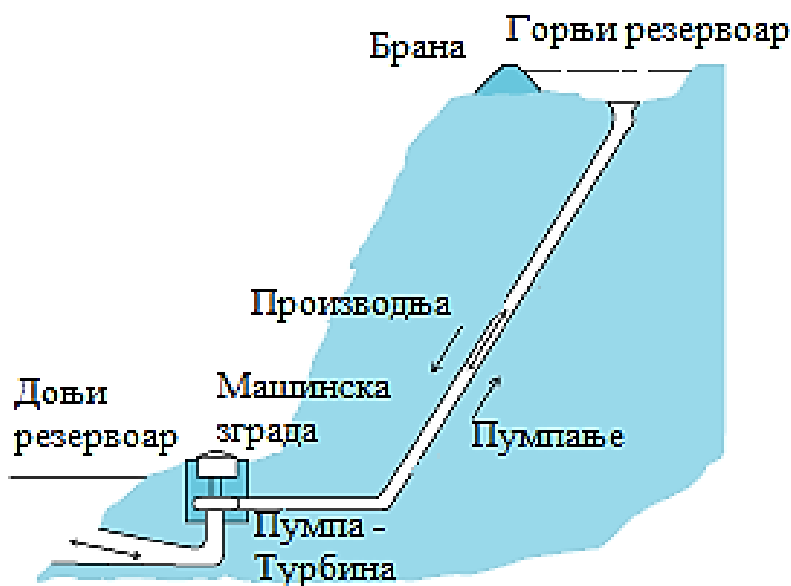
3.3.2 Акумулационе мале хидроелектране

Први тип извођења мале хидроелектране са резервоаром (*Hydroelectric Dam*) јесте акумулациона хидроелектрана (слика 8), која се формира преграђивањем реке и заустављањем тока (брана), што за циљ има стварање великог акумулационог језера узводно од бране које садржи велике количине воде и представља резервоар енергије, али се може користити и у друге сврхе (наводњавање, риболов итд). Употребљавају се уколико постоји захтев да се обезбеди потребна снага, у сваком тренутку. Код овакве врсте електране обично постоје велике годишње варијације у количини дотока воде. Акумулационо језеро поседује потенцијалну енергију која је резултат висинске разлике горње коте језера и тачке монтаже генератора, а која се претвара у кинетичку енергију воде која покреће лопатице турбине. Вода се од бране одводи тунелима који могу бити километрима дуги до места где је саграђено постројење електране са турбинама и генераторима. Стварање нових акумулација за мале хидроелектране обично није финансијски исплативо, осим евентуално на изолованим и удаљеним местима где вредност енергије има веома високу цену. Преграђивање или скретање природних речних токова може се негативно одразити на животну средину, па у овом случају добро решење представља неко природно језеро чију енергију би могли да искористимо за производњу електричне енергије чиме не би нарушили природни екосистем тог подручја.



Слика 8 Акумулациона мала хидроелектрана [12]

Други тип малих хидроелектрана са резервоаром представља реверзибилна хидроелектрана (*Pumped-storage Plants*) која је приказана на слици 9.



Слика 9 Реверзибилна мала хидроелектрана [12]

Реверзибилна хидроелектрана има два простора за складиштење водене масе:

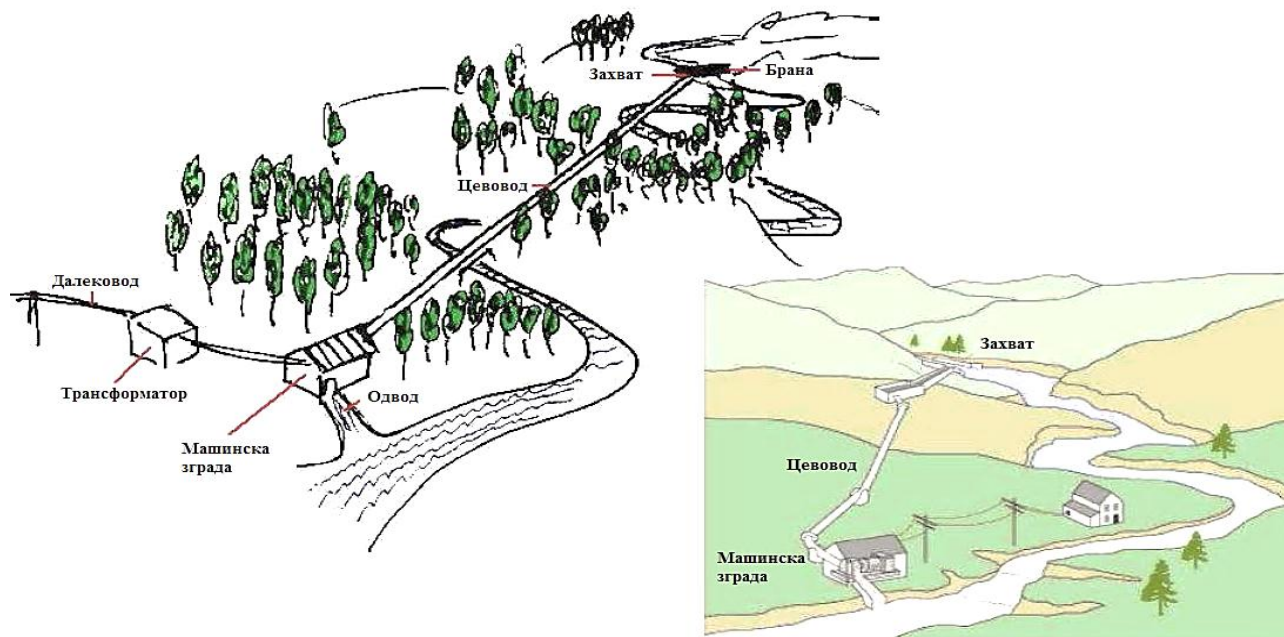
- Горња акумулација – иста је као и код акумулационих језера класичних хидроелектрана. Градњом бране осигурава се акумулација воде, која протиче кроз постројење и резултује производњом електричне енергије.
- Доња акумулација – вода која излази из хидроелектране улива се у друго, доње акумулационо језеро, уместо да се враћа у основни ток реке.

Када је потрошња електричне енергије мала, вода се пумпа из доњег језера тј. из доње у горњу акумулацију. Енергија која је потребна за пумпање воде мора бити генерисана од стране неких других извора. То се обично ради ноћу, јер је тада потрошња енергије најмања. Реверзибилна турбина/генератор се може понашати и као пумпа и као турбина. Дању се пребацује на производњу електричне енергије и тада се празни горња акумулација, вода се пропушта кроз турбину натраг у нижи резервоар и притом се генерише електрична струја. Овакве хидроелектране служе уравнотежењу производње и потрошње у електричној мрежи. Ово није енергетски ефикасно решење, али је ипак прихватљиво решење, јер не захтева коришћење више термоелектрана за покривање дневног капацитета потрошње.

3.3.3 Деривацијске мале хидроелектране

Деривацијска хидроелектрана је врста хидроелектране код које се машинска зграда за производњу електричне енергије налази измештена на некој удаљености

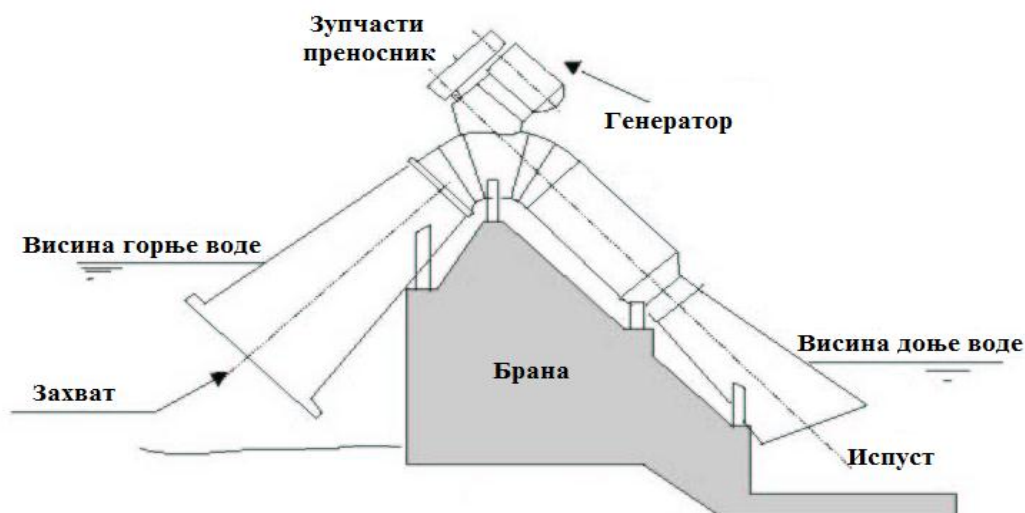
(низводно од бране), а вода се доводи посебним цевима са захвата до машинске зграде. На слици 10 приказана је једна деривацијска хидроелектрана [8], [11].



Слика 10 Деривацијска мала хидроелектрана [11]

Нископритисне хидроелектране са сифонским одводом

У случају да брана није превисока може се уградити сифонски довод (слика 11). Интегрални сифонски довод омогућује једноставно извођење постројења, најчешће висине до 10 m и за постројења до 1000 kW, иако постоје постројења са сифонским доводом са инсталираном снагом до 11 MW (Шведска) и висине до 30,5 m (САД).

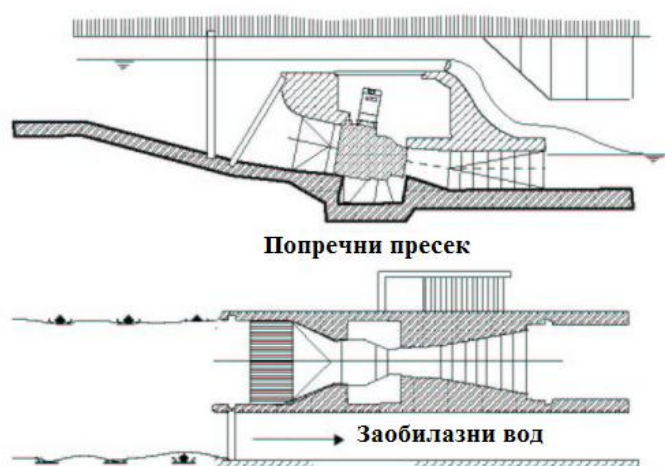


Слика 11 Нископритисна хидроелектрана са сифонским доводом [8]

Мале хидроелектране интегрисане у канал за наводњавање

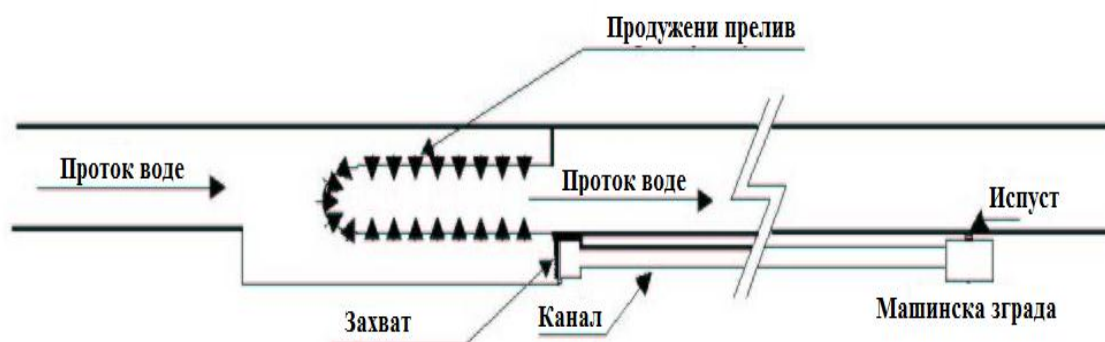
Постоје два начина извођења малих хидроелектрана које користе канал за наводњавање:

- Када је канал довољно велики за смештај захвата, машинске зграде, одвода и бочног обилазног вода, да би осигурали снабдевање водом за наводњавање, извођење мора да садржи бочни обилазни вод у случају искључења турбине. Овакав начин израде захтева истовремено пројектовање МХЕ и канала за наводњавање, јер би уграђивање у канал који је већ у функцији могло да буде врло скупо решење (слика 12).



Слика 12 Истовремено пројектовање канала и система [11]

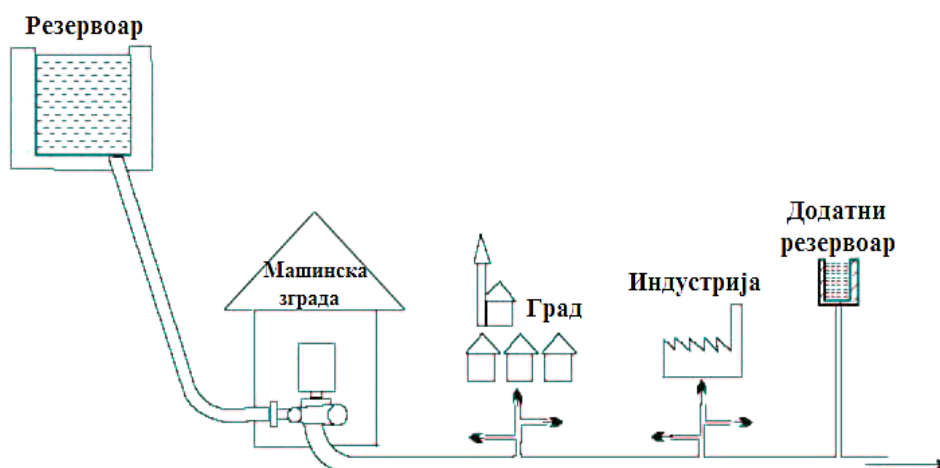
- Када канал већ постоји, као на слици 13, онда тај канал треба незнатно повећати за смештање захвата и прелива. Како би се сама ширина захвата смањила на минималну вредност најбоље је уградити издужени прелив. Од захвата се вода кроз цевовод под притиском доводи до турбине, а затим се кроз кратки испуст враћа у канал.



Слика 13 Уградња система у већ изграђен канал [11]

Мала хидроелектрана уграђена у систем за водоснабдевање

Вода за пиће се транспортује цевоводом под притиском у град из резервоара који се налази на већој висинској коти. Код таквих постројења, на уласку у само постројење за пречишћавање воде, дисипација енергије на нижем крају цевовода ублажава се коришћењем специјалних вентила. Смештање турбине на крају цевовода за претварање тако изгубљене енергије у електричну, добра је опција, под условом да се избегне хидраулични удар. Да би се осигурало трајно снабдевање водом мора бити уграђен систем обилазних вентила. У неким водоснабдевним системима турбина има испуст у отворени базен или језеро. Систем за контролу одржава ниво воде у базену. У случају механичког застоја или застоја турбине, систем обилазних вентила такође може одржавати ниво воде у базену. У случају да главни обилазни вентил испадне из погона јавља се надпритисак, те се помоћни обилазни вентил брзо отвара. Контролни системи су још сложенији код система где је излаз из турбине подвргнут противпритиску водоводне мреже. На слици 14 је приказана једна мала хидроелектрана уграђена у систем за водоснабдевање.



Слика 14 Мала хидроелектрана уграђена у систем за водоснабдевање [11]

3.4 Предности малих хидроелектрана

Најважнија предност малих хидроелектрана је смањена или у потпуности елиминисана емисија гасова стаклене баште. Главни разлог је што се не користе фосилна горива као покретач турбине и електричног генератора. Тиме електрична енергија настала у хидроелектранама постаје рентабилнија, а самим тим и независна од цене и понуде фосилних горива на тржишту. Хидроелектране такође имају предвиђен дужи животни век, у односу на електране које користе фосилна горива.

Са економског аспекта, модерне хидроелектране захтевају мали број запослених (због великог степена аутоматизације). Инвестициона средства за изградњу хидроелектране се поврате у периоду до десетак година.

Емисија гасова стаклене баште је у потпуности елиминисана, ако се искључиво посматра само процес производње електричне енергије. То се не може рећи за целу хидроелектрану, као систем који чине брана, турбина, електрични генератор и хидроакумулационо језеро.

Занимљива је студија која је спроведена у сарадњи института „*Paul Scherrer*” и Универзитета у Штутгарту. Она је показала да су међу свим изворима енергије, хидроелектране најмањи произвођачи гасова стаклене баште. Следе редом ветроелектране, нуклеарне електране, енергија добијена фото-напонским ћелијама.

У поређењу са великим хидроелектранама нема плављења широких подручја (како би се обезбедио простор за акумулацију воде) и нарушавања локалног еколошког система.

Смањују се инвестициона улагања за електрификацију удаљених насеља од опште електричне мреже, а електрификацијом таквих руралних насеља доприноси се унапређењу њиховог развоја. Пошто су најчешће лоциране близу корисника, губици електричне енергије у преносу се смањују и растерећује се електромережа.

Експлоатишу се уз релативно ниске трошкове. Радни век је врло дуг, у просеку 30 година, мада има малих хидроелектрана које раде и 80 и више година [8], [11].

3.5 Недостаци малих хидроелектрана

Основни проблем при раду у електроенергетском систему представља варијација протока током времена, као и мала акумулација, компликована процедура изградње итд.

Поред ових недостатака постоје и:

- потребе обезбеђивања биолошког минимума (резервног тока),
- потребе уградње пролаза за рибе (повреде и миграција риба, утицај на непосредни еко систем),
- бука, вибрације, визуелно нарушавање околине,
- неприступачност локација.

4 Законска регулатива

4.1 Уводне напомене

Обновљива енергија из биомасе, ветра, малих хидроелектрана и геотермалних извора је у центру пажње држава, потенцијалних инвеститора и потрошача у целом свету. У 2007. години, Европска унија (ЕУ) поставила је циљ земљама чланицама да, до 2020. године, 20% енергије у свакој од земаља треба да настане из обновљивих извора енергије [13].

Србија има значајне изворе обновљиве енергије којима би могла да задовољи новонастале захтеве. Влада Републике Србије је развила стратегију како би искористила ову прилику. Да би се подстакао развој и инвестиције у овом сектору, а такође и испуниле обавезе по Уговору о енергетској заједници југоисточне Европе, усвојено је неколико прописа почев од новембра 2009. године. Они укључују:

- успостављање система „подстицајних тарифа” у оквиру ког ће Влада Републике Србије субвенционисати трошак обновљиве струје,
- дефинисање захтева за стицање статуса „Повлашћеног произвођача електричне енергије” који користи обновљиве изворе енергије за производњу струје [14].

4.2 Управљање водама

Интегрално управљање водама (управљање водама) чини скуп мера и активности усмерених на одржавање и унапређење водног режима, обезбеђивање потребних количина вода захтеваног квалитета за различите намене, заштиту вода од загађивања и заштиту од штетног дејства вода. Управљање водама Република Србија остварује преко Министарства пољопривреде и заштите животне средине, органа аутономне покрајине, органа јединице локалне самоуправе и јавног водопривредног предузећа. Управљање водама заснива се на следећим начелима:

- **Начело одрживог развоја** – управљање водама мора се одвијати тако да се потребе садашњих генерација задовољавају на начин којим се не угрожава могућност будућих генерација да задовоље своје потребе, односно мора се обезбедити коришћење вода засновано на дугорочној заштити расположивих водних ресурса, по количини и квалитету.
- **Начело целовитости** – процеси у природи, чија је значајна компонента вода, као и повезаност и међузависност акватичних и приобалних екосистема, морају се поштовати.

- **Начело јединства водног система** – управљање водама у оквиру јединственог водног простора мора се одвијати у складу са развојем Републике Србије, у циљу постизања максималних економских и социјалних ефеката на правичан начин и уз уважавање међународних споразума.
- **Начело обезбеђивања заштите од штетног дејства вода** – становништво и његова имовина морају се штитити од вода, уз уважавање законитости природних процеса и заштите природних вредности, као и економске оправданости ове заштите.
- **Начело „корисник плаћа”** – свако ко користи водно добро и водни објекат, односно водни систем, као добро од општег интереса, дужан је да за његово коришћење плати реалну цену.
- **Начело „загађивач плаћа”** – свако ко својим активностима проузрокује загађење воде дужан је да сноси трошкове мера за отклањање загађења.
- **Начело учешћа јавности** – јавност има право на информације о стању вода и раду надлежних органа у области вода, као и на укључење у процесе припреме и доношења планова управљања водама и контроле њиховог извршења.
- **Начело уважавања најбољих доступних техника** – при управљању водама морају се примењивати најбоље познате и доступне технике, које представљају најнапреднија достигнућа у одређеним областима.

4.3 Водни услови и акта

На основу Закона о водама, чланови 113 – 128 („Службени гласник РС”⁴ бр. 30/2010), а у складу са Правилником о садржини и обрасцу захтева за издавање водних аката („Службени гласник РС” бр. 74/10), у поступку планирања, пројектовања и изградње малих хидроелектрана предвиђено је издавање следећих водних аката (табела 1):

⁴ Јавно предузеће „Службени гласник” у складу са Законом о објављивању, објављује законе, прописе и друге акте.

Табела 1 Водни услови, акта и надлежне институције [14]

Назив документа	Надлежна институција
1. Мишљење у поступку издавања водних услова за израду планских докумената за мале хидроелектране	ЈВП „Србијаводе”
2. Мишљење у поступку издавања водних услова за израду техничке документације и изградњу мале хидроелектране	ЈВП „Србијаводе”
3. Водни услови за израду техничке документације за изградњу мале хидроелектране	Министарства пољопривреде и заштите животне средине – Републичка дирекција за воде
4. Извештај о испуњености услова из мишљења и водних услова за издавање водне сагласности на главни пројекат за изградњу мале хидроелектране	ЈВП „Србијаводе”
5. Водна сагласност на главни пројекат за изградњу мале хидроелектране	Министарства пољопривреде и заштите животне средине – Републичка дирекција за воде
6. Извештај о испуњености услова из водних услова и водне сагласности за издавање водне дозволе	ЈВП „Србијаводе”
7. Водна дозвола за коришћење вода за малу хидроелектрану	Министарства пољопривреде и заштите животне средине – Републичка дирекција за воде

4.4 Мале хидроелектране – правни прописи

Прописи за изградњу мале хидроелектране се могу поделити у две основне групе:

- прописи којима је уређена област планирања и изградње објеката,
- прописи којима је уређена област енергетике.

У групу прописа којима је уређена област планирања и изградње спадају: Закон о планирању и изградњи, подзаконски акти донети на основу закона којим је уређена област планирања, изградње и Закон о просторном плану Републике Србије, пратећи плански документи (регионални просторни планови, просторни планови јединице локалне самоуправе, просторни планови подручја посебне намене и урбанистички

планови: генерални урбанистички план, план генералне регулације и план детаљне регулације) и други прописи.

Законом о планирању и изградњи је уређен поступак добијања локацијске дозволе, грађевинске дозволе и употребне дозволе, док су планским документима дефинисани циљеви просторног планирања и развоја, просторног уређења, односно да ли је планирано да се у одређеном временском периоду изгради одређени објект на одређеном месту у Републици Србији. Да би се прибавиле локацијске и грађевинске дозволе, потребно је прибавити енергетскотехничке услове за прикључење на преносни или дистрибутивни електроенергетски систем, као и водне услове, водну сагласност и водну дозволу, које се издају у складу са Законом о водама и пратећим прописима овог закона.

У групу прописа којима је уређена област енергетике спадају: Закон о енергетици и пратећи прописи овог закона, Стратегија развоја енергетике Републике Србије, Програм остваривања Стратегије развоја енергетике Републике Србије и други горе наведени прописи који се односе на енергетску дозволу, лиценцу за обављање енергетске делатности, прикључење објекта на мрежу итд. Законом о енергетици је предвиђено да се енергетски објекти могу градити, ако Министарство рударства и енергетике изда енергетску дозволу подносиоцу захтева.

Све наведено представља законски и регулаторни оквир који треба да се користи као основа за даље законске и регулаторне реформе. Усвајањем подстицајних тарифа и кључних прописа од стране владе Републике Србије омогућава се пружање техничке помоћи потенцијалним инвеститорима у изградњи малих хидроелектрана.

Законски прописи који дефинишу мале хидроелектране, као и повлашћене произвођаче енергије, представљају основ да се потенцијални инвеститори уведу у право на изградњу и право на обављање производње.

4.5 Надлежне институције и извори права

Надлежне институције:

- Министарство рударства и енергетике – МРЕ,
- Јединица локалне самоуправе – ЈЛС,
- Агенција за енергетику – АЕ,
- Републички геодетски завод – РГЗ,
- Министарства пољопривреде и заштите животне средине – МПЗЖС,
- Републички хидрометеоролошки завод – РХМЗ,
- Електромрежа Србије – ЕМС,
- Електропривреда Србије – ЕПС,
- Србијаводе – ЈВП.

Извори права:

- Закон о енергетици («Сл. Гласник РС» бр. 84/04),
- Закон о планирању и изградњи («Сл. гласник РС» бр. 72/09 и 81/09),
- Закон о заштити животне средине («Сл. гласник РС» бр. 135/04 и 36/09),
- Закон о водама («Сл. гласник РС» бр. 30/10),
- Закон о концесијама («Сл. гласник РС» бр. 55/03),
- Закон о јавним предузећима и обављању делатности од општег интереса («Сл. гласник РС» бр. 25/00, 25/02, 107/05 и 108/05).

4.6 Стицање дозволе за изградњу мале хидроелектране

Највећи проблем са којим се сусреће сваки потенцијални инвеститор који покушава да своју идеју о изградњи мале хидроелектране спроведе у дело јесте набавка и прикупљање дозвола и сагласности. О каквом проблему се ради довољно говори и чињеница да велике компаније које су заинтересоване за улагања не могу на једноставан и брз начин да обезбеде сву потребну документацију. Недореченост правних прописа, нерегулисани имовинско правни односи и врло често пребацивање одговорности по питању надлежности, главни су узроци због којих су овакви објекти на подручју Србије још увек права реткост.

Генерално целокупна процедура издавања дозвола може се поделити на период пре изградње и после изградње објекта. Да би инвеститор започео изградњу објекта неопходна су следећа документа за стицање права на изградњу објекта мале хидроелектране:

- **Студија оправданости са идејним решењем**, израђује регистрована пројектантска фирма.
- **Прописивање водопривредних услова од Министарства пољопривреде и заштите животне средине**, уз достављање претходно добијена два мишљења од Републичког хидрометеролошког завода и Регионалног водопривредног предузећа, као и сагласност јединице локалне самоуправе (општине) да се могу градити предметни објекти на датој локацији са ситуацијом локације предвиђеног објекта.
- **Урбанистичка дозвола**, издаје општина, одељење за урбанизам.
- **Прописивање техничких услова за прикључење на електродистрибутивну мрежу**, издаје локална електродистрибуција.
- **Главни пројекат**, израђује регистрована пројектантска фирма.
- **Техничка контрола и потврда о исправности главног пројекта**, обављају надлежни ревизори.

- **Сагласност на главни пројекат од Министарства пољопривреде и заштите животне средине**, издаје Министарства пољопривреде и заштите животне средине.
- **Потврда о испуњености свих урбанистичких услова садржаних у урбанистичкој дозволи**, издају их разне институције у оквиру општине.
- **Урбанистичка сагласност да је пројекат у складу са урбанистичком дозволом**, издаје општина.
- **Доказ о праву својине над земљиштем или доказ о праву коришћења истог на одређени период**, издаје општина.
- **Елаборат у погледу мера заштите од пожара**, издаје општинска служба унутрашњих послова.

У појединим случајевима од стране општине издају се још неке специфичне дозволе и сагласности. На основу поднетих свих претходних докумената тражи се **издавање грађевинске дозволе** од стране општине.

Након изградње, а пре пуштања објекта у рад инвеститор је дужан да прикупи следеће сагласности и то:

- **Пројекат изведеног стања**, израђује регистрована пројектантска фирма.
- **Геодетско снимање објекта**, обавља регистрована фирма.
- **Доказе о квалитету радова, уграђеног материјала и опреме**, на основу контроле комисије коју формира општина.
- **Технички преглед**, обавља општинска комисија.
- **Мишљење општинског јавног предузећа за комуналне радове**, издаје јавно предузеће за комуналне радове.
- **Водопревредна дозвола** (максимално 10 година), Министарство за водопривреду.
- **Противпожарна сагласност**, издаје Министарство унутрашњих послова Републике Србије (МУП).
- **Потврда о испуњености услова за прикључење на електродистрибутивну мрежу**, издаје локална дистрибуција.
- **Уговор о испоруци електричне енергије**, издаје локална дистрибуција.
- **Употребна дозвола**, издаје општина.

Уколико инвеститор успе у разумном временском року да прикупи све наведне сагласности и дозволе може се сматрати да је правно питање мале хидроелектране решено. У оваквим пројектима трошкови израде техничке документације, издавање дозвола и услуге ревизора могу изнети до 20% целокупне инвестиције.

5 Река

5.1 Слив Западне Мораве

У Србији постоји 10 сливних подручја: Дунав, Сава, Колубара, Дрина, Велика Морава, Јужна Морава, Западна Морава, Тимок, Бели Дрим и слив који гравитира према Егејском мору.

Западна Морава је лева притока Велике Мораве. Западна Морава настаје у пољу Ташти, источно од Пожеге, од Голијске Моравице и Ћетиње. У овом пољу се у Ћетињу са леве стране улива Скрапеж. На мање од једног километра од ушћа Скрапежа, Ћетиња се среће са Голијском Моравицом, стварајући Западну Мораву. Због близине ушћа Ћетиње, Скрапежа и Голијске Моравице, све три реке сматрају се директним крацима Западне Мораве. Пошто је Голијска Моравица најдужа, она се сматра главним краком. Мерено од извора Голијске Моравице, Западна Морава је дугачка 308 km, док је дужина саме Западне Мораве 208 km (слика 15) [15].



Слика 15 Слив Западне Мораве [16]

Сливно подручје има површину око 15.849 km². На истоку речно корито се сужава кроз Овчарско-кабларску клисуру. У чачанској котлини, речни ток се проширује. Просечна ширина реке износи око 35 m, са максималним дубинама и до 4 m.

Прошавши кроз Овчарско-кабларску клисуру њено корито се шири, пролази поред Чачка и Краљева. У непосредној близини Краљева, у Западну Мораву се улива река Ибар најважнија притока (272 km).

Река Западна Морава протиче поред Чачка, Краљева, Врњачке Бање, Трстеника и Крушеваца, да би се у Параћинској котлини спојила са Јужном Моравом и формирала Велику Мораву. Западна Морава зна врло често да се излије и поплави околна поља и усеве, формирајући тако плавне зоне, због бујичне природе њених притока, првенствено Ибра.

Структура дна се мења у зависности од подлоге терена кроз коју протиче река и може бити каменита, шљунковита, песковита, а у низводном делу тока муљевита. На обалама реке развијена је бујна вегетација. Низводно од места где се улива Ибар у Западну Мораву, река је дубља и шири, нарочито на местима где се стварају вирови.

У хидрогеографском погледу ток Западне Мораве од ушћа Ибра до Јасике је специфичан по великом броју притока. Западна Морава прима 85 притока, а међу њима се посебно истиче Ибар, а потом Расина и **Бјелица**, док су од левих притока веће Чемерница, Дичина и Груза.

Река Западна Морава меандрира⁵. Карактеристичан меандар је Вир код Новог Села где водоток мења смер под правим углом. Реку одликују промене тока у релативно кратким временским периодима, тако да постоји велики број рукаваца и бара. Један од већих комплекса са барама су Подунавачке баре у близини села Подунавци, лоциране између Краљева и Врњачке Бање које су настале експлоатацијом шљунка. Цело сливно подручје је густо насељено тако да је антропогени утицај изузетно изражен.

Ћетиња извире на југозападу планине Таре, лева је саставница Западне Мораве, дугачка 75 km. Код Ужица Ћетиња се пробија кроз кањон дугачак 8 km и висок до 300 m. На изласку из кањона налази се мања акумулација, на којој је била инсталирана прва хидроелектрана у Србији далеке 1900. године. Највећа притока Ћетиње је река Скрапеж, на којој је дванаест километара узводно од Ужица направљено акумулационо језеро.

Скрапеж извире на југоисточним падинама планине Повлена. Реке Сечица и Годљевача представљају његове саставнице. Дужина тока је 48 km. Дно је претежно шљунковито са крупнијим камењем средином тока, а у доњем делу тока има муљевитих делова.

Моравица је десна саставница Западне Мораве. Извире испод западних обронака Голије, због чега је називају и Голијска Моравица. Врело се налази на 1350 m надморске висине, а назива се и „Глава Мораве”. У горњем току до Ивањичке котлине, Моравица протиче уском и дубоком долином, где Моравица прима воде Голијске и Лучке реке са десне стране и Ношнице са леве. У ивањичком пределу речно корито је усечено, малог је пада, а река меандрира. У њу се овде улива лева притока, Грабовичка река. Велики Рзав је највећа притока Моравице и улива се у њу код Ариља. Дужина тока Моравице је 98 km. У горњем току дно Моравице је каменито и шљунковито, просечна ширина реке је око 5 m, а низводно Моравица је широка око 25 m [15].

⁵ Представља појаву вишеструке промене правца реке на кратком растојању.

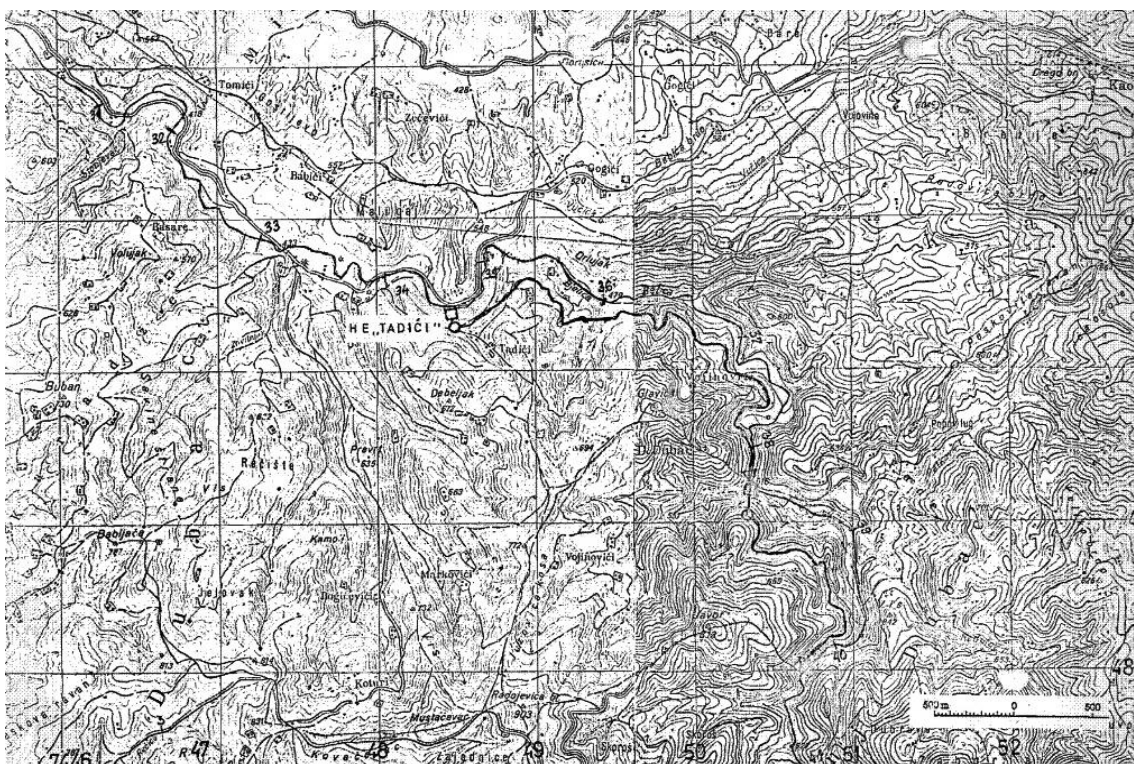
5.2 Река Бјелица

Бјелица је десна притока Западне Мораве. Изворе на 930 m надморске висине у селу Горњи Дубац. Протиче средином општине Лучани од југоистока према југозападу дужином око 41 km од извора до ушћа у Западну Мораву код села Дљин. У горњем току Бјелица је планинска река, са дубоком и уском клисурастом долином. Слив Бјелице, површине 376 km², издужен је у правцу тока реке и одликује се изразитом неравномерношћу, односно неравномерним распоредом левих и десних притока. Бројније су десне притоке, чија су изворишта на падинама планине Јелице.

Бјелица се улива у Западну Мораву код Гугаљског моста на 298 m надморске висине у близини Драгачева [17].

Река Бјелица препозната је као хидроенергетски потенцијал вода Србије и као таква уврштена је у **Катастар малих хидроелектрана**⁶, као река на којој је предвиђена изградња мале хидроелектране са Пелтоновом турбином. Подаци који су преузети из катастара малих хидроелектрана су проток водотока (проток износи 0,47 m³/s) и расположиви бруто пад водотока (бруто пад износи 61,5 m) реке Бјелице [18].

Преузета вредност протока од 0,47 m³/s узима у обзир биолошки минимум тј. ово је вредност која остаје приликом одузимања вредности биолошког минимума (10%) од укупног протока реке Бјелице.



Слика 16 Географски приказ слива реке Бјелице [18]

⁶ Јавна књига која садржи евиденцију потенцијалних река Србије, на којима је могућа изградња МХЕ.

6 Основи теорије водних турбина

6.1 Коришћење енергије воде

Радна течност водних турбина је вода. Она је носилац енергије која се у турбини може искористити [19]. Мера енергије једног речног тока је јединична енергија садржана у јединици масе течности и дата је изразом (1):

$$Y = \frac{A}{m} \quad (1)$$

Y – јединична енергија речног тока [J/kg]

A – расположиви рад [J]

m – укупна маса воде [kg]

Обично се јединична енергија, или јединични рад у датом проточном пресеку, ако је струјање воде устаљено, састоји од потенцијалне енергије Y_z ⁷, притисне енергије Y_p ⁸ и кинетичке енергије Y_v ⁹:

$$Y = Y_z + Y_p + Y_v \quad (2)$$

Y_z – потенцијалне јединична енергија [J/kg]

Y_p – притисна јединична енергија [J/kg]

Y_v – кинетичка јединична енергија [J/kg]

Потенцијална јединична енергија у датом проточном пресеку, при устаљеном струјању једнака је (3):

$$Y_z = g \cdot z \quad (3)$$

g – убрзање силе земљине теже [m/s²]

z – висинска разлика тежишта [m]

Висинска разлика тежишта, представља најчешће узиману коту код турбина за ниво горње воде (ГНВ) и за ниво доње воде (ДНВ) у односу на неку референтну раван. Најчешће су то коте надморске висине.

⁷ Условљена је положајем тела у односу на друго тело или систем.

⁸ Енергија која се јавља деловањем притиска у посматраном пресеку.

⁹ Енергија коју тело поседује услед кретања.

Притисна јединична енергија је енергија која одговара притиску у посматраном пресеку и израчунава се (4):

$$Y_p = \frac{p}{\rho} \quad (4)$$

p – притисак у посматраном пресеку [Pa]

ρ – густина флуида [kg/m^3]

Кинетичка јединична енергија је енергија којом располаже јединица масе течности у посматраном пресеку и једнака је (5):

$$Y_v = \frac{c^2}{2} \quad (5)$$

c – брзина протицања флуида [m/s]

Укупна јединична енергија у датом проточном пресеку је (6):

$$Y = g \cdot z + \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} \quad (6)$$

Под јединичном енергијом или јединичним радом код турбина се подразумева промена струјне енергије при проласку воде кроз турбину од њеног улазног до излазног пресека, тј. од пресека 1 – 1 па до пресека 2 – 2 (слика 17). Реални флуид има одређену вискозност и због тога при његовом кретању долази до трења о бочне стране, дно канала и међусобног трења делића течности између себе. Ова дисперзија струјне енергије¹⁰ умањује јединичну енергију радне течности. У механици флуида и хидрауличним машинама ова дисипована енергија је позната под појмом хидраулични губици Y_g . Величина ове енергије хидрауличних губитака дата је изразом (7), [19]:

$$Y_g = k \cdot Q^2 \quad (7)$$

k – коефицијент губитака [1]¹¹

Q – проток флуида [m^3/s]

¹⁰ Расипање струјне енергије.

¹¹ Утврђује се експериментално.

6.2 Јединични рад турбина

Посматрајући шематски приказ јединичне енергије на *слици 17*, може се закључити да свака приказана јединична енергија, почев од горњег нивоа (А) до доњег нивоа воде (В), која се налази на некој висини у односу на референтну раван *a*, се састоји од укупне струјне енергије (линија *b*) и потенцијалне енергије (линија *c*). Са 1 – 1 је означен улазни пресек у турбину, а са 2 – 2 излазни пресек из турбине. Располагаива јединична енергија у акумулацији (ГНВ) је (8):

$$Y = g \cdot z_A + \frac{p_A}{\rho} + \frac{c_A^2}{2} \quad (8)$$

z_A – висинска разлика тежишта у акумулацији нивоа А [m]

p_A – притисак у акумулацији на нивоу А [Pa]

c_A – брзина протицања флуида из акумулације на нивоу А [m/s]

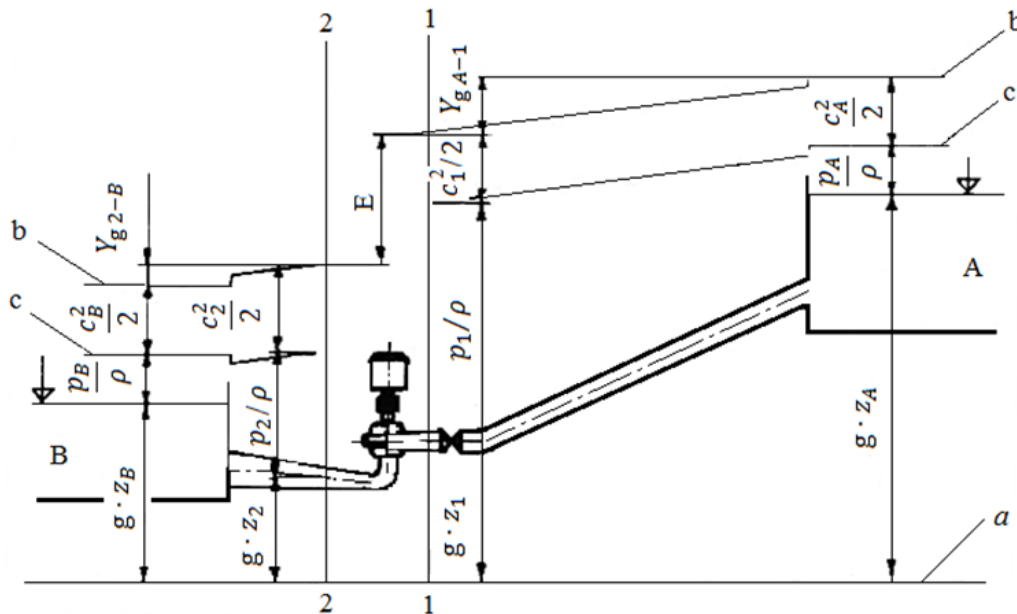
Располагаива јединична енергија у излазном каналу дата је изразом (9):

$$Y = g \cdot z_B + \frac{p_B}{\rho} + \frac{c_B^2}{2} \quad (9)$$

z_B – висинска разлика тежишта резервоара нивоа В [m]

p_B – притисак у резервоару на нивоу В [Pa]

c_B – брзина протицања флуида у резервоару на нивоу В [m/s]



Слика 17 Шематски приказ турбинског постројења [19]

Разлика расположивих јединичних енергија у пресецима А и В дефинише јединични рад водотока, који се може искористити у турбини (10):

$$Y = Y_A - Y_B = g \cdot (z_A - z_B) + \frac{p_A - p_B}{\rho} + \frac{c_A^2 - c_B^2}{2} \quad (10)$$

Y_A – јединична енергија у акумулацији на нивоу А [J/kg]

Y_B – јединична енергија у излазном каналу на нивоу В [J/kg]

Пошто је притисак у пресецима А и В једнак ($p_A = p_B$), као и због великих попречних пресека, може се претпоставити да су и брзине струјања воде у њима једнаке $c_A = c_B = 0$. На основу дефинисаних претпоставки разлику наведених енергија можемо коначно приказати путем обрасца (11):

$$Y = Y_A - Y_B = g \cdot (z_A - z_B) \quad (11)$$

Ова разлика јединичних енергија назива се геодетска бруто расположива јединична енергија, Y_{br} . Укупна расположива јединична енергија на улазном делу турбине (пресек 1 – 1) према *слици 17* једнака је (12):

$$Y = g \cdot z_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} \quad (12)$$

z_1 – висинска разлика тежишта за пресек 1 – 1 [m]

p_1 – притисак у пресеку 1 – 1 [Pa]

c_1 – брзина протицања флуида за пресек 1 – 1 [m/s]

Укупна расположива јединична енергија у излазном пресеку 2 – 2 турбине према *слици 17* дата је изразом (13):

$$Y = g \cdot z_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} \quad (13)$$

z_2 – висинска разлика тежишта за пресек 2 – 2 [m]

p_2 – притисак у пресеку 2 – 2 [Pa]

c_2 – брзина протицања флуида за пресек 2 – 2 [m/s]

Посматрајући *слику 17* добија се да је (14):

$$Y_1 = Y_A - Y_{gA-1} \quad (14)$$

Y_1 – јединична енергија улазног пресека [J/kg]

Y_{gA-1} – дисипована струјна енергија од пресека А до улазног пресека 1 – 1 [J/kg]

У односу на горњи израз може се написати и израз за излазни пресек (15):

$$Y_2 = Y_B - Y_{g2-B} \quad (15)$$

Y_2 – јединична енергија излазног пресека [J/kg]

Y_{g2-B} – дисипована јединична енергија потребна за савлађивање хидрауличних отпора на путу од излазног пресека турбине 2 – 2 до пресека В доње воде [J/kg]

Укупна јединична енергија турбине се одређује разликом јединичних енергија у улазном и излазном пресеку турбине (16):

$$Y = Y_1 - Y_2 \quad (16)$$

$$Y = g \cdot (z_1 - z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} - \sum Y_g \quad (17)$$

Y_g – дисипована енергија тока у доводном и одводном воду турбине [J/kg]

Јединична енергија турбине која се губи Y_g (дисипована енергија тока у доводном и одводном воду турбине) једнака је (18):

$$\sum Y_g = Y_{gA-1} + Y_{g2-B} \quad (18)$$

Са уведеним претпоставкама за оптимизацију хидрауличног решења водотока неопходно је са гледишта минимизације хидрауличних губитака и са економског аспекта омогућити веће коришћење расположиве јединичне енергије. Са гледишта коришћења укупног јединичног рада за добијање електричне енергије у МХЕ посредством турбине, треба користити поред потенцијалне енергије, кинетичку енергију и енергију притиска.

6.3 Јединични рад акцијских турбина

Водне турбине које за свој рад користе само кинетичку јединичну енергију називају се турбинама једнаког притиска – акцијске водне турбине. Карактеристика ових турбина је исти притисак испред и иза радног кола (и то обавезно атмосферски). Типичан представник ових водних турбина је Пелтонова водна турбина (слика 18).

Ради објашњења расположиве јединичне енергије водотока уведене су следеће ознаке: улазни пресек турбине (1 – 1), улазни пресек у радно коло (1' – 1'), излазни пресек турбине (2 – 2'), млазница (а), лопатике радног кола (b) и млаз воде по изласку из млазнице (с). Поједина растојања од референтне равни такође су обележена.

$$P_1 = P_2 = P_b \quad (24)$$

Ако изразе (23) и (24) уведемо у једначину (22) добија се следећи израз (25):

$$\frac{P_1''}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} = \frac{c_1'^2}{2} + Y_{g1-1} = \frac{c_2^2}{2} + Y_{g1-2} \quad (25)$$

Расположива јединична енергија или јединични рад се у улазном пресеку турбине (млазници), трансформише у кинетичку енергију. При овој, пренос хидрауличне енергије на радно коло, као и њена трансформација у механички рад одвија се при истом атмосферском притиску испред и иза радног кола.

Јединични рад акцијске турбине се коначно може написати следећим изразом:

$$Y = \frac{c_2^2}{2} + \frac{P_1''}{\rho} \quad (26)$$

Применом одређених трансформација, једначина (26) се може написати и у следећем облику (27):

$$Y = \frac{c_1'^2}{2} + \sum Y_{gM} \quad (27)$$

$\sum Y_{gM}$ – губици енергије у млазници [J/kg]

На овај начин се сва расположива енергија по облику губитака у млазници трансформише у енергију водене струје $c_1'^2 / 2$. Ово је основна карактеристика акционе турбине.

6.4 Хидраулични степен корисности

Ако се усвоји да је струјање кроз турбину устаљено и да струји невискозна и нестишљива течност, онда нема губитака струјне енергије, па дисипована јединична енергија има нулту вредност. Због тога хидраулична снага турбине се израчунава преко једначине (28), [19]:

$$P_h = \rho \cdot Q \cdot Y \quad (28)$$

P_h – хидраулична снага турбине [W]¹²

¹² Представља теоријску снагу турбине.

У даљем разматрању мора се узети у обзир и то да кроз турбину протиче реална вискозна течност (вода), па дисипована јединична енергија има неку коначну бројну вредност због хидрауличних отпора при струјању. Стварна снага коју може остварити турбина је мања у односу на теоријску снагу (хидрауличну снагу), па је (29):

$$P = \rho \cdot Q \cdot (Y - Y_g) \quad (29)$$

P – хидраулична снага турбине [W]¹³

Однос снага при струјању стварне вискозне течности и идеалне невискозне течности даје релативну величину. Однос ових снага дефинише хидраулични степен корисности (30):

$$\eta_h = \frac{P}{P_h} = \frac{Y - Y_g}{Y} = 1 - \frac{Y_g}{Y} \quad (30)$$

η_h – хидраулични степен корисности [/]

¹³ Представља стварну снагу турбине.

7 Пелтонова турбина

Најчешћи случај примене акцијске водне турбине у извођењу МХЕ је Пелтонова турбина. Предност њене примене лежи у томе што је у конструктивном и хидрауличном погледу релативно најједноставнија. Област њене примене код МХЕ креће се за јединичне радове 500 – 4000 J/kg и протоке 0,2 – 3 m³/s [3]. Ако се МХЕ изводи као микроелектрана онда се област примене Пелтонове турбине простире и за јединичне радове мање од 200 J/kg и протоке 0,08 – 0,2 m³/s. Доводни уређај чини млазница са регулационом иглом, она је кружног попречног пресека и из ње истиче вода која удара у лопатицу радног кола. Млаз воде удара тангенцијално на подеони круг лопатице. У млазници се укупни доведени јединични рад трансформише у кинетичку енергију, због чега вода из млазнице излази великом брзином (31), [19]:

$$c = \varphi \sqrt{2 \cdot Y} = (1,343 - 1,375) \sqrt{Y} \quad (31)$$

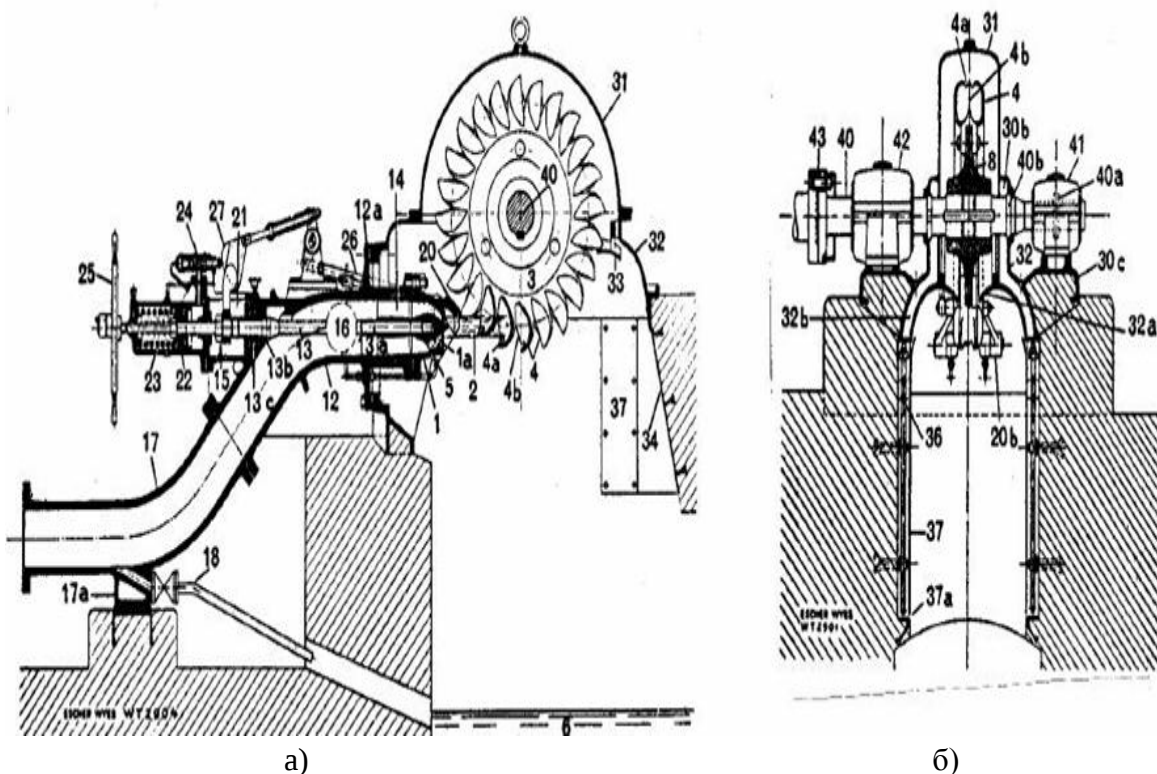
φ – коефицијент контракције млаза [/]

Коефицијент контракције млаза обично износи 0,95 – 0,973 при степену корисности млазнице 0,95 – 0,98. Конструкција Пелтонове турбине је одређена специфичним протоком воде, као и преносном и ротационом брзином. Број млазница турбине зависи од вредности специфичне брзине. Повећањем специфичне брзине воде повећава се број млазница турбине. Ова зависност пружа ширу могућност избора броја млазница конструктору електране. Ако се на основу добијеног прорачуна одлучује између турбине са четири или пет млазница, треба знати да ће цена израде турбине са пет млазница бити знатно нижа од турбине исте снаге са четири млазнице. Међутим, потребно је да млазнице буду на таквом међусобном растојању да млазеви воде немају негативни међусобни утицај, док у пракси то значи да је број млазница код Пелтонове турбине ограничен на шест [19], [20].

Пелтонове турбине могу бити постављене на хоризонталном или вертикалном вратилу. Хоризонталне инсталације се срећу у случајевима турбина малих и средњих брзина са једном или две млазнице. Постоје и случајеви са четири млазнице, али су веома ретки.

7.1 Хоризонталне Пелтонове турбине

Вода (слика 19) из доводне цеви (12) пролази кроз млазницу (1) одакле на атмосферском притиску, у облику компактног млаза, струји до лопатице (4). Након интеракције воденог млаза и лопатице, вода се слива низ отворе до одводног канала (6).

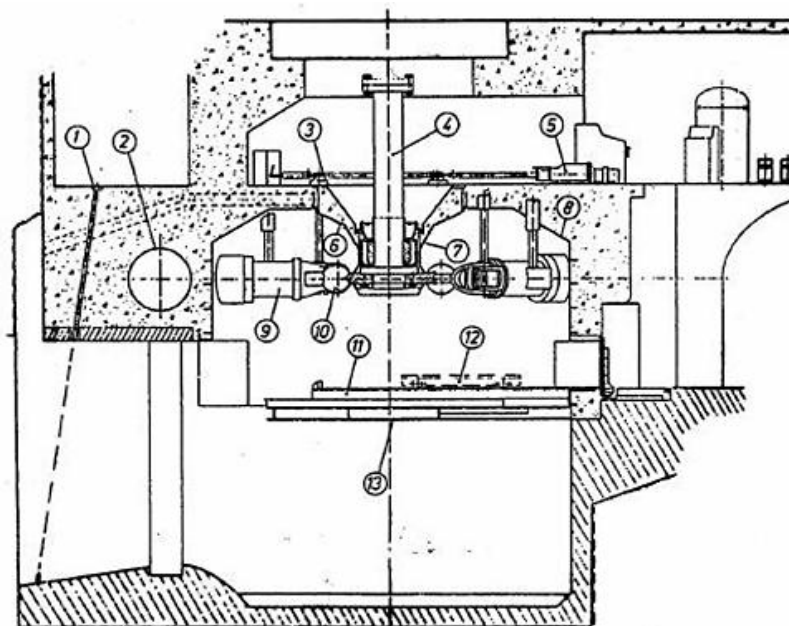


Слика 19 Шема хоризонталне Пелтонове турбине са једном млазницом
(а) – радијални пресек, (б) – уздужни пресек

- 1 – млазница, 2 – млаз, 3 – радно коло, 4 – лопатица радног кола, 5 – игласта глава,
6 – ниво воде у одводном каналу, 8 – ротациони диск, 12 – улазно подручје,
13 – игласта шипка, 17 – излазно подручје, 18 – одводна цев,
20 – дефлектор (одбојник), 21 – повратна веза (шипка), 22 – клип сервомотора,
23 – опруге, 24 – електромагнетни вентил, 25 – контролни вентил,
31, 32 – кућиште турбине, 32 а – застор за одвођење воде из радног кола,
32 б – дренажни канали, 34 – челична облога, 40 – турбинско вратило,
40 а – место за аксијални лежај, 42 – лежај, 43 – спојница [20]

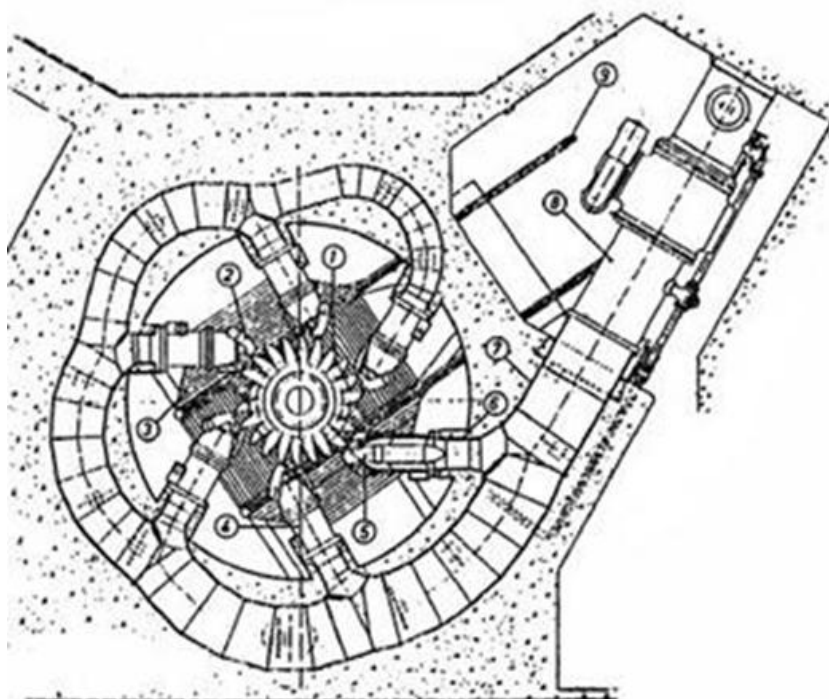
7.2 Вертикалне Пелтонове турбине

Пелтонове турбине релативно већих димензија и са више млазница најчешће се постављају на вертикално вратило. Млазнице се распоређују симетрично око радног кола, тако да су силе које се преносе радном колу подједнако распоређене. Слика 20 и слика 21 приказује хоризонтални и вертикални пресек, вертикалне Пелтонове турбине са шест млазница, респективно.



Слика 20 Вертикална вишемлазна Пелтонова турбина (вертикални пресек)

1 – цеви за тест ефикасности, 2 – разводна цев, 3 – дефлекторски механизам, 4 – турбинско вратило, 5 – сервомотор дефлектора, 6 – поклопац лежаја радног кола, 7 – лежај, 8 – турбинско вратило, 9 – кућиште турбине, 10 – радно коло, 11 – шине теретних кола радног кола, 12 – теретна кола, 13 – контролна платформа [19]



Слика 21 Вертикална вишемлазна Пелтонова турбина (хоризонтални пресек)

1 – радно коло, 2 – дефлектор (одбојник), 3 – контролна платформа, 4 – главни инјектор са игластим сервомотором, 5 – игла, 6 – рачва, 7 – разводник, 8 – експанзиона/раставна веза, 9 – шине теретних кола за монтажу радног кола [19]

7.3 Основни елементи Пелтонове турбине

Пелтонове турбине се користе код великих геодетских падова (250 – 2000 m) и са сразмерно мањим протоцима ($0,2 - 3 \text{ m}^3/\text{s}$). Због тога је специфична брзина обртања турбине мала. Могу бити различитих величина и веома су прикладне за употребу у микро хидроелектранама.

Једна од највећих Пелтонових турбина се налази у хидроцентрали *San Carlos* у Колумбији и њено радно коло има масу око 23,5 t, пречник 4,3 m, а број обртаја је 300 min^{-1} . Такође, постоје радна кола са масом мањом од 1 kg и пречника неколико центиметара.

Код Пелтонове турбине вода се доводи на лопатице радног кола тангенцијално, цевоводом под притиском који на свом крају има једну или више млазница које су смештене унутар кућишта турбине. На основи радног кола се налазе лопатице (обично 12 – 40) које напада млаз воде великом брзином пошто изађе из млазнице. При удару у лопатицу вода мења смер и због те промене количине кретања, на лопатицу делује активна сила која ствара обртни момент тј. окреће радно коло турбине. Турбине које имају један или два спроводна апарата конструишу се са хоризинталним вратилом, због техничко-контруктивних ограничења. Турбине које садрже више од два спроводна апарата, конструишу се са вертикалним вратилом.

Основни елементи Пелтонове турбине су:

- лопатице,
- основа радног кола са вратилом и лежајима,
- кућиште,
- спроводни апарат – млазница,
- уређаји за регулацију,
- замајац ¹⁴и хидраулична кочница [21].

7.3.1 Лопатице

Лопатица се састоји од два удубљења овалног облика између којих се налази сечица лопатице. Задатак сечице је да пресече млаз воде чиме се постиже да половина млаза улази у једну удубљење, а друга половина млаза у друго удубљење лопатице.

Доњи део лопатице испод сечице је прорезан да вода не би ударала у леђа лопатица и да би водени млаз, кад почне да делује на лопатицу одједном доспео што дубље, а на крају напустио лопатицу под углом који је приближне вредности од 180° . Лопатице Пелтонове турбине се обично израђују појединачно па се затим монтирају на основу радног кола и причвршћују конусним чеповима. Глава чепа и навртка, која служи као осигурач, делимично се заварује за руку лопатице и тако осигурава везу.

¹⁴ То је машински елемент који служи за складиштење енергије приликом ротације.

Ако се на руци лопатице јаве сувише велика напрезања, онда се лопатице израђују двоструко, са заједничком руком. Рука лопатице у том случају има два чепа за учвршћивање. Најповољнија конструкција је када се лопатице истовремено изливају са основом радног кола, али је оваква израда веома захтевна.

При изради и постављању лопатица мора се обезбедити максимална тачност, јер се при монтажи сечице свих лопатица морају налазити у истој равни, иначе ће при раду сигурно доћи до осцилација које ће оштетити лежаје, а касније довести и до већих хаваријских оштећења и испадања турбине из рада. На *слици 22* је приказан изглед лопатице Пелтонове турбине [22].

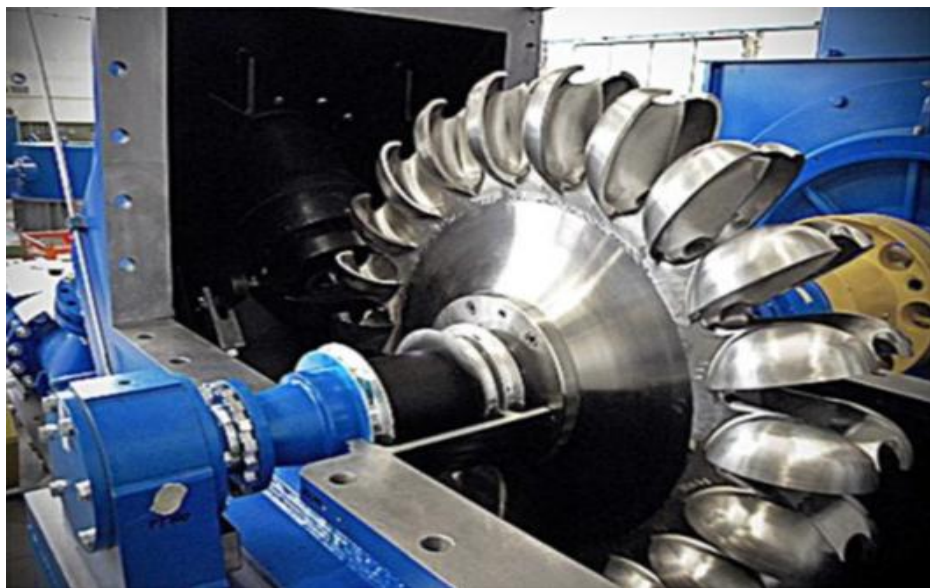


Слика 22 Лопатица Пелтонове турбине [22]

7.3.2 Основа радног кола са вратилом и лежајима

Основа радног кола турбине је обично изливена од специјалног ливеног челика, било заједно са лопатицама или посебно, али може бити и кована. Главчина основе радног кола се на вратило обично везује клином, а може и завртњима за прстен који је саставни део вратила што зависи од саме конструкције вратила и основе радног кола турбине.

Лежаји вратила су обично клизни и нормалне конструкције. Они су радијални, јер због симетричности лопатица аксијалне силе скоро и да нема. Кућишта лежаја су дводелна и лако заменљива. Ако је снага турбине велика или је број обртаја турбине велики, уље за подмазивање се мора хладити. Уместо сопственог вратила са два радијална лежаја, за мање турбине се може усвојити конструкција која подразумева навлачење радног кола турбине на осовину генератора [23].



Слика 23 Приказ вратила Пелтонове турбине и лежаја [23]

7.3.3 Кућиште турбине

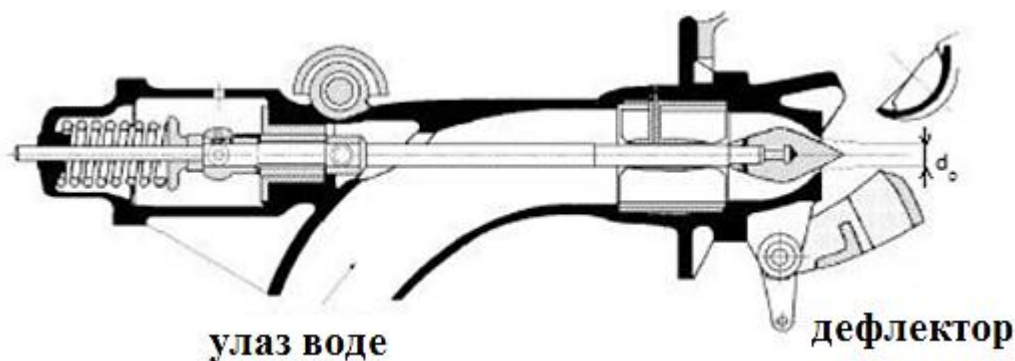
Оклоп турбине служи као заштита, а истовремено има и задатак да воду која је истекла из лопатице одведе у доњи канал (слика 24). Обично је оклоп турбине састављен из два дела. Горњи део је поклопац и он је лакши, док је доњи део масиван и обезбеђује миран рад турбине. Заједно са оклопом су изливени носачи на које се постављају турбинска лежишта. Код мањих турбина кућиште турбине односно оклоп се израђује од лима [23].



Слика 24 Кућиште турбине [23]

7.3.4 Спроводни апарат

Спроводни апарат има задатак да воду у виду млаза уведе у турбину и да је у одређеном правцу упуту ка радном колу. Посебан део спроводног апарата је млазник који при раду турбине трпи велика оптерећења. Облик млазника и копља је такав да се канал између њих сужава идући ка излазу при било ком положају копља, јер је потребно да вода пролазећи кроз овај канал добије убрзање без обзира да ли је копље мање или више увучено.



Слика 25 Спроводни апарат – млазница [23]

Геометрија млазника и врха копља је таква да честице воде које се крећу близу зидова млазника имају већу брзину него честице које се крећу у близини површине копља. Због оваквог облика млазника и копља струјна влакна се збијају и дају компактан млаз. Простор између зидова млазника и копља се постепено сужава, при сваком положају копља, да не би дошло до нагле промене брзине и притиска воде.

Млаз има брзину $c_0 = 0,98\sqrt{2 \cdot g \cdot H}$ на месту мало удаљеном од врха копља, јер је тек на том месту сва енергија притиска претворена у брзину [23].

Уређај за регулисање

Главни елемент спроводног апарата (млазнице) је уређај за регулисање, који се састоји од:

- Копља, које се помера напред/назад и на тај начин се променом пресека у млазнику регулише проток млаза.
- Скретача млаза, чији је задатак да у тренутку наглог растерећења брзо уђе у млаз и скрене га, тако да више не погађа лопатицу, чиме је омогућено копљу да се лагано помери напред и потпуно затвори млазник, спречавајући на тај начин хидраулични удар до кога би дошло у случају наглог затварања.
- Осталих елемената, неопходних за контролу копља и скретача млаза.

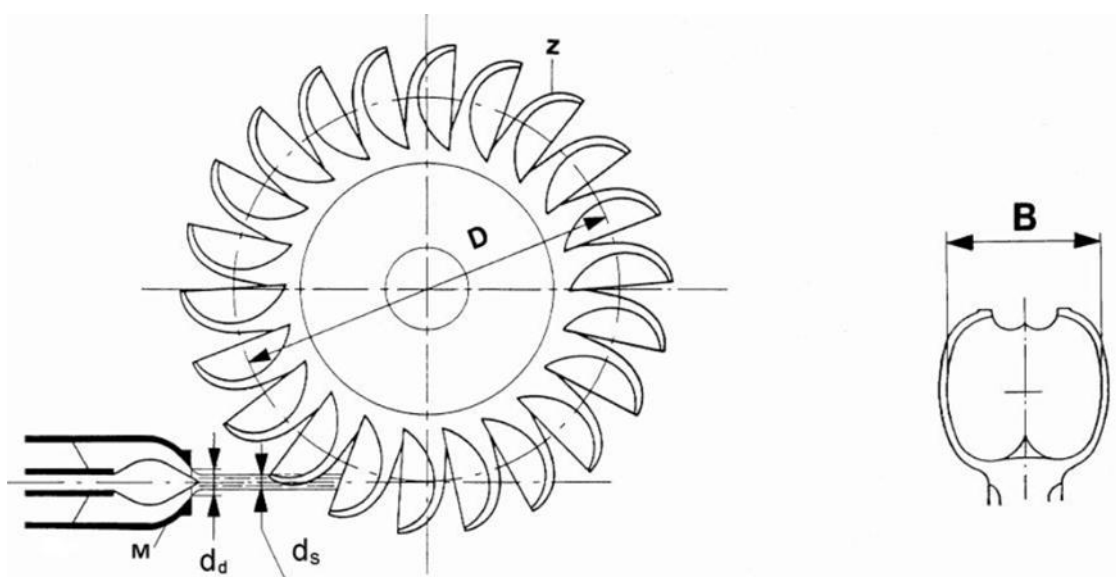
Замајац и хидраулична кочница

Турбина је за генератор везана обично еластичном спојницом. Код генератора наизменичне струје, маса ротора је обично довољно велика (у прописаним границама). Међутим, код генератора једносмерне струје, готово увек се маса обртних делова агрегата мора повећати, додавањем посебног замајца.

Кад се турбина потпуно растерети и искључи из погона, радно коло се и даље окреће, јер је маса обртних делова агрегата прилично велика. Заустављање турбине би трајало врло дуго и зато се код већих агрегата поставља хидраулична кочница у виду мањег млазника, чији млаз при кочењу, погађа леђа лопатица.

7.4 Протицање воде кроз турбину

Код Пелтонове турбине млаз пречника d_0 (слика 26) излазећи из млазнице M , удара у лопатицу, која је оштром ивицом подељена на два једнака удубљења овалног облика, а из ње излази скоро у супротном смеру [11].



Слика 26 Основне димензије радног кола [11]

Лопатице су постављене на основу радног кола тако да се средње оштрице свих лопатица налазе у истој равни, која је нормална на осу турбине и пролази кроз средину отвора млазнице. Млаз воде, који излази из врха отвора млазнице великом брзином, је обележен са c_0' . Занемарује се растојање између врха млазнице и лопатице (оно је у реалним условима веома мало) и сматра се да вода у овом случају има праволинијски правац кретања, тј. да је њена путања тангента на основни круг турбине.

Брзина воде се незнатно мења тј. апсолутна брзина c_1 , којом вода долази на лопатицу, није једнака апсолутној брзини c_0' са којом вода избија из врха отвора

млазнице. Делић воде који се кретао у оси млаза доспева у тачку $1'$ (слика 27) са брзином c_1' . Пошто се тачка $1'$ налази на основном кругу, она ће се због обртања основе радног кола кретати по кругу, па ће у положају $1'$ имати неку обимну брзину u .

Познато је да обимна брзина има правац тангенте на круг по коме се тачка креће. Из овога произилази да је код Пелтонове турбине правац апсолутне брзине c_1' , са којом вода долази на радно коло, једнака правцу обимне брзине u . То значи да се лопатица, а са њом и тачка $1'$, креће брзином u . Делић воде који је доспео у тачку $1'$ креће се по лопатици неком релативном брзином w_1' . Очигледно је да мора бити [11]:

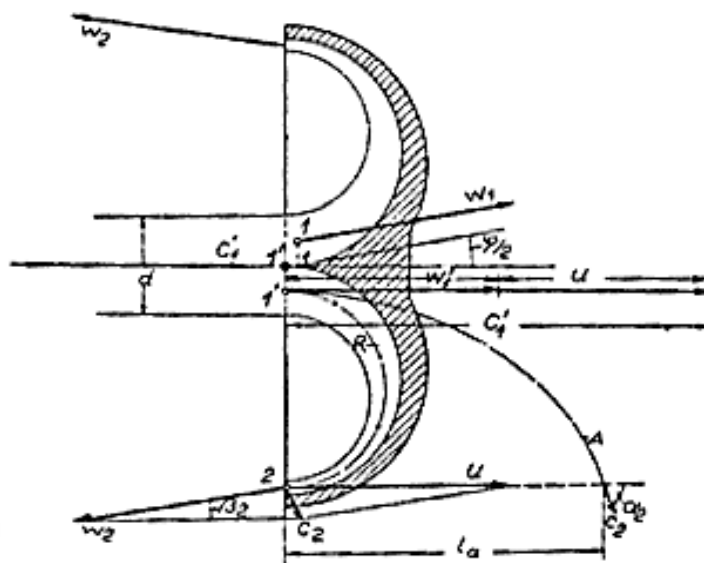
$$w_1' = c_1' - u \quad (32)$$

w_1' – релативна брзина делића $1'$ [m/s]

c_1' – апсолутна брзина делића $1'$ [m/s]

u – обимна брзина [m/s]

јер се лопатица, на којој се тачка $1'$ налази, креће брзином u па зато брзина делића $1'$ (w_1') у односу на носилац тј. лопатицу, мора бити мања за вредност u . Троугао брзина се своди на праву линију.

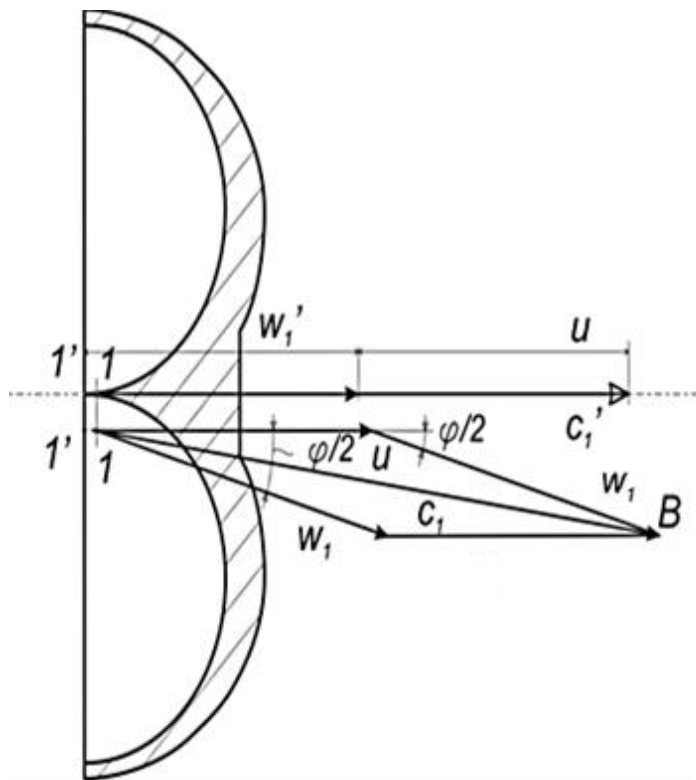


Слика 27 Троугао брзина код Пелтонове турбине [11]

Види се да при доласку на лопатицу тј. у тачку $1'$ на оштрицу лопатице, вода има релативну брзину w_1' , а већ у тачки 1 скреће и мења угао за $\varphi / 2$, тј. да се креће брзином w_1 . Иако угао $\varphi / 2$ није сасвим мали (износи $7 - 15^\circ$) обезбеђен је благ прелаз тако да нема удара ни значајних губитака енергије. Због тога је величина брзине воде у

лопатици остала скоро непромењена, али је правац промењен па релативна брзина у тачки 1, обележена са w_1 заклапа угао $\varphi / 2$ са правцем обимне брзине.

На слици 28 сложена су два проста кретања делића воде и то по основном кругу обимном брзином u и по лопатици релативном брзином w_1 . Тако се добија апсолутно кретање делића воде брзином c_1 која је резултанта брзина u и w_1 , а самим тим је одређен и њен интензитет и правац.



Слика 28 Троугао брзина [11]

Вода се креће по сечици тј. по унутрашњој страни лопатице мењајући правац и смер. Вода на крају напушта лопатицу у смеру који је за око $160 - 175^\circ$ супротан од улазног. У случају да нема отпора трења о зидове лопатице и између самих делића воде (због скретања млаза), онда је релативна излазна брзина w_2 једнака улазној брзини w_1 . Код Пелтонове турбине се сва расположива енергија, кад одбијемо губитке у цевима, претвара у енергију брзине (по изласку из врха отвора млазнице) па, (по Бернулијевој једначини) је енергија која нам стоји на располагању у млазу (33):

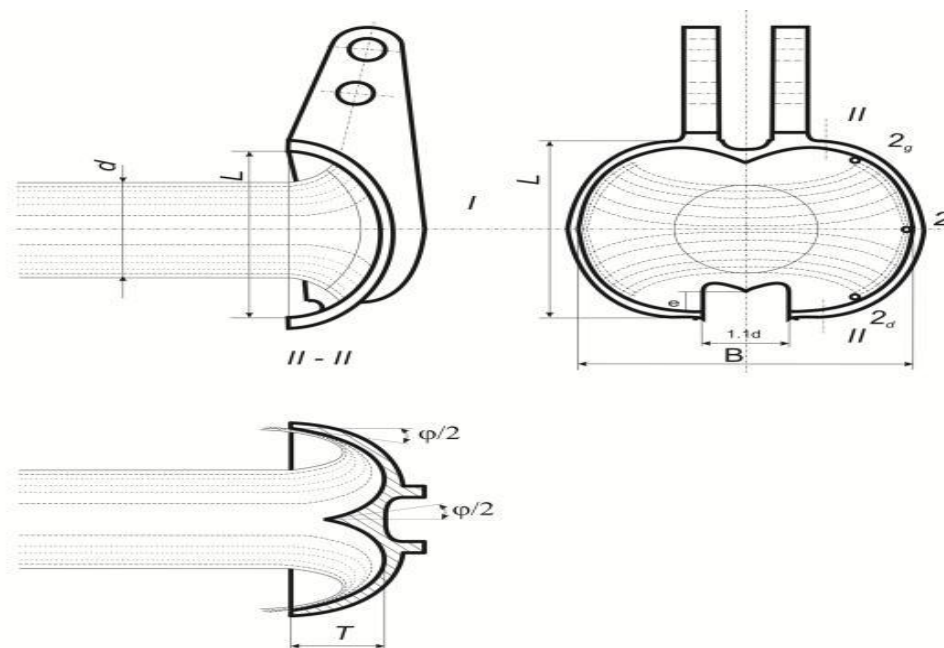
$$H_0 = \frac{c_0^2}{2g} \quad (33)$$

Губитак енергије, који настаје због савлађивања отпора трења при кретању воде кроз лопатице, обележава се са h_k , и одређује се множењем расположиве енергије млаза са коефицијентом отпора (ρ_2). Губитак је представљен следећим изразом (34) и креће се у границама $0,03 - 0,1$.

$$h_k = \rho_2 \frac{c_0^2}{2g} \quad (34)$$

h_k – губитак енергије, који настаје због савлађивања отпора трења при кретању воде кроз лопатике [J/kg]

ρ_2 – коефицијент отпора [1]¹⁵



Слика 29 Делићи млаза изнад и испод његове осе [11]

Кинетичка енергија воде на почетку је, при брзини w_1 (35):

$$E_1 = \frac{w_1^2}{2g} \quad (35)$$

E_1 – кинетичка енергија воде на почетку (пресек 1 – 1) [J]

w_1 – релативна брзина воде на почетку (пресек 1 – 1) [m/s]

Кинетичка енергија воде у крајњој тачки при брзини w_2 , после савлађивања отпора h_k на свом путу у лопатици износи (36):

$$E_2 = \frac{w_2^2}{2g} \quad (36)$$

E_2 – кинетичка енергија воде у крајњој тачки [J]

w_2 – релативна брзина воде у крајњој тачки [m/s]

¹⁵ Креће се у границама 0,03 – 0,1.

Разлика између почетне и крајње енергије једнака је отпорима (37):

$$E_1 - E_2 = h_k \quad (37)$$

$$\frac{w_1^2}{2g} - \frac{w_2^2}{2g} = h_k \quad (38)$$

$$\frac{w_2^2}{2g} = \frac{w_1^2}{2g} - \rho_2 \frac{c_0^2}{2g} \quad (39)$$

$$w_2^2 = w_1^2 - \rho_2 \cdot c_0^2 \quad (40)$$

Из овога се може закључити да је излазна релативна брзина w_2 нешто мања од улазне релативне брзине w_1 .

7.5 Максимална снага турбине

У хидраулици је разматрано акционо дејство млаза на препреку која измиче испред млаза. Уочено је да, ако вода наилази на препреку брзином c_1 , а препрека измиче брзином u , највећу снагу препреци млаз воде предаје када препрека измиче брзином, упола мањом од брзине c_1 са којом млаз наилази. Услов за добијање максималне снаге је испуњен ако је (41), [11]:

$$u = \frac{c_1}{2} \quad (41)$$

То је случај и код лопатица Пелтонове турбине тако да је горњи израз први услов за добијање максималне снаге. Да би видели који су остали услови потребни за добијање максималне снаге, полазимо од Ојлеровог облика главне једначине (42):

$$\eta_h \cdot g \cdot H = c_1 \cdot u_1 \cdot \cos \alpha_1 - c_2 \cdot u_2 \cdot \cos \alpha_2 \quad (42)$$

u_1 – улазна обимна брзина [m/s]

u_2 – излазна обимна брзина [m/s]

Улазна и излазна обимна брзина код Пелтонове турбине је једнака, јер су и улазна и излазна ивица на истом растојању од осе обртања. Зато, уместо u_1 и u_2 можемо написати само u (43):

$$\eta_h \cdot g \cdot H = u \cdot (c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \alpha_2) \quad (43)$$

α_1 – улазни угао [°]

Улазни угао α_1 , је угао који апсолутна брзина c_1 заклапа са обимном брзином u у тренутку кад млаз напада лопатицу. На слици 28 се види да је овај угао једнак половини угла $\varphi / 2$, тј. да се креће у границама $3,5 - 7,5^\circ$ па можемо сматрати да је α_1 приближно једнако нули (44):

$$\cos \alpha_1 = \cos 0 = 1 \quad (44)$$

Применом обрасца (44) у образац (43) добија се једнакост (45):

$$\eta_h \cdot g \cdot H = u \cdot (c_1 - c_2 \cos \alpha_2) \quad (45)$$

Енергија коју користимо из расположивог пада има највећу вредност, ако је (46):

$$c_2 \cos \alpha_2 = 0 \quad (46)$$

Уочено је да се може деловати на брзину c_2 , али да се она не може смањити до нуле, јер вода мора неком брзином напустити лопатицу, али се зато може $\cos \alpha_2$ довести на нулту вредност (или скоро нулту вредност) и то ако угао α_2 буде:

$$\alpha_2 = 90^\circ \quad (47)$$

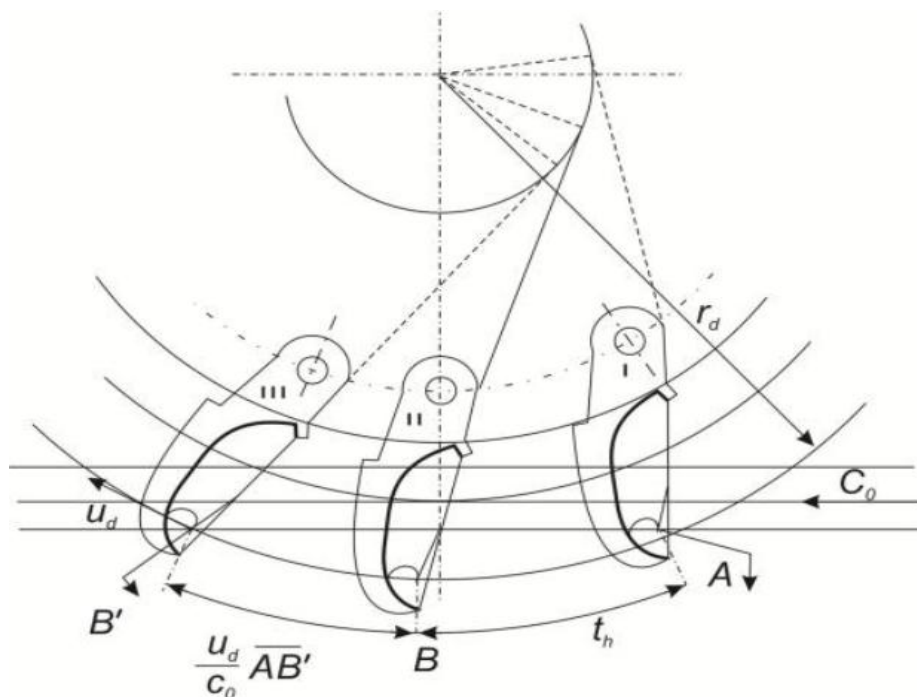
Пелтонова турбина при једном истом паду H даје највећу снагу, ако вода напушта лопатицу апсолутном брзином која према обимној брзини заклапа угао од 90° . Код Пелтонове турбине правац излазне релативне брзине w_2 зависи само од геометрије лопатице, што значи да се при раду турбине не може мењати правац релативне брзине w_2 , али може њена величина. Ако посматрамо троугао излазних брзина (слика 27), при промени величине брзине w_2 видимо да брзина (c_2) мора да промени и свој правац и интензитет (да расте или да опада). Брзина c_2 ће бити мања, а самим тим и дисипована енергија, уколико се брзине u и w_2 што мање разликују. Ово ће бити могуће, ако је угао β_2 што мањи. Тако добијамо трећи услов: Пелтонова турбина даје максималну снагу када су обимна брзина и релативна брзина једнаке, а угао између њих што мањи.

Можемо написати да Пелтонова турбина даје максималну снагу када је [11]:

$$\frac{c_0}{2} = w_2 = u \quad (48)$$

7.6 Број лопатица и корак

Број лопатица по ободу радног кола, односно корак, се добија из услова да вода из млаза који пролази испод тачке А лопатице I, мора да достигне следећу лопатицу и преда јој своју енергију (слика 30). Прво се одређује гранични корак, тј. положај лопатице која не испуњава горњи услов.



Слика 30 Лопатице по ободу радног кола [11]

Испод тачке А пролази најнижа кап млаза и путује праволинијски по правој $\overline{AB'}$. У том тренутку лопатица I путује по основном кругу, као и претходна лопатица означена са II (у почетном тренутку се налази у тачки В), крећући се такође обимном брзином u_d . Ако капљицу на њеном путу $\overline{AB'}$ од тачке А до тачке В' не дочека лопатица II, онда се њена енергија губи. То ће се десити ако лопатица II пређе из положаја II у положај III за исти интервал за који кап воде пређе из тачке А у тачку В'.

Пут од А до В' пређе капљица воде за временски интервал τ који се добија када се пређени пут подели са брзином капи млаза (49), [11]:

$$\tau = \frac{\overline{AB'}}{c_0} \quad (49)$$

τ – време за које вода пређе пут од тачке А до тачке В' [s]

$\overline{AB'}$ – растојање између тачака А и В' [m]

За исти временски интервал τ врх лопатице II пређе лук BB' , који се може израчунати на основу следећег обрасца (50):

$$BB' = u_d \cdot \tau \quad (50)$$

u_d – обимна брзина [m/s]

Растојање од тачке А до тачке В, мерено по луку, тј. растојање између лопатица I и II, представља основни корак t_h , при коме капљице воде које полазе испод тачке А (лопатица I) не могу да достигну лопатицу II и предају своју енергију. Зато се лопатице морају поставити ближе једна другој (стварни корак t мора бити мањи од t_h). Обично се узима да је (51):

$$t = (0,65 \div 0,85) \cdot t_h \quad (51)$$

t – стварни корак [m]

t_h – основни корак [m]

Утврђено је да корак треба бити што мањи. Ограничење постоји у конструктивном смислу, тј. потребан је простор на ободу основе радног кола за везивање лопатица. Зато се понекад праве двоструке лопатице или се у крајњем случају изливају заједно са основом радног кола [23].

7.7 Положај сечице лопатице

При обртању радног кола, сечица долази у контакт са млазом и сече га под углом већим од 90° . При даљем обртању поменути угао се смањује, при чему се добија вредност угла мања од 90° , а лопатица напушта млаз под одређеним оштрим углом.

При томе, лопатицу не погађа одмах цео млаз, већ само његов горњи део, јер доњи део млаза још увек делује на претходну лопатицу. Затим наступа момент кад цео млаз погађа лопатицу (доња ивица млаза удара у најнижу тачку сечице). У следећем кораку се угао између млаза и сечице смањује (нападна тачка млаза се помера навише ка унутрашњој ивици лопатице) све док у једном тренутку следећа лопатица не захвати горњи део млаза. Када цео млаз први пут погоди сечицу, угао између њих је већи од 90° , а када цео млаз последњи пут погоди сечицу (када следећа лопатица долази у контакт са млазом), угао је мањи од 90° . У средњем положају између првог и последњег додира целог млаза, сечица стоји управно у односу на млаз, односно управно на релативни правац кретања воде по лопатици. Да би се испунили поменути услови, правац сечице не пролази кроз центар основе радног кола, већ додирује један круг, као што се види на *слици 30* [11].

7.8 Губици енергије

Губици енергије који се јављају у једном постројењу са Пелтоновом турбином могу се сврстати у следеће две групе:

Губици изван турбине:

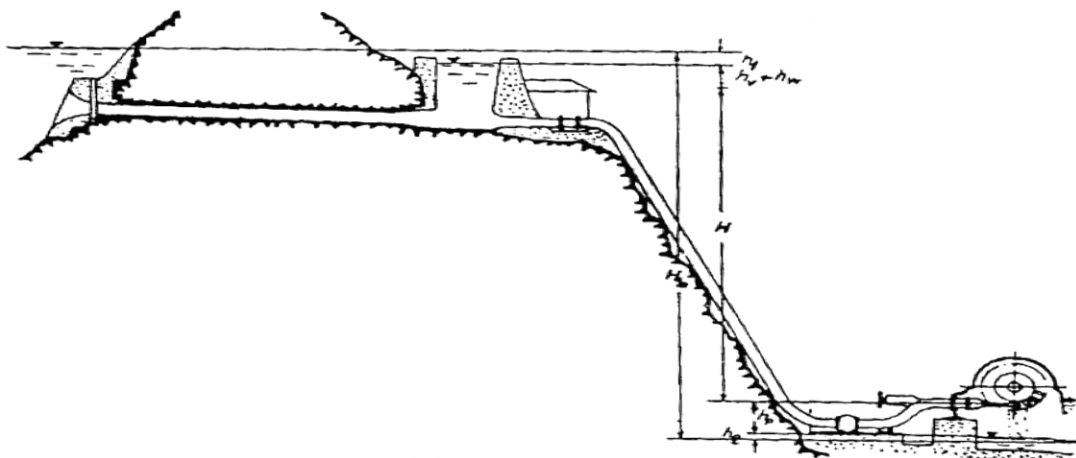
- губици у доводним каналима h_1 ,
- губици у одводним каналима h_2 ,
- губици специфични за Пелтонову турбину h_p ,
- губици у цевоводу h_v и h_w .

Губици у турбини:

- губици у спроводном каналу h_{sa} ,
- губици у млазу h_{ml} ,
- губици у радном колу h_k ,
- излазни губици h_l ,
- механички губици h_m .

Губици у доводним каналима h_1

На *слици 31* дат је приказ једног постројења са Пелтоновом турбином. Расположиви (брuto) пад који постројење може да користи обележен је са H_b . Од горње површине воде у акумулацији до разводника воде јављају се губици у доводним каналима као што су губици у вештачком језеру, у захвату, у доводном тунелу и слично. Ови губици настају услед унутрашњег трења делића воде и услед трења воде о зидове. Њихова величина зависи од општег распореда постројења, дужине доводног цевовода, квалитета материјала зидова, брзине воде, нагиба канала и локалних отпора.



Слика 31 Општи распоред постројења са Пелтоновом турбином [19]

Губици у одводним каналима h_2

Јављају се од тачке непосредно испод турбине па све до крајње тачке одводног канала. Слични су губицима у доводним каналима.

Специфични губици Пелтонове турбине h_p

Укупан нето пад се не може искористити у постројењу са Пелтоновом турбином, јер се лопатике турбине налазе изнад доње воде. Ови специфични губици (h_p) се не јављају код других врста турбина и представљају висинско растојање од нивоа доње воде до тачке у којој оса млаза додирује основни круг. Зависе од положаја млазнице и величине радног кола.

Губици у цевоводу h_v и h_w

Губици у цевоводу настају услед унутрашњег трења воде, трења воде о зидове, кривина, затварача и наглих промена попречног пресека. Како би ови губици били што мањи, прелази и кривине треба да су што блажи и постепенији, а брзина кретања воде што мања. Ови губици могу бити успутни (континуални), на праволинијском делу цевовода и локални (концентрисани) губици. Губици у правим цевима рачунају се по обрасцу (52), [19]:

$$h_v = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{c^2}{2 \cdot g} \quad (52)$$

h_v – успутни (континуални) губици [m]

λ – коефицијент отпора трења флуида у правој цеви [/]

l – дужина цеви [m]

d – пречник цеви [m]

c – брзина струјања флуида кроз попречни пресек [m/s]

Губици услед локалних отпора се рачунају по обрасцу (53):

$$h_w = \zeta \cdot \frac{c^2}{2 \cdot g} \quad (53)$$

h_w – локални (концентрисани) губици [m]

ζ – коефицијент одговарајућег локалног отпора [/]

Сви до сада набројани губици се називају и спољашњи губици, јер настају изван турбине. Ако све ове губитке одузмемо од бруто пада H_b , добија се нето пад H који турбина може да користи, тј. пад који турбини стоји на располагању на месту испред улаза у спроводни апарат. Нето пад се израчунава на основу следећег обрасца (54):

$$H = H_b - h_1 - h_2 - h_p - h_v - h_w \quad (54)$$

Губици у спроводном каналу h_{sa}

То су губици који настају у млазници и зависе од облика млазника, копља, као и њиховог узајамног положаја. Излазна брзина c_0 се одрђује помоћу израза (55):

$$c_0 = \phi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (55)$$

ϕ – коефицијент губитака у спроводном каналу [/¹⁶]

$$c_0^2 = \phi^2 \cdot 2 \cdot g \cdot H \quad (56)$$

$$\frac{c_0^2}{2 \cdot g} = 0,96 \cdot H \quad (57)$$

Може се уочити да је енергија млаза (кинетичка енергија) незнатно мања од нето пада H (користи се 96%) тј. износи:

$$h_{sa} = H - 0,96 \cdot H = 0,04 \cdot H \quad (58)$$

$$h_{sa} = 4\%H \quad (59)$$

Губици у млазу h_{ml}

Губици који се јављају на делу пута од излаза млаза из млазнице до лопатичног круга, настају у случају када млаз није цилиндричан и компактан. Излазећи из млазника, млаз се сужава, а затим шири, јер са собом повлачи делиће ваздуха. Да би се користио што компактнији млаз, лопатице треба да су што више примакнуте млазници тј. да млаз дође у контакт са лопатицама пре него што почне да се шири. На појаву распршивања млаза такође утичу облик млазнице и копља, као и облик улазне кривине.

Губици у радном колу h_k

Улазећи у лопатицу радног кола, млаз воде скреће и излази из ње скоро у супротном смеру од смера којим је ушао. Свака кривина при кретању воде представља извесни отпор за чије се савлађивање троши један део енергије. Осим отпора услед кривине, у лопатици се јављају и отпори трења о зидове и отпори унутрашњег трења. Укупни губици у радном колу од тренутка контакта млаза и сечице, па све до његовог изласка из лопатице, одређени су изразом:

¹⁶ Коефицијент губитака у спроводном каналу износи 0,98.

$$h_k = \rho_2 \cdot \frac{c_0^2}{2 \cdot g} \quad (60)$$

Применом једначине (57) и једначине (60) добиј се следећи израз (61):

$$h_k = (0,03 \div 0,10) \cdot 0,96 \cdot H \quad (61)$$

$$h_k = (2,88 \div 9,6)\% \cdot H \quad (62)$$

Излазни губици h_l

Излазни губици износе:

$$h_l = \frac{c_2^2}{2 \cdot g} \quad (63)$$

c_2 – брзина флуида по изласку из лопатице [m/s]

Да би се што већи део кинетичке енергије воде искористио у турбини, излазни губици треба да буду што мањи, тј. да је излазна брзина c_2 што мања. Излазни губици по својој природи нису хидраулични у правом смислу, јер не потичу из потребе да се савлада неки отпор трења, већ је то количина енергије која није искоришћена [19].

Излазни губици h_l се изражавају као део нето пада H помоћу емпиријског обрасца (64):

$$h_l = \psi \cdot H \quad (64)$$

ψ – коефицијент излазних губитака [/]¹⁷

$$h_l = (0,03 \div 0,06) \cdot H \quad (65)$$

$$h_l = (3 \div 6)\% \cdot H \quad (66)$$

Механички губици h_m

Ови губици настају услед механичког трења у лежиштима и заптивачима у којима се обрће вратило турбине. Изражавају се као део нето пада:

$$h_m = m \cdot H \quad (67)$$

¹⁷ Креће се у границама 0,03 – 0,06.

m – коефицијент $[/]$ ¹⁸

$$h_m = (0,01 \div 0,02) \cdot H \quad (68)$$

$$h_m = (1 \div 2)\% \cdot H \quad (69)$$

7.9 Коефицијент корисног дејства и карактеристике

Коефицијент корисног дејства представља однос између искоришћене енергије и енергије која стоји на располагању. Турбине се конструишу, тако да функционишу у склопу са генератором, па на основу тога разликујемо неколико коефицијената корисног дејства. Уобичајено је да се говори о четири коефицијента корисног дејства:

- Општи коефицијент корисног дејства целог постројења (η_0), подразумева однос енергије предате генератору према расположивој енергији која одговара бруто паду. У овај коефицијент улазе сви набројани губици и износи (70):

$$\eta_0 = 0,75 \div 0,82 \quad (70)$$

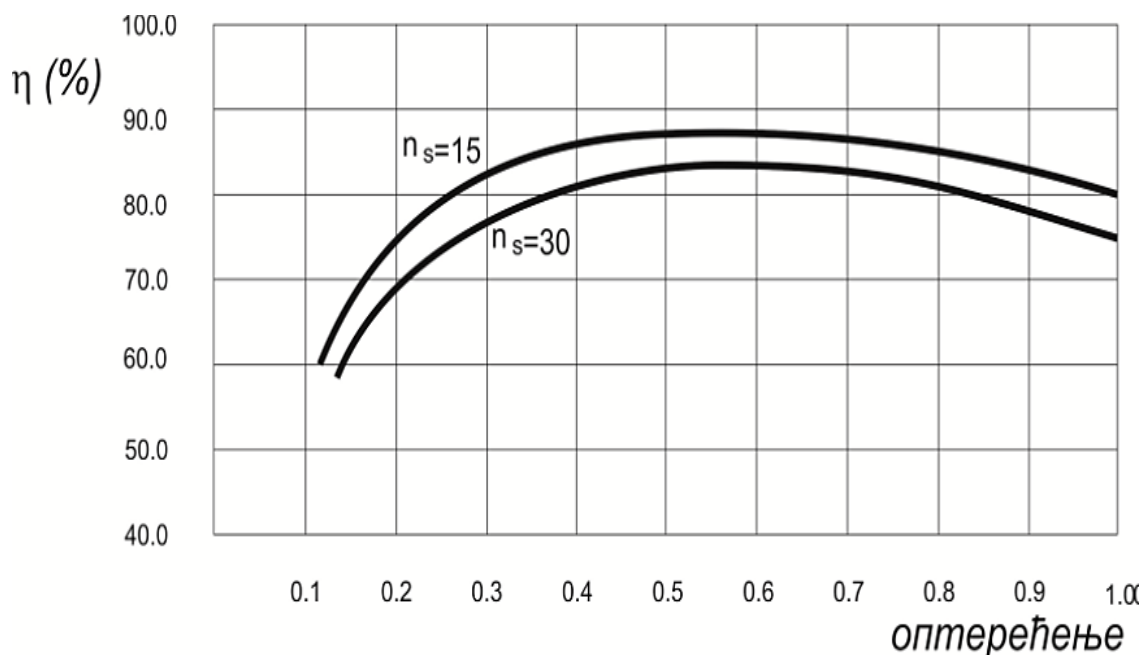
- Хидраулични коефицијент корисног дејства (η_h), представља однос енергије предате лопатицама и енергије која одговара нето паду. Формира се услед настанка губитака у спроводном апарату, млазу, обртном колу, као и услед настанка излазних губитака.
- Механички коефицијент корисног дејства (η_m), је однос енергије предате генератору и енергије предате лопатицама турбине. Овде су укључени само механички губици.
- Укупни коефицијент корисног дејства турбине (η), Представља однос енергије предате генератору и нето енергије која одговара нето паду Пелтонове турбине. Укупни коефицијент корисности је обично 0,88 – 0,9.

Сва ова разматрања вршена су за идеалне услове рада, стално оптерећење и најповољније хидрауличне услове протицања. У стварности се то веома ретко дешава. Углавном, при промени појединих параметара или оптерећења, ступају у дејство уређаји за регулисање чији је задатак да обезбеде константан број обртаја турбине. Ако се у неком тренутку, смањи оптерећење, онда механизам за регулисање смањује отвор врха млазнице померањем копља, чиме се смањује пресек млаза и проток (брзина се незнатно мења, а самим тим и снага турбине) [11].

На *слици 32* приказан је дијаграм промене укупног коефицијента корисног дејства турбине у зависности од оптерећења. Може се увидети да се η незнатно мења

¹⁸ Креће се у границама 0,01 – 0,02.

променом оптерећења и то захваљујући малим променама брзине млаза. Тек при оптерећењима мањим за 25% од максималног, услови протикања се знатно мењају и вредност коефицијента η нагло опада.



Слика 32 Дијаграм промене коефицијента корисног дејства [11]

Свака турбина има одређене карактеристичне величине које омогућавају упоређивање турбина истог или сличног типа. Једна од најважнијих карактеристика турбина је специфичан број обртаја (n_s), који се израчунава као (71):

$$n_s = \frac{n \cdot \sqrt{P}}{H \cdot \sqrt[4]{H}} \quad (71)$$

Пелтонове турбине које имају једну млазницу конструишу се за специфичне бројеве обртаја до 30, а најефикасније су за специфичне бројеве обртаја 12 – 15, што је и експериментима доказано. На дијаграму (слика 32), су дате две криве Пелтонове турбине, за специфични број обртаја од 15 и 30. Види се да Пелтонова турбина има већи степен корисности у случају када је специфични број обртаја 15, а мањи степен корисности, када је он 30 [23].

7.10 Извођење Пелтонове турбине

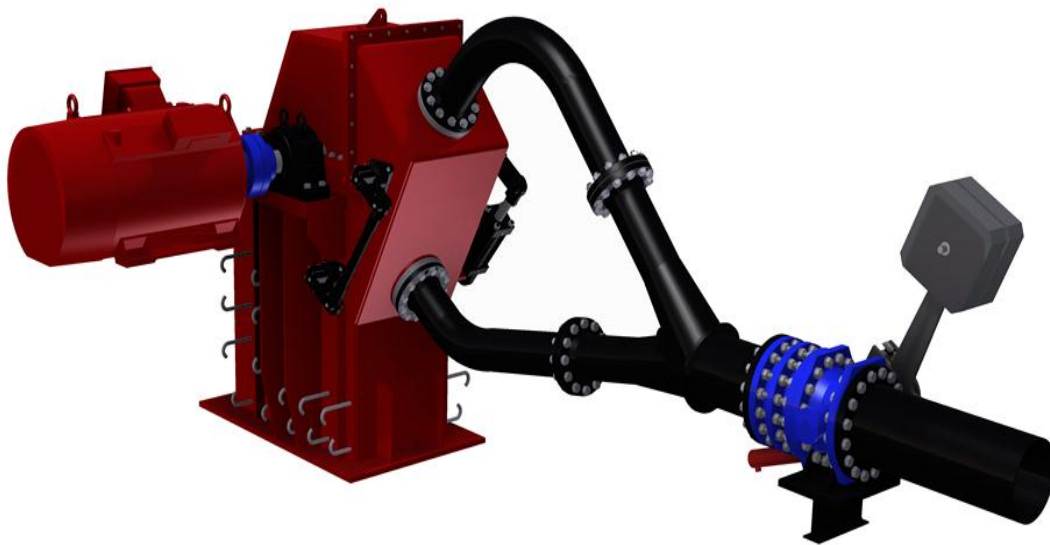
Пелтонове турбине се изводе на више начина, који се међусобно разликују по положају вратила, по броју млазница и по броју радних кола. Ако се проток воде подели на више млазница, добија се већи број обртаја турбине, међутим број млазница

се не може тек тако повећавати. Између њих мора постојати размак тако да млаз следеће млазнице дође у контакт са лопатицом тек када последња кап воде претходног млаза напусти лопатицу. Осим тога, број млазница је ограничен и њиховим положајем, јер вода која излази из лопатице не сме да пада на основу радног кола или да смета млазевима из осталих млазница.

Да би се у постројењу користио јефтинији генератор, обимна брзина радног кола мора бити што већа. Намеће се закључак да Пелтонову турбину треба користити за што веће падове да би добили веће обимне брзине, односно већи број обртаја, а тиме и јефтинији генератор. Најједноставнија конструкција Пелтонове турбине је са једним радним колом и једном млазницом. За мање падове користе се и турбине са више млазница или више радних кола на истом вратилу. Пелтонове турбине се скоро искључиво конструишу са хоризонталним вратилом, а за велике снаге имају вертикална вратила [23].

Турбине са хоризонталним вратилом

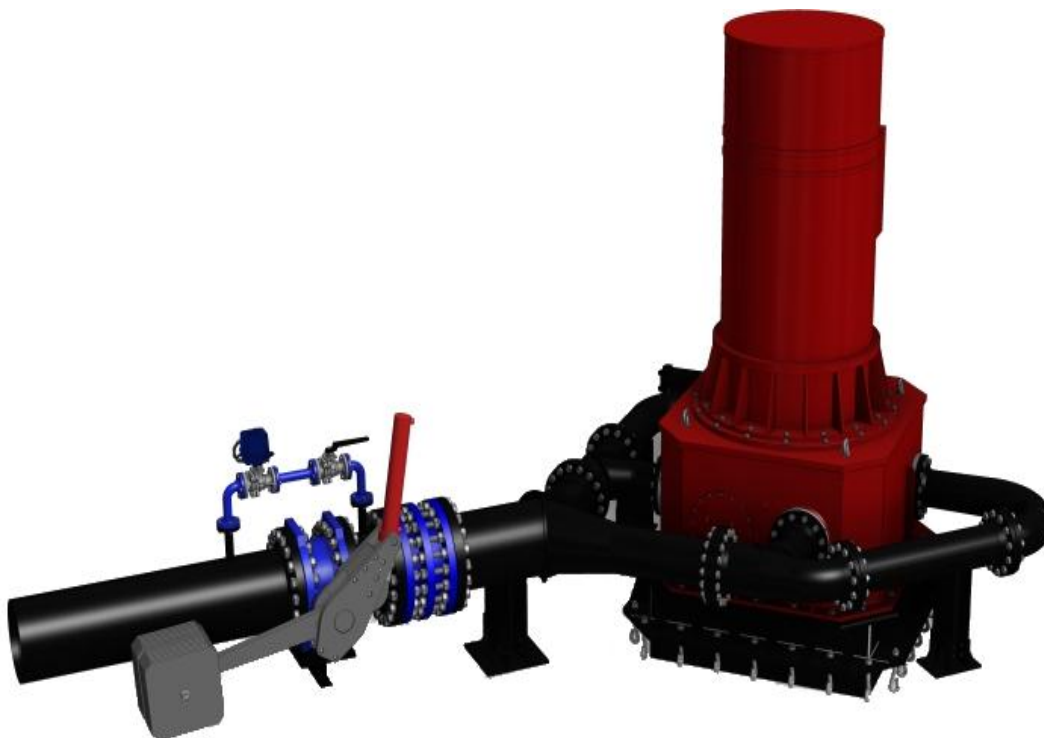
Код ових турбина (слика 33) број млазница не може бити већи од броја два из конструктивних разлога (сметале би једна другој). Ако прорачуни покажу да је потребан већи број млазница, онда се конструишу турбине са два или три радна кола тако да на свакој имамо по две млазнице [23].



Слика 33 Приказ хоризонталне Пелтонове турбине [23]

Турбине са вертикалним вратилом

Пелтонове турбине (слика 34) релативно већих димензија и са више млазница најчешће се постављају на вертикално вратило. Млазнице се распоређују симетрично око радног кола, тако да сила која се преноси радном колу буде подједнако распоређена.



Слика 34 Приказ вертикалне Пелтонове турбине [23]

7.11 Начини регулисања Пелтонове турбине

Количина воде која из млазнице излази сваке секунде се израчунава помоћу израза (72):

$$Q = S \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (72)$$

α – коефицијент истицања [/]

S – површина попречног пресека излаза млазнице [m²]

$$\alpha = \mu \cdot \phi \quad (73)$$

μ – коефицијент контракције млаза [/]

ϕ – коефицијент брзине [/]

Снага турбине зависи од протока што значи да снагу турбине можемо регулисати мењањем површине пресека истицања (померањем копља улево/удесно). Померање копља може се вршити ручно или помоћу регулатора. Механизам за ручно померање је једноставан. При крају копља нарезан је навој, а на самом крају помоћу четвртке постављен је наглавак. Обртањем точка копље се помера и улази/излази из

фиксиране навртке. Ручно регулисање примењује се само ако је оптерећење константно [11].

При промени оптерећења, мења се број обртаја. Уколико се оптерећење смањује, број обртаја расте, а при повећању оптерећења број обртаја опада. Задатак регулатора се заснива да број обртаја доведе на првобитну вредност, смањујући снагу турбине. Пожељно је да се број обртаја што мање мења и да привремено повећање броја обртаја при растерећењу буде што мање. Да би се ово остварило неопходно је повећати масу замајца у ротору генератора или додавањем новог замајца. Ова метода се не примењује често, јер је ово конструктивно решење скупо. Могуће је применити други начин решавања овог проблема и то у виду смањења времена растерећења турбине.

На нагло растерећење турбине, регулатор реагује брзим померањем копља и затварањем млазнице. Услед тога долази до наглог пораста притисака у цеви, при чему се јавља хидраулични удар који може довести до пуцања цеви. Да би се ова појава избегла примењује се скретач млаза. Применом скретача млаза губи се енергија коју са собом односи млаз.

За отклањање недостатака појединачних регулисања само помоћу копља или само помоћу скретача, примењује се комбиновано (двоструко) регулисање.

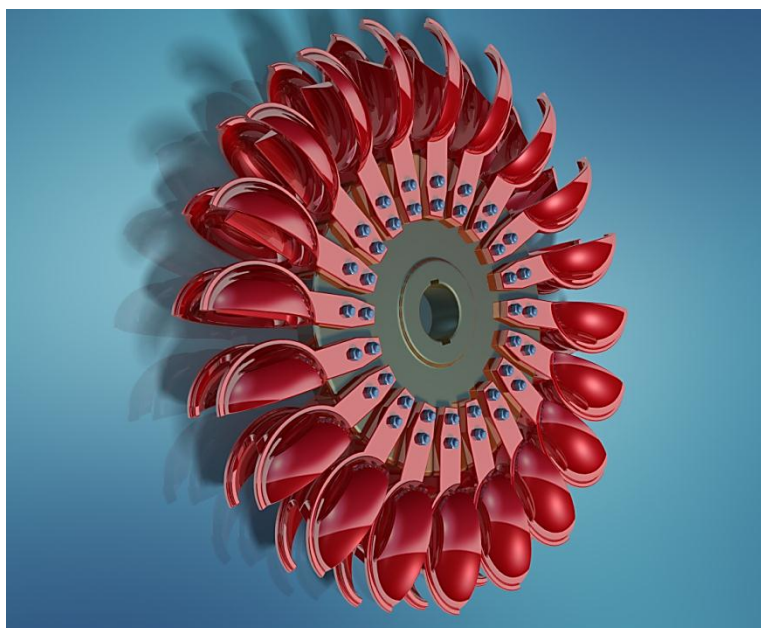
8 3D модел Пелтонове турбине

На основу добијених резултата прорачуна Пелтонове турбине, који је приказан у прилогу 1, извршено је моделирање свих делова турбине у програмском пакету CATIA V5-6R2013. На *слици 35* приказан је 3D модел лопатице.



Слика 35 Лопатица радног кола Пелтонове турбине

На *слици 36* приказано је радно коло Пелтонове турбине у изометрији.

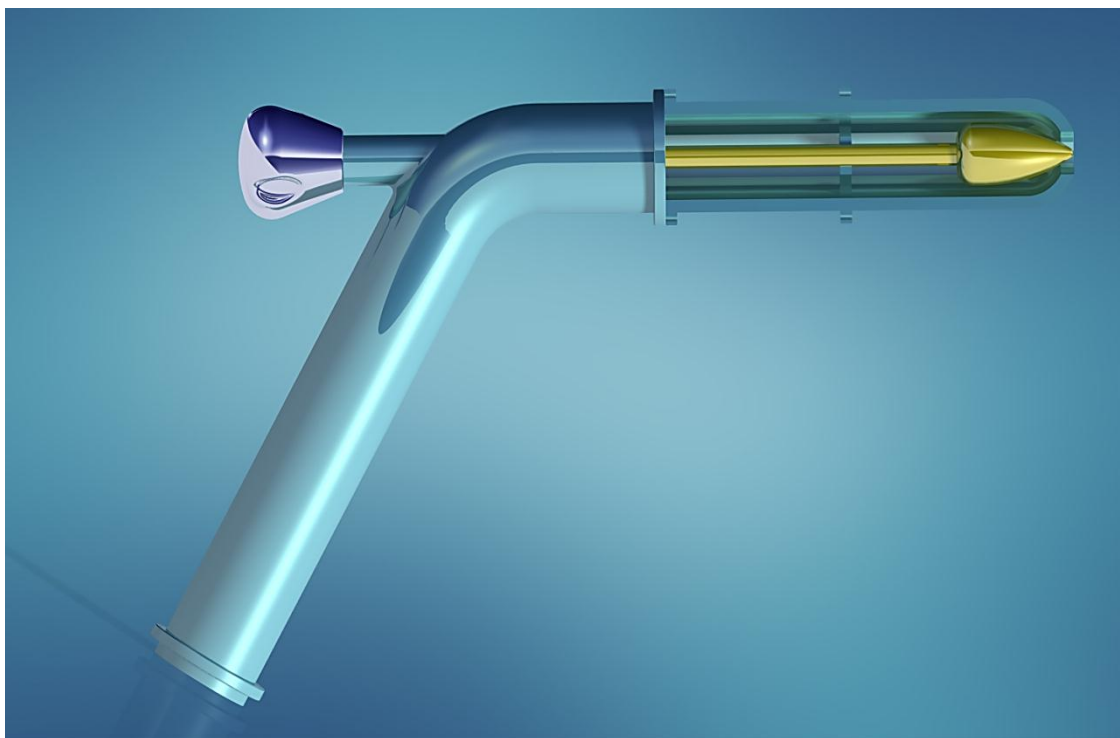


Слика 36 Приказ радног кола Пелтонове турбине

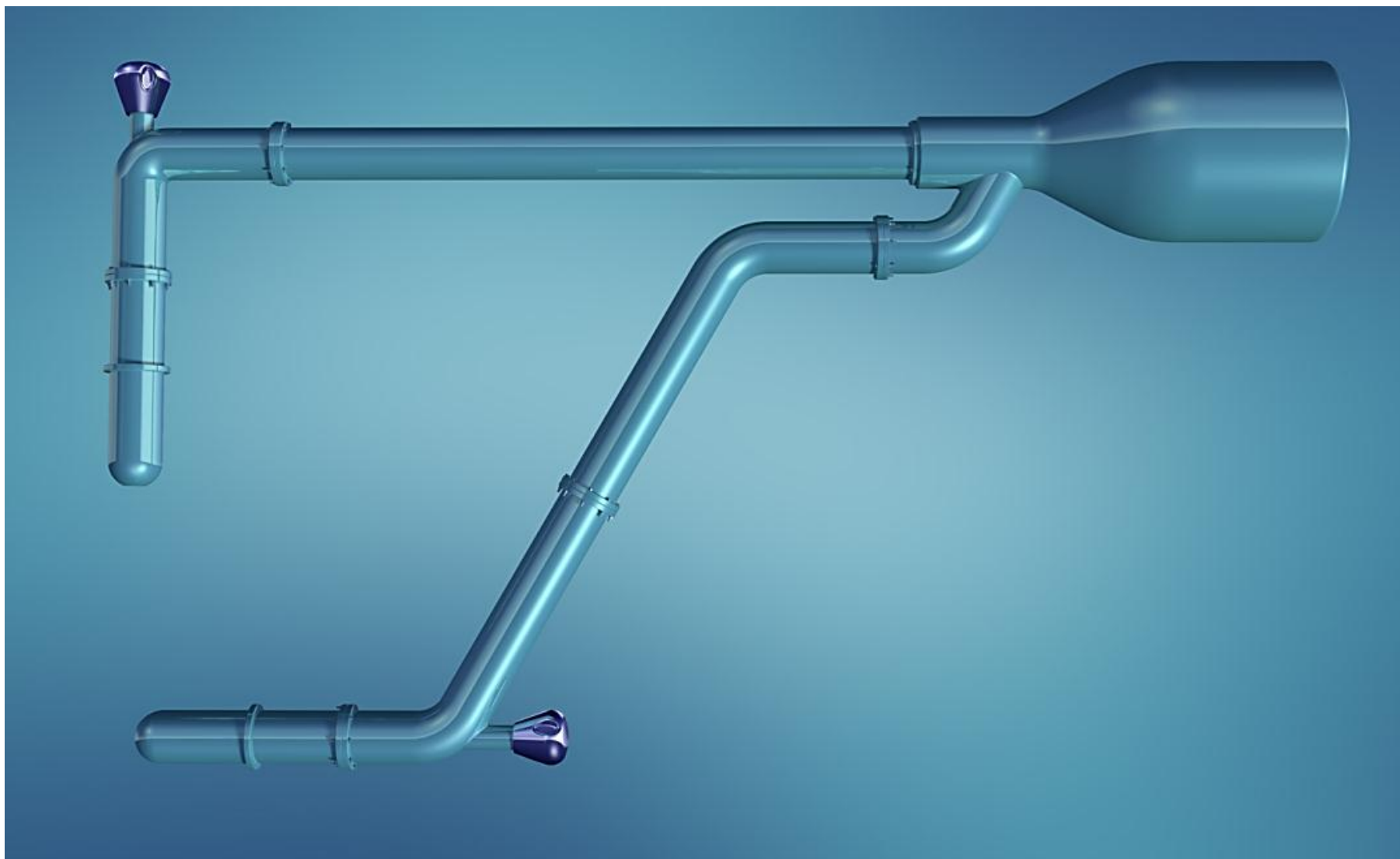
3D модел млазнице је приказан на *слици 37*, а њен уздужни пресек је приказан на *слици 38*. На *слици 39* приказан је склоп две млазнице у постројењу за производњу електричне енергије са Пелтоновом турбином.



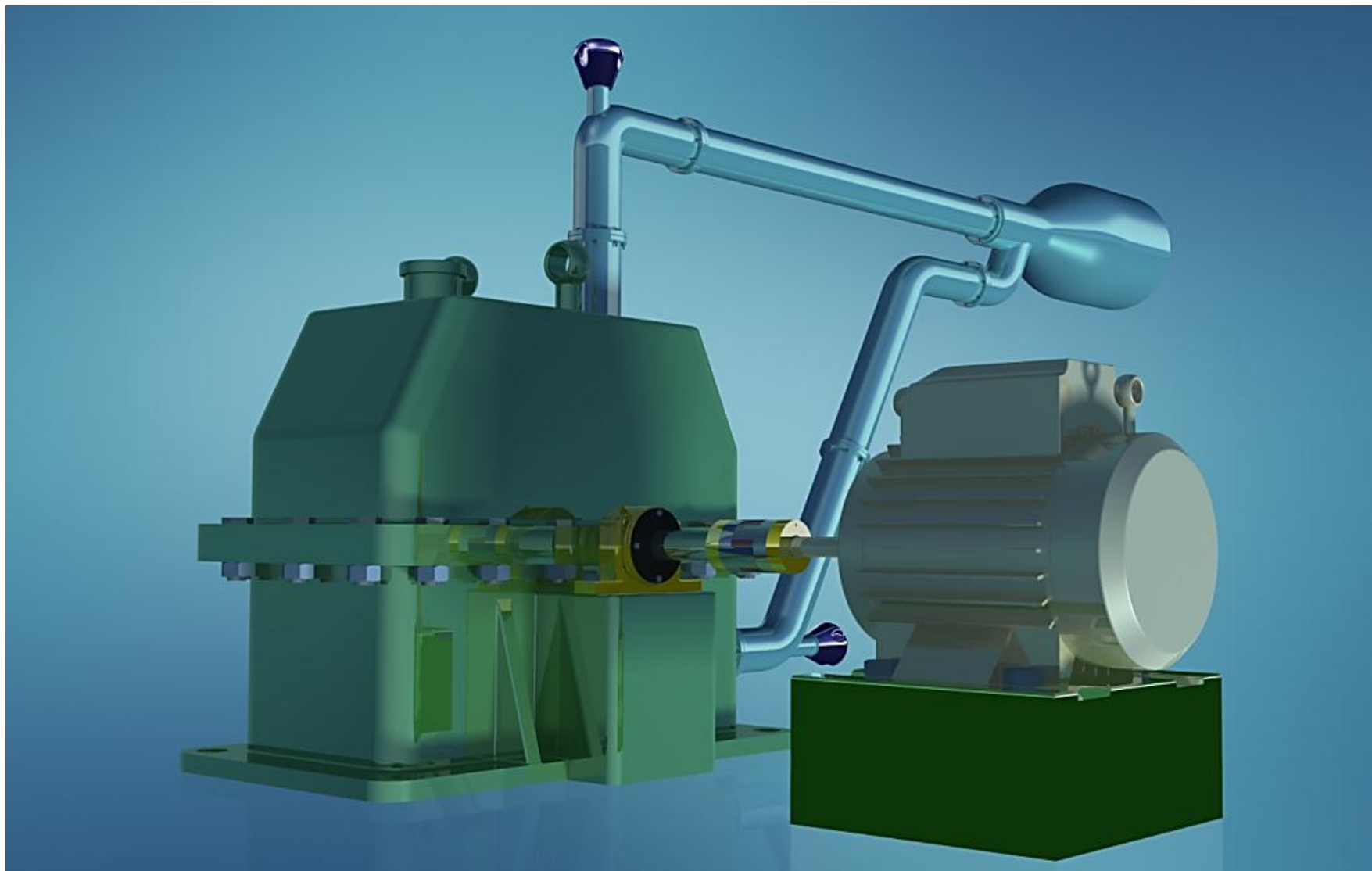
Слика 37 3D приказ млазнице



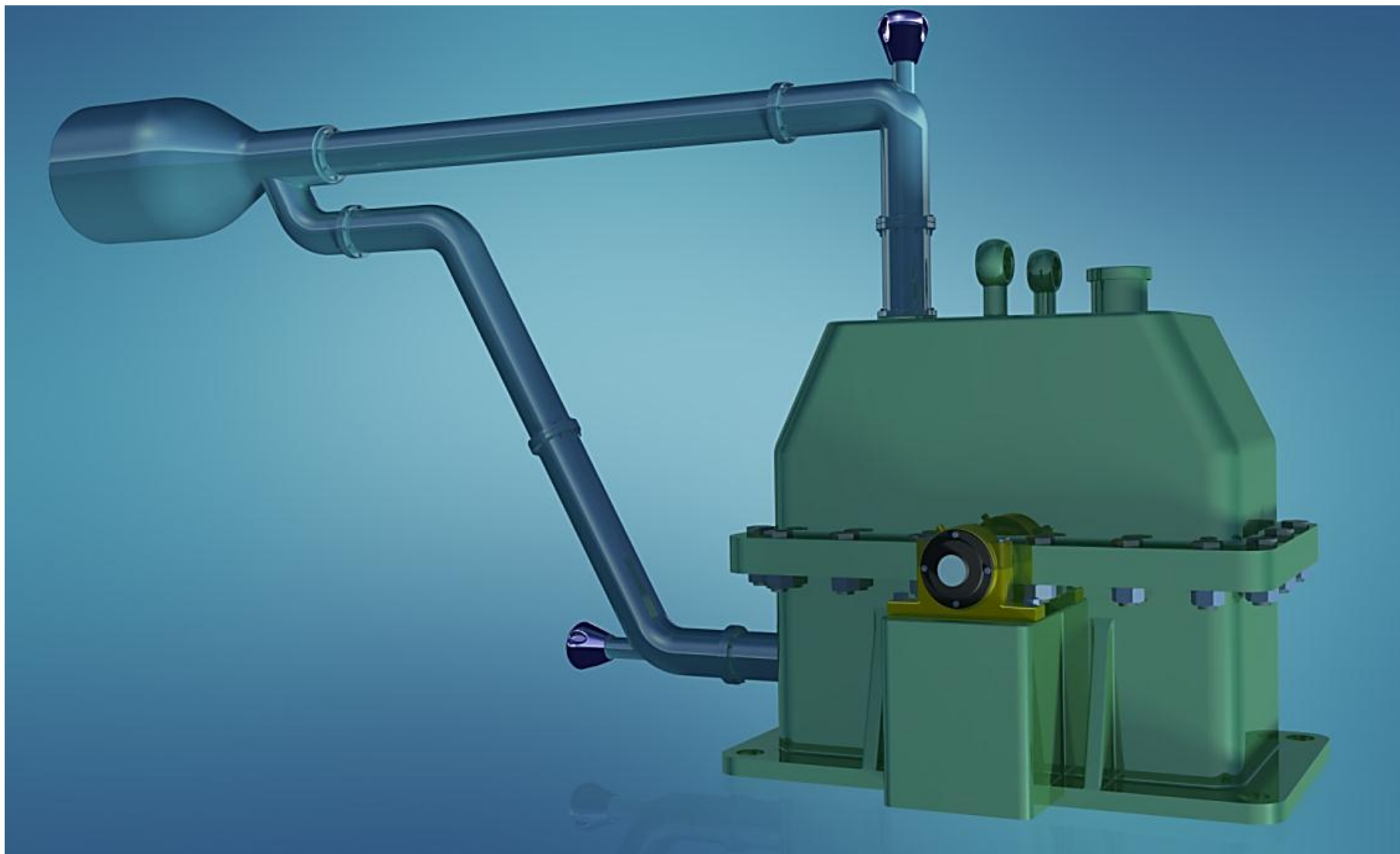
Слика 38 Приказ уздужног пресека млазнице



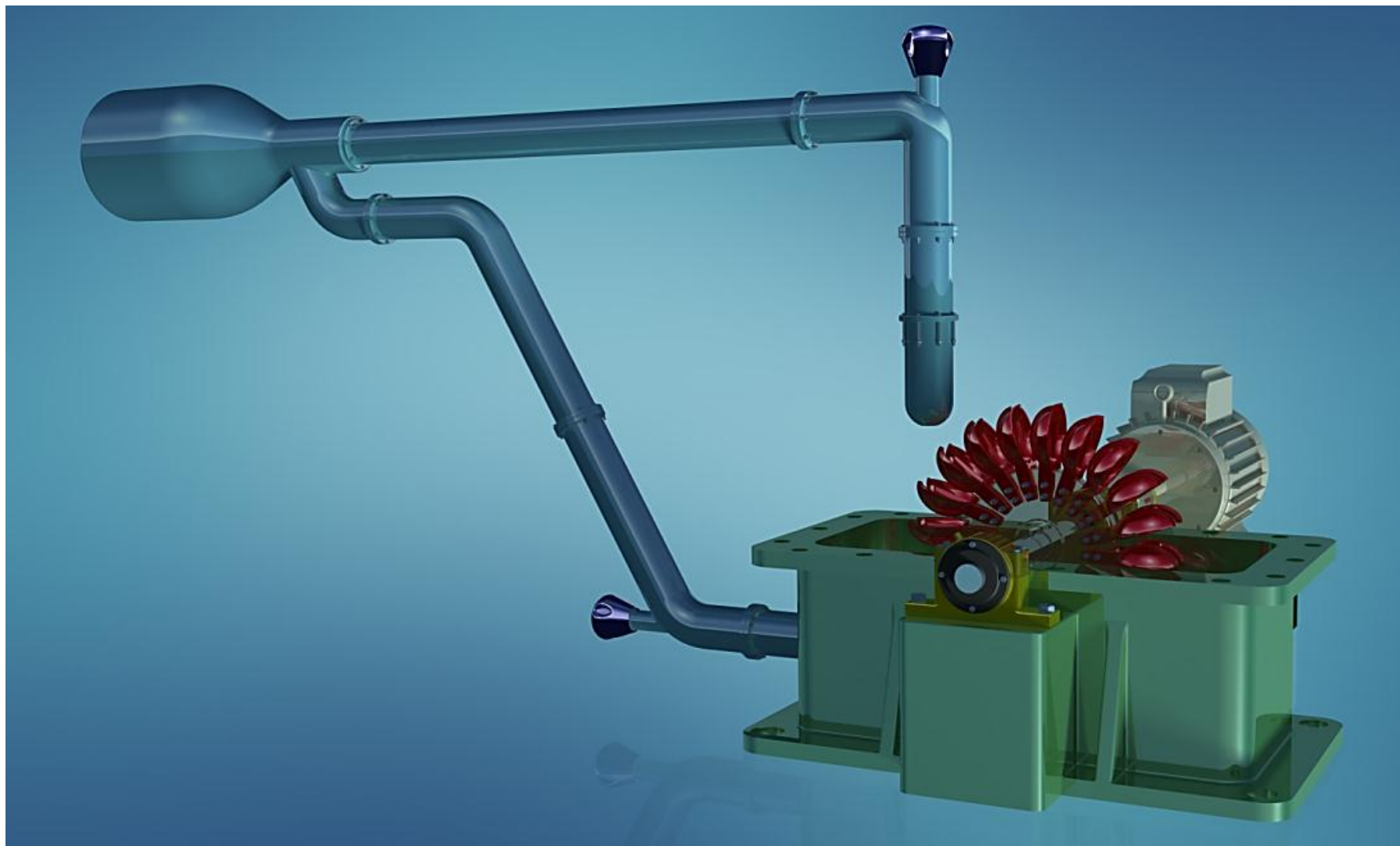
Слика 39 Приказ млазница МХЕ са Пелтоновом турбином



Слика 40 Приказ склопа Пелтонове турбине, позиција (а)



Слика 41 Приказ склопа Пелтонове турбине, позиција (б)



Слика 42 Приказ склопа Пелтонове турбине без горњег дела кућишта

9 Генератор

Генератор (слика 43) је спојен са хоризонталном Пелтоновом турбином преко канцасте спојнице одговарајућег преносног односа. Пелтонова турбина на вратилу даје снагу од $2.447 \times 10^5 \text{ W}$. Узимајући у обзир ову вредност, податак о прописаном фактору снаге (0,95), степену искоришћења генератора (0,96) и степену искоришћења мултипликатора (0,98) добија се да привидна снага једног генератора износи (74), [24]:

$$S_g = \frac{P_{to} \cdot \eta_g \cdot \eta_m}{\cos(\varphi)} = \frac{2.447 \times 10^5 \cdot 0.96 \cdot 0.98}{0.95} = 242330 \cong 242.330 \text{ kVA} \quad (74)$$

S_g – привидна снага генератора [VA]

η_g – ефикасност генератора [/]

η_m – ефикасност мултипликатора [/]

$\cos(\varphi)$ – фактор снаге [/]



Слика 43 Генератор Пелтонове турбине [24]

Подаци усвојеног хидро генератора дати су у *табели 2*.

Табела 2 Генетартор – спецификација [24]

Основни подаци	
Називна снага генератора	55 – 1.000 kVA
Називни напон генератора	400 V
Називни фактор снаге	0,75 – 0,90
Називна јачина електричне струје	90 A
Класа изолације	H
Називна учестаност	50 Hz
Степен корисног дејства	0,96
Број полова	4
Називни број обртаја	300 min ⁻¹
Максималан број обртаја	500 min ⁻¹
Тип побуде	контактни, статички

10 Економска анализа МХЕ са Пелтоновом турбином

Поставка плана

Овим планом је предвиђена изградња деривацијске мале хидроелектране на реци Бјелици у делу територије општине Лучани. Као име електране изабрано је „Бјелица” на реци Бјелици, у делу села Доњи Дубац.

Делови електране су:

- водозахват,
- цевовод од водозахвата до водне коморе, $L = 3600 \text{ m}$, $D = 0,46 \text{ m}$,
- цевовод под притиском од водне коморе до машинске зграде $L = 170 \text{ m}$, $D = 0,46 \text{ m}$,
- водозахватни праг ширине 2 m , висине 3 m и дужине 5 m ,
- машинска зграда са опремом.

Основни параметри и карактеристике за изградњу мале хидроелектране „Бјелица” на реци Бјелици према идејном решењу су следећи:

- бруто пад: $H_b = 61,5 \text{ m}$,
- нето пад: $H_n = 57,81 \text{ m}$,
- инсталирани проток: $Q = 0,47 \text{ m}^3/\text{s}$,
- број агрегата: 1,
- тип турбине: Пелтонова.

Мала хидроелектрана на реци Бјелици, има основну намену да производи електричну енергију која ће се преко дистрибутивног система продавати дефинисаним купцима. Зато постоје повољни технички услови, бруто пад вредности $61,5 \text{ m}$ и средњи проток вредности $0,47 \text{ m}^3/\text{s}$. Електрана је предвиђена да ради као проточно-деривационо постројење. Деривација се остварује каналом и цевоводом од водозахвата до машинске зграде. Мала хидроелектрана користи расположиве воде из реке Бјелице умањене за вредност биолошког минимум (10%). Након проласка кроз турбину, вода се одводним каналом враћа у водоток. Током овог процеса квалитет воде се не мења.

Табела 3 Општи подаци о локацији

Назив локације	Доњи Дубац
Општина	Лучани
Водоток	Бјелица
Слив	Западна Морава
Површина слива	376 km ²
Проток водотока	0,47 m ³ /s
Бруто пад водотока	61,5 m

Електрана је лоцирана на подручју које је слабо насељено, тако да је терен углавном брдски, окружен шумом. У делу захваћеног водотока не постоје други потрошачи и корисници воде, па је могућност искоришћења протока већа.

Елементи, положај и карактеристике електране

Пројектовано постројење мале хидроелектране на реци Бјелици се састоји од:

- водозахвата,
- цевовода,
- машинске зграде са опремом.

Сви елементи су димензионисани према расположивом средњем протоку вредности 0,47 m³/s и нето паду 57,81 m, чиме је добијена снага на вратилу турбине од 244,7 kW (прилог 1).

Инвестициони трошкови

Водозахват

Идејно решење представљено је у виду водозахвата у облику бетонског профилисаног прага са челичним филтерима. Капацитет водозахвата треба да буде најмање 0,57 m³/s, како би се омогућило пуњење цевовода са потребних 0,47 m³/s воде.

Као одговарајућа грађевина за дате услове, намену и капацитет, предвиђен је водозахват тиролског типа¹⁹. Водозахватна грађевина се састоји од четири функционално зависна дела:

¹⁹ Тиролски тип водозахвата се често користи за хватање воде на рекама које су планинског типа. Поставља се на дну корита реке, као бетонска грађевина са хоризонталном решетком преко које пролази нанос. Саставни део овог захвата је таложник и песколлов.

- Рибља стаза, коју чине три степенасте стазе променљиве ширине по висини, лоциране у крајњем левом делу профила.
- Преливни водозахватни праг у коме је уграђен водозахватни канал ширине 1,2 m са решетком и падом дна око 3% ка таложнику.
- Калдрмисано дно са заштитом обале низводно од водозахватног прага.
- Таложник²⁰ и пескол²¹.

Табела 4 Изградња приступне и сервисне саобраћајнице

Опис позиције	Количина	Јединична цена [€]	Вредност радова [€]
Обележавање и снимање трасе пута пре извођења радова	1 km	800	800
Рашчишћавање терена	6.500 m ²	0,15	950
Земљани радови	1.500 m ³	3,5	5.250
Израда приступног пута	3.000 m ²	4	12.000
Укупно за приступну и сервисну саобраћајницу			19.000

Табела 5 Изградња водозавата

Опис позиције	Количина	Јединична цена [€]	Вредност радова [€]
Обележавање и снимање објекта водозавата	1	400	400
Рашчишћавање терена на локацији водозавата	1	800	800
Ископ темељног рова (водозахватни праг, рибља стаза, таложник)	100 m ³	6	600
Одвоз вишка материјала на депонију	70 m ³	1,5	105
Стабилизација корита	700 m ²	10	7.000
Бетонски радови	100 m ³	107	10.700
Укупно за водозахват			19.605

²⁰ Хидротехничка грађевина у којој се врши процес таложења суспендованих материја из воде помоћу гравитације.

²¹ Служи за одвајање шљунка, песка, земље и осталих честица из воде, које могу изазвати убрзано хабање делова турбине, па и самог ценовода.

Рибља стаза представља пролаз за рибе и остали живи свет настањен у реци у правцу њеног природног тока, као и посебан пут за воду у време суша. Водозахватни праг је опремљен решетком профила I12 и као такав омогућава пребацивање крупног наноса који доноси ток Бјелице, преко прага. Таложик је пројектован у облику бетонске коморе, променљивог пресека у правцу тока реке. На таложнику је предвиђен чеони отвор за допунско захватање воде, опремљен одговарајућом решетком, тако да омогућава допунско дострујавање воде у циљу његовог сталног или повремениог испирања од песка кроз за то предвиђене испусте.

Облагање дна калдрмом на подлози од бетона, има за циљ заштиту објекта и корита од ерозије, а такође и продужавање филтрационог пута, што обезбеђује потребно заптивање преградног места [25].

Водозахват преко посебних прелива омогућава предвиђени проток за биолошки минимум и напајање рибље стазе. Својим положајем и димензијама не омета ток реке, омогућава пролаз великих вода, и наноса, а такође не ремети биолошке функције реке. Челични филтер водозавата омогућава да у захваћеној води нема честица наноса крупнијих од 1 mm, што је задовољавајуће са аспекта заштите турбине и цевовода. Посебно је од значаја да водозахват може радити у зимским условима, све док постоји текућа вода у реци. Овакав тип водозавата је финансијски повољан.

Цевовод

За довод воде од водозавата до водне коморе предвиђен је цевовод унутрашњег пречника 0,46 m.

Табела 6 Изградња деривационог цевовода

Опис позиције	Количина	Јединична цена [€]	Вредност радова [€]
Цевовод у режиму без притиска	3.600 m	40	144.000
Цевовод под притиском	170 m	50	8.500
Уређење трасе цевовода	3.800 m	20	76.000
Муљни испуст			14.500
Доводни цевовод до турбине	3 m	60	180
Водна комора	1 ком	10.000	10.000
Решетка на одводу ка турбини	1 ком	500	500
Затварач на улазу	1 ком	2.000	2.000
Одводни цевовод	25 m	40	1.000
Укупно за деривациони цевовод			256.680

Предлог цевовода, као гравитационог од бетонских цеви није прихватљив. Предвиђена траса за гравитациони цевовод је захтевна. Најбоље техничко решење је цевовод од челика са свим потребним заштитима. За гравитационе цеви дебљина цеви је минимална (8 mm). Цевовод почиње на водозахвату (дужина 170 m) и простире се дуж десне стране реке. На водној комори предвиђен је испуст за испирање евентуалног наноса. Од водне коморе до машинске зграде цевовод је под притиском, пречника 0,46 m. Цевовод под притиском се изводи као надземни и завршава се у машинској згради прелазним комадом. Заштићен је анкерним блоком.

Предвиђен цевовод у режиму без притиска је дужине 2.600 m. Цена по килограму и по дужном метру износи 57,7 € (према каталогу цена предузећа „Тргометал” д.о.о.), [26].

Машинска зграда са опремом

Машинска зграда, према пројекту, је лоцирана на десној обали реке Бјелице. Димензије машинске зграде су 6,5x10x4 m. У машинској згради предвиђене су просторије за смештај турбине, генератора и цевног разводника, електричних ормана за управљање и везу генератора са трансформатором, просторију за надзор и управљање, магацин и санитарни чвор.

Испод пода машинске зграде предвиђен је базен који одводи воду до одводног канала од армираног бетона, димензија 1,2x1 m. Обала на страни машинске зграде, узводно и низводно, је заштићена зидом од камена и бетона.

Машинска зграда, темељ, умирујући базен и носећи зидови изграђени су од водонепропусног армираног бетона. Спољни зидови машинске зграде висине 1,5 m су изграђени од истог материјала. На висини 1,5 – 2,5 m, је метална монтажна конструкција са зидовима од профилисаног лима испуњена термичком заштитом.

Машинска опрема

За коришћење и стварање електричне енергије према вредностима протока и пада имплементира се Пелтонова турбина са две млазнице. Турбина је робусна и дуготрајна, а посебне предности се истичу приликом редовног одржавања или евентуалног сервисирања. Лежаји турбинског кола се налазе са спољне стране турбине (на сувом), лако су доступни за подмазивање и контролу. Радно коло турбине је лако доступно и не захтева посебно обучене раднике за његово руковање. Такође, радно коло је унапред заштићено од опасности наноса, водозахватом.

Турбина је везана за генератор, који производи електричну енергију учесталости 50 Hz. Тако добијена електрична енергија се преко електричног ормара преноси до трансформатора. Радом турбине и осталих уређаја управља се преко софтвера који прати потребне параметре и одређује режим рада турбине.

Електрични ормани са управљачким механизмом, рачунаром и одговарајућим софтвером контролишу рад постројења користећи податке са одговарајућих сензора. Трафо високог напона се налази у посебној просторији машинске зграде. и физички је обезбеђен од приступа неовлашћених лица.

Табела 7 Изградња МХЕ са Пелтоновом турбином

Опис позиције	Количина	Јединична цена [€]	Вредност радова [€]
Машинска зграда	1	25.000	25.000
Пелтонова турбина са генератором	1	82.000	82.000
Хидромашинска опрема	1	30.000	30.000
Електро мрежа у машинској згради	1	15.000	15.000
Спроводна електрична опрема до јавне мреже	1	140.000	140.000
Пројектовање и испитивање	1	30.000	30.000
Трошкови за накнаду проласка кроз земљиште		20.000	20.000
Надзор на извођењу		10.000	10.000
Непредвиђени трошкови (10%)		35.200	35.200
Укупно за машинску и електро изградњу			387.200

Табела 8 Збирна рекапитулација инвестиционих трошкова

Назив	Цена [€]
Грађевински и хидрограђевински радови	295.285
Машинска, хидромашинска и електро опрема	387.200
Укупно	682.485

Трошкови инвестиционог и текућег одржавања

Трошкови инвестиционог и текућег одржавања обухватају средства која се морају издвојити на годишњем нивоу за одржавање комплетног објекта.

Погонски трошкови односно трошкови материјала, делова и услуга који се односе на пуштање МХЕ у рад и контролисање мерне опреме при пуштању се обично израчунавају као 1% од вредности електро опреме што значи око **1.550 €**.

Табела 9 Трошкови инвестиционог и текућег одржавања МХЕ на годишњем нивоу

Назив	Текуће и инвестиционо одржавање [%]	Укупно [€]
Водозахват са бетонском браном	3,0	588
Машинска зграда са одводним каналом	2,5	650
Пелтонова турбина са генератором	2,5	2.050
Хидромашинска опрема	3,25	975
Прикључење на мрежу	2,5	3.875
Укупно		8.138

Трошкови осигурања

Објекте и опрему МХЕ неопходно је осигурати од лома или пожара. Стопа осигурања варира зависно од осигуравајућег друштва. Стопе осигурања приказане у наредној *табели 10* представљају просечне стопе осигурања које важе на територији Републике Србије.

Табела 10 Трошкови осигурања МХЕ

Назив	Стопа осигурања		Укупно [€]
	Пожар [%]	Лом [%]	
Грађевински и хидрограђевински радови	0,00	0,40	1.181
Машинска зграда са одводним каналом	0,50	0,40	234
Пелтонова турбина са генератором	0,10	0,20	246
Хидромашинска опрема	0,00	0,50	150
Прикључење на мрежу	0,40	0,30	1.085
Укупно			2.896

Табела 11 Трошкови зараде и накнаде на годишњем нивоу

Степен стручне спреме	Број радника	Бруто доходак [€]	Време ангажовања током године	Укупно [€]
Висока стручна спрема	4	600	12 месеци	28.800
Укупно				28.800

Осим ових трошкова неопходно је издвојити и одређена новчана средства за законске обавезе односно порез, чија висина износи 27% од укупне бруто плате радника и износи **7.776 €**.

Укупни годишњи трошкови

Табела 12 Укупни годишњи трошкови

Назив	Укупно [€]
Трошкови инвестиционог и текућег одржавања	8.138
Погонски трошкови, трошкови материјала	1.550
Трошкови на зараде и накнаде запослених	28.800
Законске обавезе (порез на зараде)	7.776
Трошкови осигурања	2.896
Укупно	49.160

Профитабилност пројекта

Табела 13 Профитабилност пројекта и време повратка инвестиције

Укупна инвестиција	731.645
Бруто годишњи приход	203.762,9
Укупни трошкови	49.160
Нето приход без пореза	154.602,9
Порез од 16% на нето добит	24.736,5
Укупни нето приход са порезом	129.867,4
Време повраћаја инвестиције	5,63 година

Капацитет мале хидроелектране на реци Бјелици

Према полазним подацима у *табели 14* приказан је капацитет мале хидроелектране.

Табела 14 Капацитет мале хидроелектране

Улазна енергија [kW]	Произведена енергија [kWh]		Годишња зарада	
Снага [kW]	Дан	Годишње	РСД	EURO
239,8	5.755,2	2.100.648	24.451.542,72	203.762,856

Према гарантованим откупним ценама електричне енергије произведене из обновљивих извора енергије, за произведен 1 kWh добија се 7,8 – 9,7 с€/kWh, односно према средњем курсу *Raiffeisen Bank*, на дан 20.02.2015. 11,76 RSD/kWh. Годишња зарада произведене електричне енергије износи 203.762,856 евра.

Тренутна продајна цена по 1 kW електричне енергије је 9,7 с€/kWh. Просечна производња електричне енергије је 2.100.648 kWh годишње што значи да би укупан бруто приход од продаје електричне енергије на годишњем нивоу био 203.762,856 евра (24.451.542,72 РСД).

Исплативост електране се добија када укупне инвестиционе трошкове поделимо са укупним нето приходом при чему се добија, да се за 5,63 године враћају сва уложена средства.

На основу члана 123. тачка 3. Устава Републике Србије, а у вези са Законом о енергетици („Службени гласник РС”, број 84/04), Влада је донела уредбу о мерама подстицаја за производњу електричне енергије коришћењем обновљивих извора енергије и комбинованом производњом електричне и топлотне енергије.

Тачком 4. овог члана дефинисане су мере подстицаја, које обухватају откупне цене одређене овом уредбом према врсти електране у којој се производи електрична енергија коришћењем обновљивих извора енергије и према инсталисаној снази (P) израженој у MW. Врста електране и инсталисана снага одређују се актом о стицању статуса повлашћеног произвођача електричне енергије. Откупне цене из става 1. овог члана, изражене у евроцентима по киловат-часу (с€/1 kWh), и износе [27]:

Табела 15 Мере подстицаја према врсти хидроелектране [27]

Врста електране	Инсталисана снага [MW]	Мера подстицаја – откупна цена [с€/1kWh]
Хидроелектране	од 0,5 MW	9,7
Хидроелектране	0,5 MW – 2 MW	10,316 – 1,233*P
Хидроелектране	2 MW – 10 MW	7,85
На постојећој инфраструктури	до 2 MW	7,35
На постојећој инфраструктури	2 MW – 10 MW	5,9

11 Истраживање параметара водотока ради избора турбине

У овом поглављу детаљно је извршено истраживање параметара водотока ради избора турбине. Приказани су принципи одређивања параметара водотока, различитим методама. Поред тога представљене су минималне, средње и максималне годишње вредности параметра протока и водостаја реке Бјелице за различити период, као и пратећи дијаграми наведених параметара.

11.1 Дефиниција и подела водотокова

Реку (водоток) сачињавају корито и водена маса која се у њему креће од места настанка (извора) до ушћа у другу реку, језеро или море. Речно корито је усечено у долиномском дну. Оно представља жљеб којим протиче водена маса. Речно корито има своје стране, обале и дно. Водотоци се у зависности од особености географске средине могу поделити на следеће четири групе [28]:

- Стални водотоци, јављају се у областима где је износ укупног протицања воде у кориту већи од свих губитака. За њихово образовање потребна је годишња висина падавина од преко 250 mm (умерени предели), 500 mm (суптропски предели), односно више од 1.000 mm.
- Периодични водотоци, јављају се у областима где режим падавина омогућује само у одређеном периоду године већи протицај од губитака. Периодични водотоци су карактеристични за степе.
- Повремене водотоци, јављају се у сушним пределима где је само у изузетним приликама притицање веће од губитака. Карактеристични су за пустињске пределе.
- Понорнице су посебан тип водотока. Јављају се у крашким пределима и њихови токови се губе у понорима.

11.2 Одређивање протока водотока

Количина воде која протиче природним водотоком може значајно да варира током времена. Те промене могу да буду значајне чак и у току једног дана. За правилно димензионисање хидроенергетског постројења и одређивање могуће годишње продукције истог, потребно је одредити варијацију протока током једне године [11].

Најпогоднији начин за добијање података о протоку на изабраној локацији водног тока је добијање података о годишњим варијацијама протока од надлежне хидролошке институције. Код нас послове праћења и мерења стања водотокова обавља Републички хидрометеоролошки завод – РХМЗ.

Протоци са најзначајнијих речних токова у Србији мере се на око 190 хидролошких станица. Подаци се обрађују, систематизују по регионалном принципу (Хидролошке реонске станице) и по сливовима (Дунава, Саве, Колубаре, Дрине, Велике Мораве, Јужне Мораве, Западне Мораве, Тимока, Белог Дрима и Егејског мора). Уколико се локација на којој се планира енергетско коришћење воде налази на речном току у близини неке хидролошке станице, ови подаци се поуздано могу користити за процену протока на локацији.

Одређивање протока хидролошки неизученог водотока

Чест је случај да се локације за изградњу МХЕ налазе на хидролошки неизученим токовма, где нема систематских мерења. У том случају узимају се подаци са сличног водотока за које постоје мерења и претпоставља се униформност промене протока, појаве минималног, максималног и средњег протока у оба тока [11]. Да би се добио проток на неизученом току потребно је вредности протока са хидраулички изученог сличног тока помножити са односом површина сливног подручја посматране локације и познатог тока (75):

$$Q_n = Q_p \cdot \frac{A_{sln}}{A_{slp}} \quad (75)$$

Q_n – дневни проток испитиваног водног тока [m^3/s]

Q_p – дневни проток изученог водног тока [m^3/s]

A_{sln} – површина сливног подручја испитиваног тока [m^2]

A_{slp} – површина сливног подручја изученог водног тока [m^2]

Уколико поменути подаци о мерењу не постоје, могуће је користити хидролошке методе базиране на дуготрајним подацима о количини падавина и испаравању, подацима о површини сливног подручја и подацима о протоку са сличних сливних подручја. Ова методологија омогућава само извођење основних закључака о укупном хидролошком потенцијалу без правог посматрања локације.

У случају да је изводљивост пројекта могућа, препоручује се да мерење протока на самој локацији прате студије РХМЗ-а. Обим мерења зависи од квалитета и поузданости података достављених од РХМЗ-а.

11.2.1 Директне методе мерења протока

Директне методе се најчешће користе за одређивање протока отворених водотокова, ту спадају:

- запремински метод,
- метод коришћења мерних објеката – прелива,
- методи раствора.

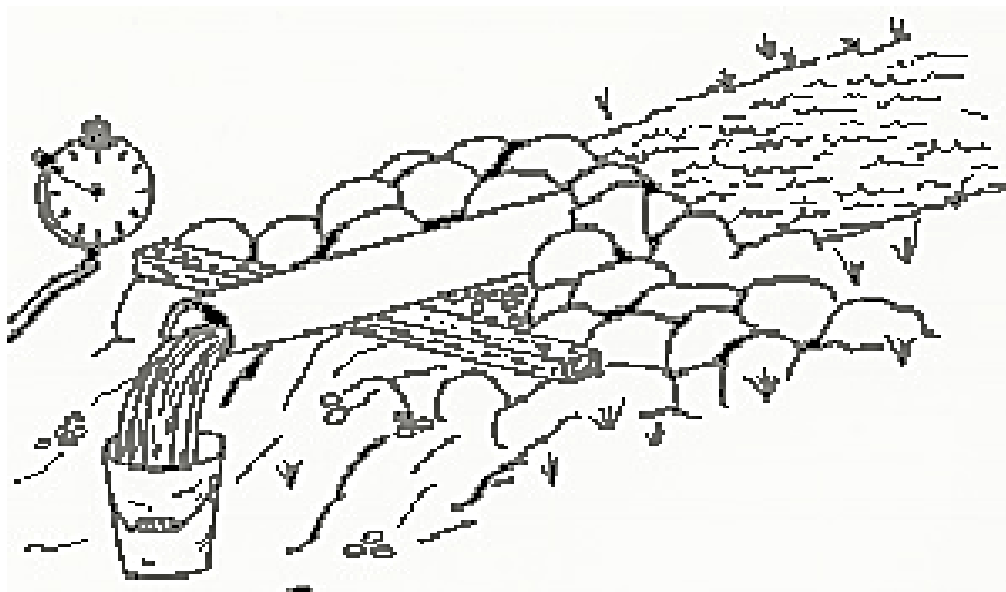
Запремински метод

Најједноставнији метод за одређивање протока најмањих водотокова (речица и потока) је запремински метод (слика 44). Он подразумева преусмеравање целокупног водотока у посуду, као што је буре, бачва, цистерна, чија је запремина позната [11]. Пожељно је да то буде суд релативно веће запремине (200 l или 500 l). При томе се хронометром мери време које је потребно да се посуда напуни водом. Брзина којом се суд пуни је проток, који се једноставно рачуна када се запремина суда подели са временом пуњења (76).

$$Q = \frac{W}{T} \quad (76)$$

W – запремина посуде [l]

T – време пуњења посуде [s]



Слика 44 Запремински метод мерења протока [29]

Метода коришћења мерних објеката – прелива

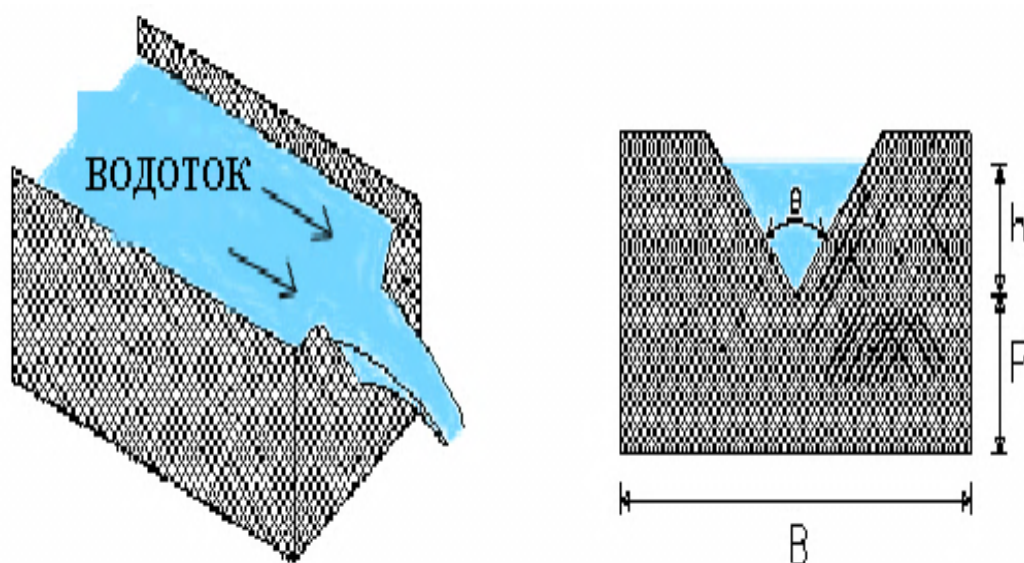
Уколико је проток водотока релативно мали (неколико m^3/s , а мањи од $4 \text{ m}^3/\text{s}$), могуће је изградити привремени водотехнички објекат (мерни прелив са оштром ивицом). Прелив је зид мале висине или брана постављена попречно на речни ток чији се проток мери, са отвором кроз који се каналише цео водоток. У ове преливе спадају три основне групе:

- правоугаони преливи (са оштром ивицом и без бочне контракције),
- троугаони преливи,
- трапезни преливи.

За мале протоке троугаони прелив даје најпоузданије резултате, али су трапезни и правоугаони преливи поузданији код већег распона протока. Преливи могу бити израђени од метала или тврдог дрвета са оштрим ивицама. Проток се одређује мерењем висине преливног млаза (висинске разлике горњег нивоа воде на локацији узводно од прелива и дна отвора на прегради).

За сваки од наведених типова прелива постоји функционална зависност између протока кроз прелив и висине преливног млаза, тако да је довољно измерити висину прелива за израчунавање протока.

Да би се обезбедила тачност мерења, потребно је одржавати ивице прелива оштрим и спречити акумулацију седимента иза прелива. Висину прелива потребно је мерити на удаљености од прелива најмање четири пута већој од максималне висине прелива. Пре него што се изабере тип и одреде димензије прелива на локацији на којој се мери проток, потребно је проценити распон протока на мерном месту, како би се обезбедиле адекватне димензије преливног отвора које омогућавају пропуштање потребне количине воде [11].



Слика 45 Троугаони прелив [11]

Троугаони прелив (слика 45) који се најчешће користи се назива Томсонов прелив ($\theta = 90^\circ$). Код овог типа троугаоног прелива проток воде се рачуна по следећем изразу (77):

$$Q = C_d \cdot \frac{8}{15} \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot h^{2.5} \quad (77)$$

C_d – коефицијент протока [/]

h – висина прелива [m]

g – убрзање силе земљине теже [m/s^2]

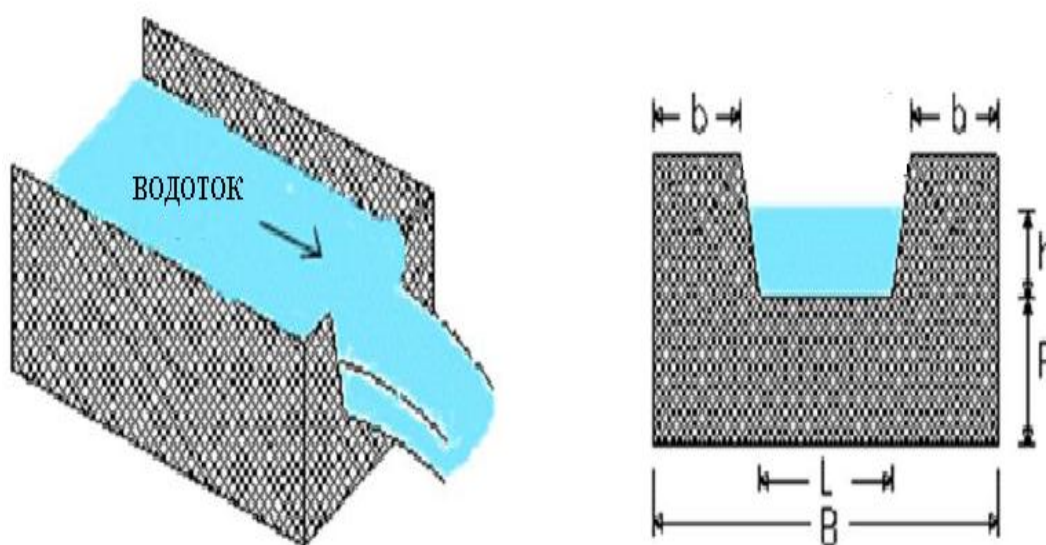
Трапезни прелив (слика 46) који се најчешће користи назива се Чиполетијев прелив, код овог типа прелива проток се рачуна на основу следећег изрази (78):

$$Q = \frac{2}{15} \cdot C_E \cdot h \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \cdot (5 \cdot L + 4 \cdot h \cdot \tan \alpha) \quad (78)$$

C_E – проточни коефицијент (износи 0,63) [/]

L – ширина дна прелива [m]

α – угао нагиба [°]



Слика 46 Трапезни прелив [11]

Код правоугаоног типа прелива (слика 47) проток водотока може се израчунати на основу обрасца (79).

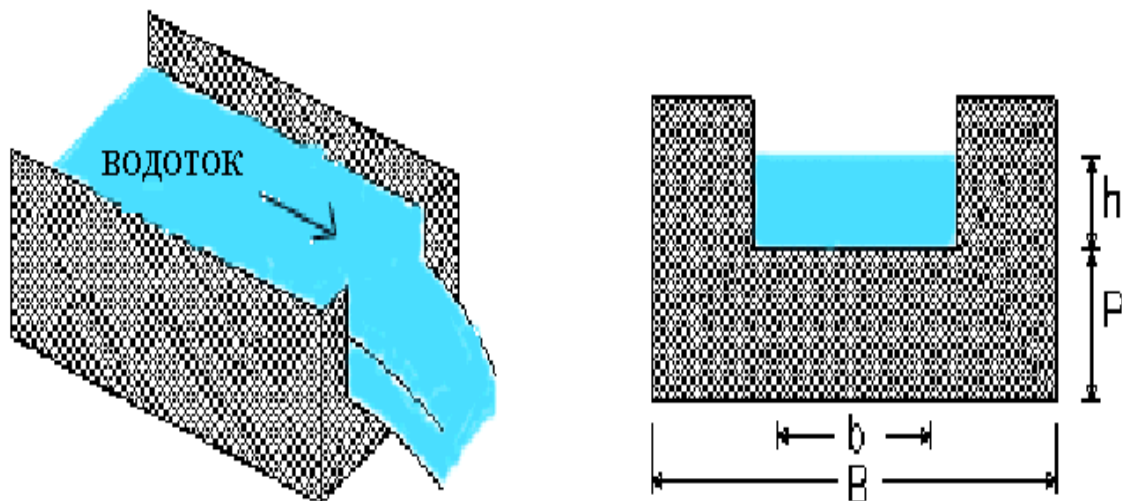
$$Q = C_e \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot (b + K_b) \cdot (h + K_h)^{3/2} \quad (79)$$

C_e – проточни коефицијент [/]

b – ширина дна прелива [m]

K_b – коефицијент за ефекат вискозности [/]

K_h – коефицијент за ефекат површинске напетости [/]



Слика 47 Правоугаони прелив са оштром ивицом [11]

Методи раствора

Методи растварања (слика 48) су методи погодни за одређивање протока малих и плитких изразито турбулентних токова са великим нагибима дна струјног тока, код којих се не може користити метод брзина-површина и код којих је изградња водотехничких објеката прескупа. Мерење протока водног тока методама растварања подразумева убризгавање раствора хемикалије (тзв. трејсера²²) познате концентрације у водоток и прикупљање узорка низводно од места где је трејсер убризган, након што је дошло до потпуног мешања трејсера и воде из водотока [11]. Хемијски раствор концентрације c_1 се може убризгавати константним протоком q [m³/s], све док низводни узорци не покажу ниво константне концентрације c_2 . Уз узимања у обзир концентрације трејсера присутне у природном водном току пре убризгавања c_0 , проток тока се одређује по изразу (80).

$$Q = q \cdot \frac{(c_1 - c_2)}{(c_2 - c_0)} \quad (80)$$

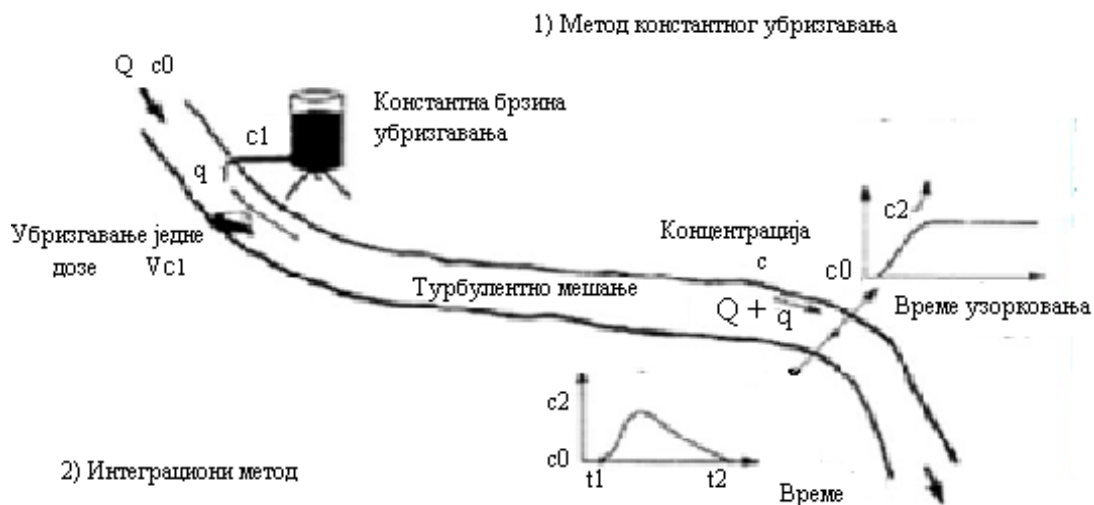
q – проток хемикалије [m³/s]

c_0 – концентрација пре убризгавања хемикалије [%]

c_1 – концентрација хемикалије на месту убризгавања [%]

c_2 – концентрација хемикалије низводно [%]

²² Растворна хемикалија која се убризгава.



Слика 48 Мерење протока методом раствора [11]

Други метод је интеграциони, који подразумева убацивање једне дозе раствора (познате терминологије и као гутљај) запремине V што је могуће брже у водоток [11]. У овом случају узорци који се сакупљају током времена дају нам корелацију између концентрације и времена, израз (81).

$$Q = \frac{V_{c_1}}{\int_{t_1}^{t_2} (c_2 - c_0) dt} \quad (81)$$

V_{C1} – запремина једне дозе раствора [m^3]

У оба случаја концентрација хемикалија у прикупљеним узорцима се користи за процену разблаживања, а потом применом поменутих једначина може се израчунати проток. Хемикалије које се користе за ове методе морају да имају одређена својства: да се лако растварају, да буду стабилне у води, да се лако квантификују у растворима мале концентрације, да буду нетоксичне за све облике живог света у водотоковима и да на њих нема утицаја седимент и остале природно присутне хемикалије у води. Најпопуларније хемикалија је натријум дихромат ($Na_2Cr_2O_7$). Анализа узорака се обавља колориметријском аутоматизованом процедуром којом се процењује концентрација веома малих количина једињења хрома упоређивањем са узорцима убризганог раствора. Специјализована опрема која се користи за ту намену је релативно скупа. Данас се горе наведене методе све више замењују методама где се као трејсер користе соли и где се уместо концентрације мери електрична проводљивост. Овакви типови мерења подразумевају употребу једноставније опреме.

11.2.2 Индиректни метод

Индиректни методи се користе на средњим и већим водотоковима, а своде се на мерење проточног пресека водног тока и мерење брзине кроз поменути пресек. При оваквом начину мерења, треба изабрати локацију где је речни ток релативно миран, речно корито релативно право и без растиња. Како брзина протицања није константна по површини проточног пресека, неопходно је да се брзина воде мери на неколико различитих места како би се добила средња вредност брзине [11].

Уколико се ради о релативно малим токовима, мери се брзина у једној тачки тока и процењује се средња брзина, а ако су у питању средњи и већи токови мери се брзина у више тачака по профилу (ширини) и дубини тока, а затим се врши осредњавање брзине или интеграљење по попречном пресеку.

Мерење проточне површине

Како би израчунали величину попречног пресека природног водног тока, потребно је попречни пресек поделити на трапезе (слика 49) [11]. Мерењем страница трапеза, одређеним редоследом, као што је то илустровано на слици, попречни пресек би се рачунао на следеди начин (82):

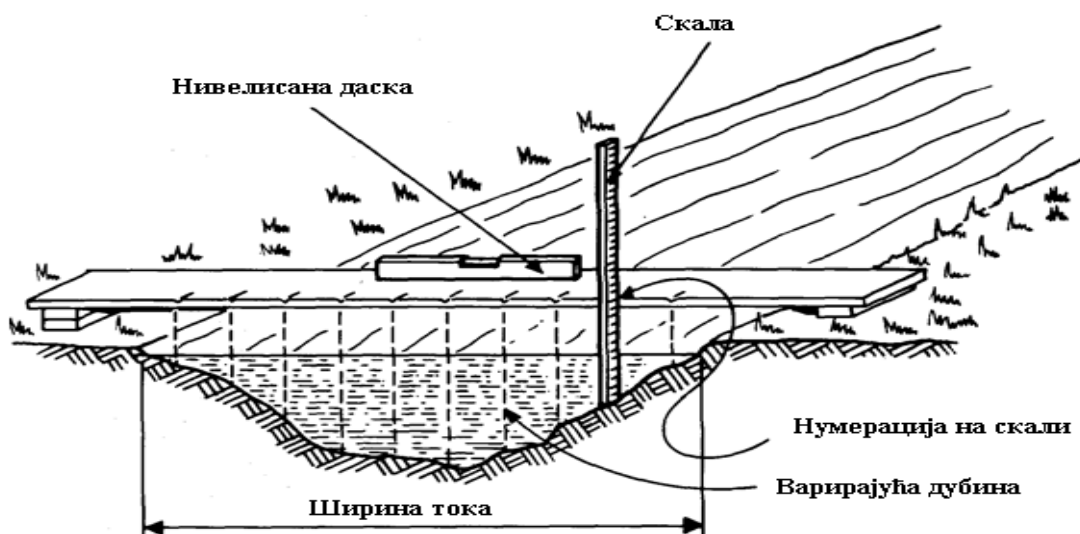
$$S = b \cdot \frac{h + \dots + h}{n} \quad (82)$$

S – површина попречног пресека [m^2]

b – ширина водотока [m]

h – висина странице трапеза [m]

n – број трапеза [/]



Слика 49 Мерење проточне површине [30]

Мерење брзине кроз проточни пресек

Постоји неколико уређаја да се измери брзина водног тока, од којих се за процене хидроенергетског потенцијала водотокова најчешће користе:

- пловак,
- хидрометријска кола,
- електро-магнетни мерачи.

Мерење брзине помоћу површинског пловка је најједноставнији метод који се може користити за брза и груба прелиминарна одређивања протока. Пловак (може бити и дрвени чеп или делимично напуњена боца) који је већим делом потопљен, смешта се у центар водног тока. Мери се време t које је потребно да пловак превали деоницу између две локације l . Површинска брзина воде V_p је количник дужине l и времена t .

Обично се процес мерење обавља неколико пута (минимално 3) и одређује се средња вредност брзине. Како би добили претпостављену средњу брзину неопходно је добијени резултат помножити са корекционим фактором z , који зависи од дубине водотока, као и рељефа дна и обале (0,75 је најчешће узимана вредност) (табела 16), тако да је проток (83) [11]:

$$Q = z \cdot v_p \cdot S \quad (83)$$

V_p – површинска брзина воде [m/s]

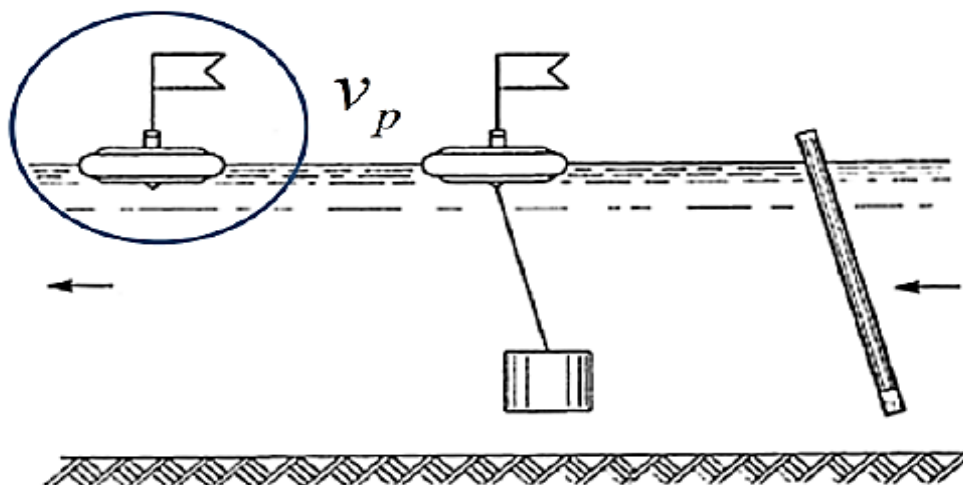
Z – корекциони фактор [/]

Табела 16 Корекциони фактор за различите типове токова [11]

Врста тока	Z – корекциони фактор
Бетонски канали правоугаоног пресека, глатки	0,85
Велике, спори, чисти токови	0,75
Мали, спори, чисти токови	0,65
Плитки ²³ турбулентни токови	0,45
Врло плитки, каменити токови	0,25

²³ Дубина мања од 0,5 m.

Посебно израђени пловци се могу израдити да плове средњом брзином тока (слика 50).

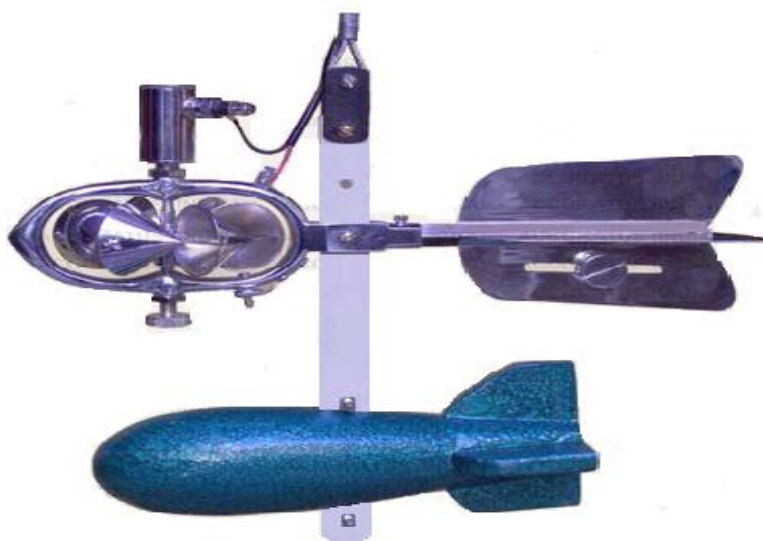


Слика 50 Мерење брзине методом пловка [11]

За одређивање протока на перманентним речним мерним станицама најчешће се користе механички хидрометријски уређаји (хидрометријска кола). Постоје два основна типа ових уређаја:

- Са чашицама – садржи 6 коничних чашица које се обрћу око вертикалне осе.
- Са пропелером (елисом) – садржи елису која ротира око хоризонталне осе коју реп пераја усмерава да буде паралелна са током.

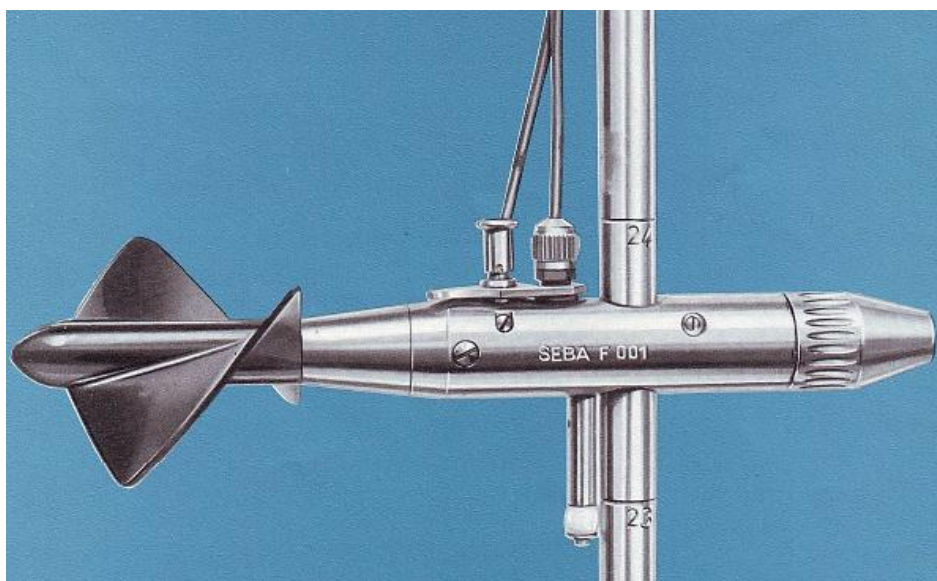
Први тип (слика 51) се користи код мањих брзина, робуснији су (њихови лежаји су заштићени од речних наноса) и мање су тачни (тачност $\pm 5\%$).



Слика 51 Хидрометријско коло са чашицама [31]

Други тип (слика 52) је прецизнији (тачност $\pm 2\%$) и мање ремети струјни ток на месту мерења. Основни елемент хидрометријских кола је њихов обртни део (чашице или елиса) који се, када се уређај унесе у воду, окреће под утицајем водног тока. Између брзине водене струје и брзине окретања обртног дела постоји одговарајућа функционална зависност за сваки коришћени инструмент.

Број обртаја обртног дела се мери у кратком временском периоду (1 – 2 минута), а измерена вредност се уз помоћ поменуте функционалне зависности претвара у брзину воде, док модерна решења уређаја са микропроцесорском технологијом рачунају и приказују вредност брзине тренутно на дисплеју.



Слика 52 Хидрометријско коло елисама [32]

Уређаји се ручно, са моста, из жичаре или чамца (слика 53) лоцирају у одговарајућим тачкама у посматраном проточном пресеку водног тока. Ови уређаји су практични за мерење локалних брзина воде и по мерном пресеку се могу једноставно померати и по хоризонтали и по вертикали. Тиме се може добити расподела брзина кроз проточни пресек и интеграљењем кроз проточни пресек-проток.



Слика 53 Начини мерења са моста и жичаре [33]

Електромагнетни мерачи

Електро-магнетни мерач брзине струје (слика 54) је електрични индукциони мерни инструмент, без покретних делова, постављен у потпуно затворену аеродинамичну сонду. Ради на принципу Фарадејевог закона електромагнетне индукције по коме се магнетно поље (које ствара сензор брзине) индукује електропотенцијал у проводнику који се креће (у овом случају то је вода). Једноставно речено, разлика потенцијала која се ствара у проводнику једнака је производу брзине кретања проводника (брзине протицања воде) помножене са јачином магнетног поља и дужином проводника. Сонда се може поставити на штап или се учврстити на кабл и спуштати на различите дубине [11].

Предност његовог коришћења је у томе што је мањи и има шири опсег мерења него хидрометријска кола. Веома је користан при малим брзинама када мерачи са пропелером дају нетачне податке. Његова осетљивост и отпорност на растиње и наносе чине их погодним за коришћење у веома запрљаним или затрављеним токовима.



Слика 54 Електромагнетни мерач [34]

11.3 Мерење нивоа – водостаја

Мерење брзина струјања дуж речног тока и одређивање протока у кратим временским интервалима није практично, јер је овај доста скуп. Много је једноставније континуално мерити ниво (водостај) водног тока, јер сваком водостају одговара

одређена количина воде. Мора се наћи одговарајућа тачка на релативно равном месту и на коме река мирно тече, где ће се поставити мерни инструмент – водомерна летва²⁴.

Водоток на овом месту мора да има уједначену ширину, а област мора бити јасно дефинисана и чиста. Како проток водног тока варира, ниво воде расте или опада. Стање се проверава сваког дана у исто време, а тренутно стање се чита на стубу избаждарене летве.

Код савремених уређаја ниво воде се аутоматски региструје. Свега неколико пута током године изврше се тачна мерења протока, при чему се означава колики је био водостај при сваком мерењу. Узајамна веза између измерених нивоа и протока у водотоку даје консумпциону криву²⁵, која се назива крива протока (слика 55). Она омогућава процену вредности протока водотока мерењем вредности водостаја [11]. Крива протока се може математички изразити формулом (84):

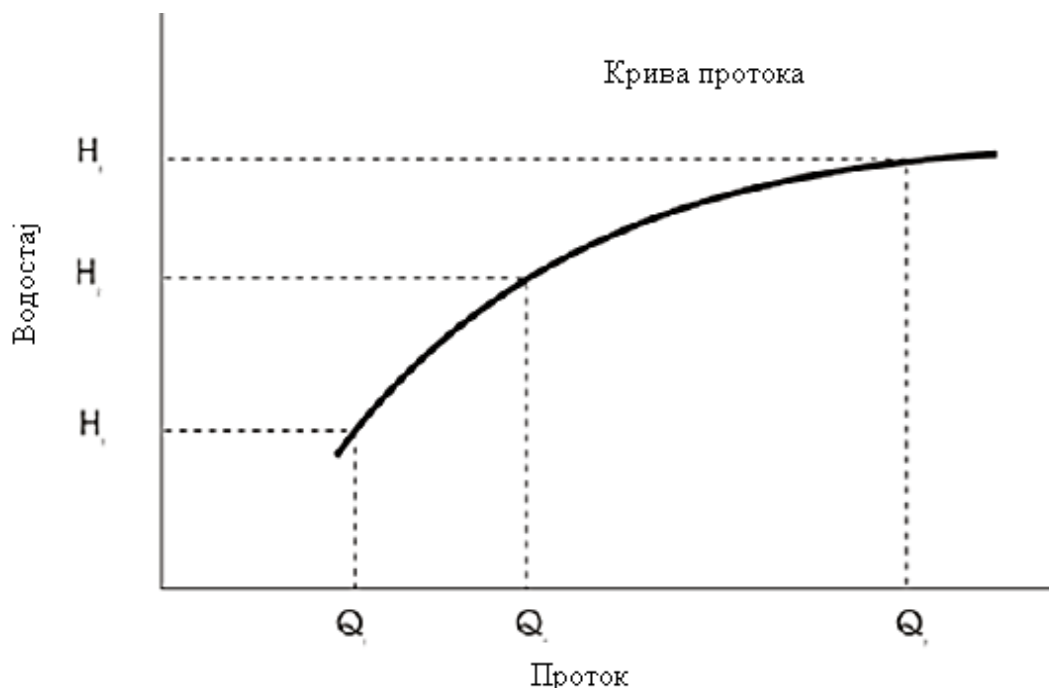
$$Q = C \cdot (H + H_0)^n \quad (84)$$

C – константа [/]

n – константа [/]

H – тренутни водостај [m]

H_0 – ниво за нулти проток (корекциони фактор) [m]



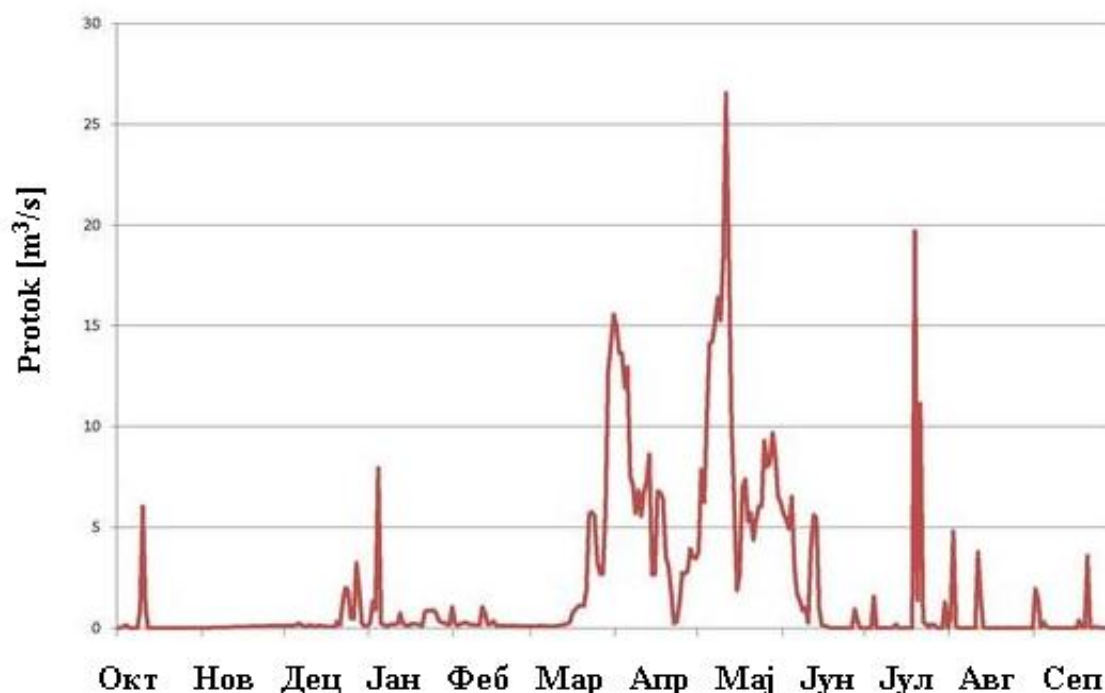
Слика 55 Пример криве протока [11]

²⁴ Фиксни мерни уређај стандардних димензија са скалом на којој се, са тачношћу ± 1 cm, може прочитати водостај.

²⁵ Консумпциона крива графички приказује однос водене масе и дубине неког водотока. Користи се за брзо проналажење запремине посматране воде при било ком водостају.

Подаци који се добију о годишњој варијацији дневног протока на један од претходно побројаних начина треба систематизовати на одговарајући начин. Један од начина је приказивање у форми хидрограма (слика 56), који представља хронолошки приказану дневну варијацију протока у календарској години.

Овакав приказ је лак за праћење и разумевање, али није превише корисан за израчунавање енергетског потенцијала водног тока.



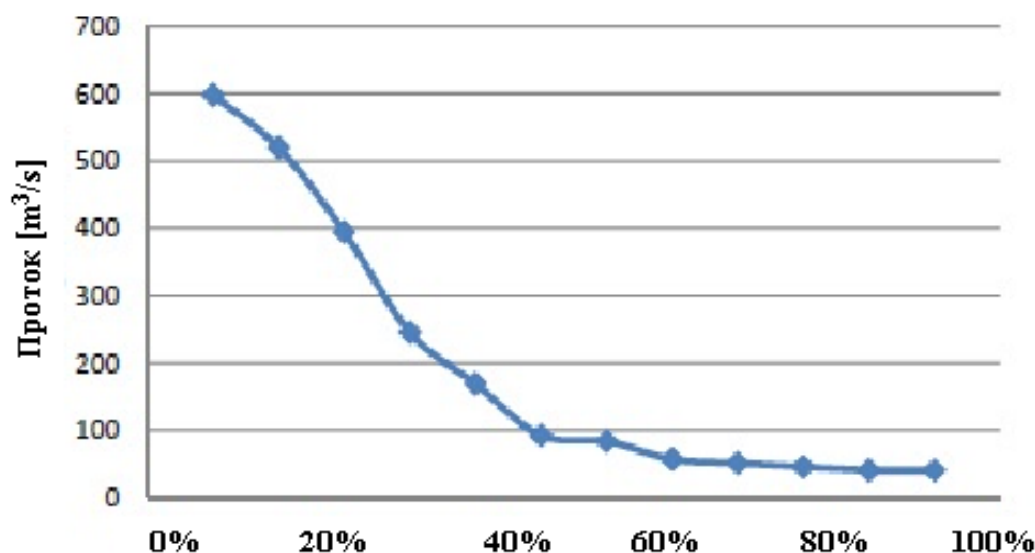
Слика 56 Пример хидрограма [35]

Други начин организовања података о годишњој варијацији дневног протока, представља цртање криве трајања протока (слика 57) која показује расподелу протока водотока током године.

На апсцисној оси је приказан проценат времена за које проток на посматраном месту достиже или премашује вредност протока на ординатној оси. Тако на пример, са криве трајања протока може се одмах проценити ниво протока који де бити доступан најмање 50% годишње (познат као $Q_{50\%}$). Проток који се јавља преко 95% времена годишње најчешће се узима као карактеристична вредност минималног протока водотока.

У једном посматраном региону криве трајања протока су по правилу сличне, али на њихов облик знатно утиче и стање земљишта на коме се налази ток, покривеност вегетацијом и у мањем обиму облик слива, као и утицаји људи: изградња резервоара, захвата и прелива.

Уравнотежена крива означава ток са мало поплава где највећа количина воде у току потиче из подземних извора, док стрма крива означава ток са честим поплавама и сушним периодом и малом количином воде из подземних извора [11].



Слика 57 Пример криве трајања протока [36]

11.4 Мерење бруто напора

Бруто напор представља вертикално растојање које вода пређе приликом генерисања снаге, односно растојање између горњег и доњег нивоа воде.

Теренска мерења бруто напора се обично изводе коришћењем техника посматрања. Неопходан ниво прецизности мерења сам намеће метод који ће се при томе користити.

У прошлости најбољи начин је био нивелисање положаја посматрача са штапом. Тачнија мерења се добијају коришћењем алтиметра²⁶ или мање тачније са клинометром²⁷ или Абни нивелисањем. Данас са дигиталним мерачима углова, електронским дигиталним нивелаторима и посебно са електронским компактним станицама овај посао је поједностављен. Модерни електронски нивелатори омогућују аутоматско представљање података о висини и удаљености за 4 секунде са тачношћу мерења висине од 0,4 mm, и интерна меморија омогућава да се чува око 2400 података. Премеравање уз помод ГПС-а²⁸ је већ постала пракса и ручни ГПС рисивер је идеалан за теренско позиционирање и грубу израду мапа [11].

Када се одреди могући бруто напор неопходно је урачунати губитке који се јављају на улазу у цев тј решетке које спречавају улазак чврстих предмета у цев, трење у цевима, коленима и вентилима. Поред ових губитака, одређени типови турбина морају да избацују воду на ниво који је већи од нивоа доње воде. Бруто напор од кога се одузме сума свих губитака даје нето напор, који представља напор који покреће турбину.

²⁶ Користи за мерење надморске висине објекта у односу на одређени фиксирани ниво.

²⁷ Инструмент за мерење нагибног угла.

²⁸ ГПС – GPS (Global Positioning System) је систем за одређивање позиције на земљи.

11.5 Параметри реке Бјелице

У наредној табели приказани су минимални, средњи и максимални годишњи водостаји реке Бјелице. Подаци који су наведени у табели преузети су са сајта Републичког хидрометеоролошког завода.

Табела 17 Водостаји реке Бјелице за наведене године

Водостаји реке Бјелице					
Година	Годишњи минимум [cm]	Датум	Средњи годишњи [cm]	Годишњи максимум [cm]	Датум
1991	83	07.09.	100	264	06.07.
1992	77	17.08.	99	291	26.06.
1993	69	04.08.	87	207	05.04.
1994	73	13.08.	87	221	28.04.
1995	72	13.10.	94	260	03.04.
1996	70	28.07.	97	295	17.05.
1997	73	05.07.	94	208	03.04.
1998	67	03.08.	93	194	15.02.
1999	76	26.08.	101	270	27.12.
2000	65	24.08.	88	160	10.02.
2001	68	20.08.	92	373	27.09.
2002	70	19.07.	96	350	11.10.
2003	71	10.08.	88	143	11.03.
2004	71	16.09.	94	220	27.02.
2005	77	31.07.	101	275	07.05.
2006	74	20.08.	99	317	23.03.
2007	65	27.07.	90	297	22.05.
2008	64	30.08.	84	162	06.05.
2009	63	29.09.	88	247	25.06.
2010	68	29.09.	94	396	23.06.

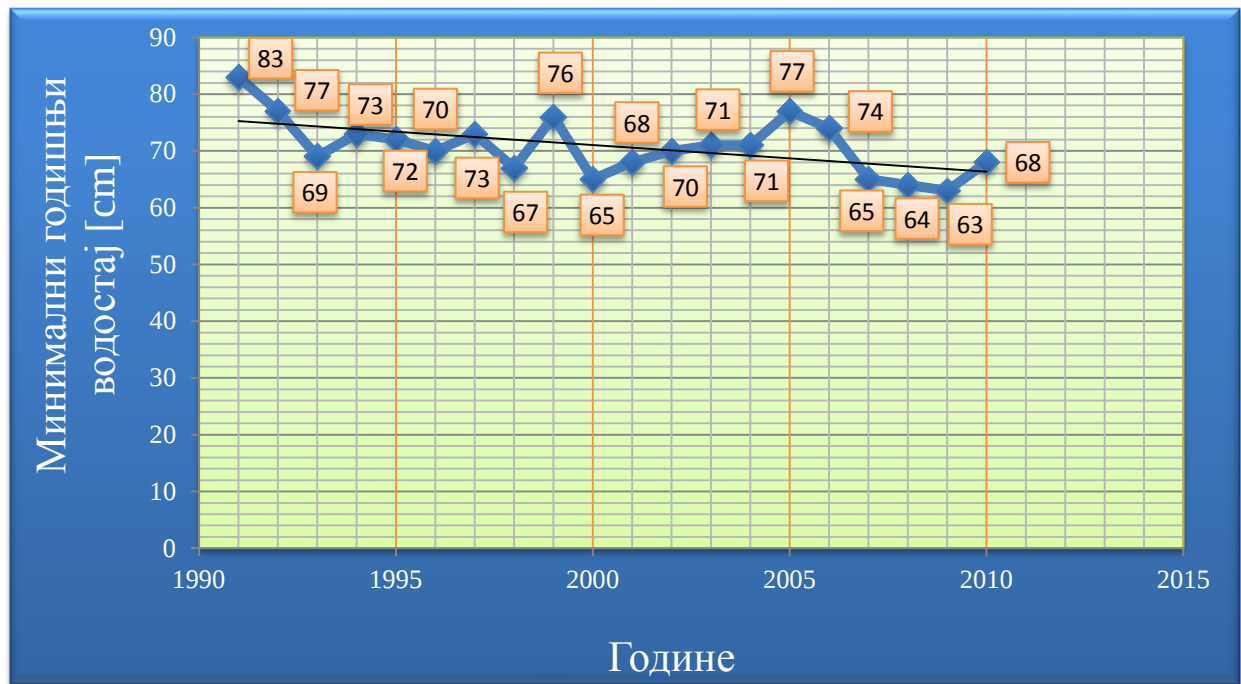
Протицаји реке Бјелице (минимални, средњи и максимални) приказани су у следећој табели. Подаци који су наведени у табели преузети су са сајта Републичког хидрометеоролошког завода.

Табела 18 Протицаји реке Бјелице за наведене године

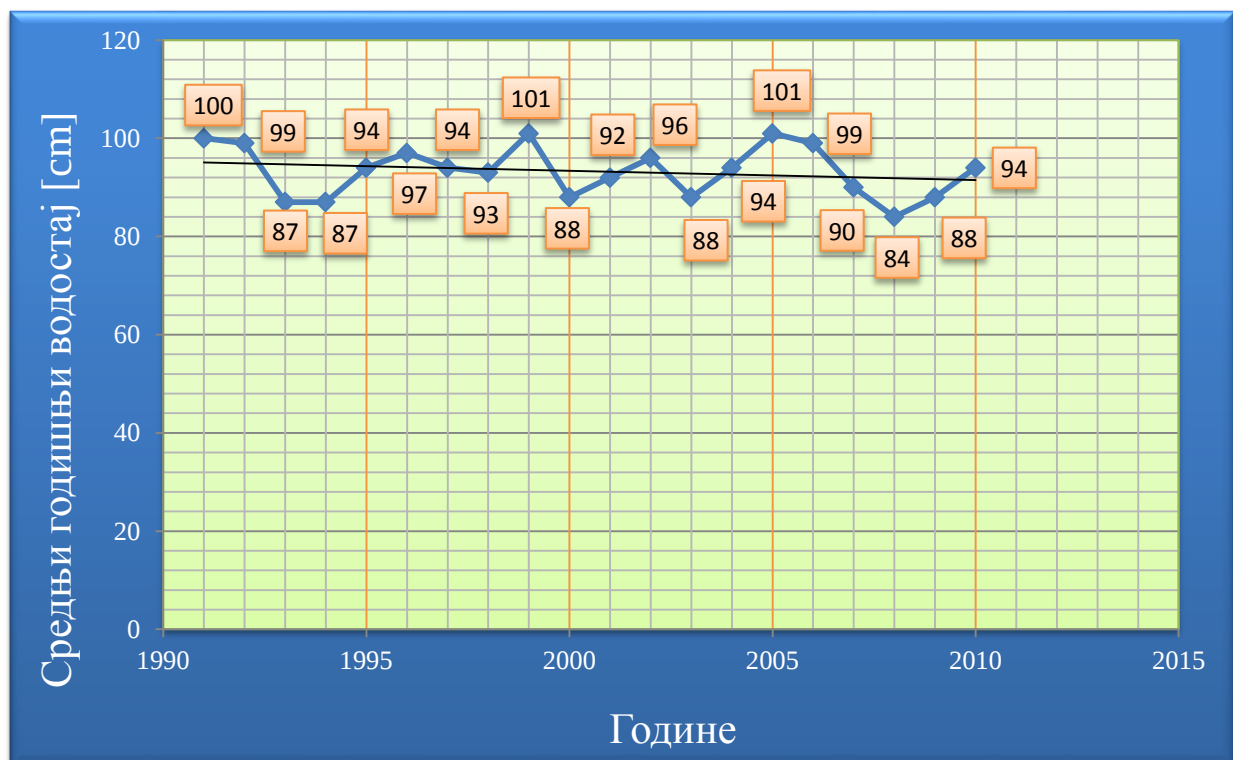
Протицаји реке Бјелице					
Година	Годишњи минимум [m ³ /s]	Датум	Средњи годишњи [m ³ /s]	Годишњи максимум [m ³ /s]	Датум
1991	0.41	07.09.	2.05	51.6	06.07.
1992	0.27	17.08.	2.49	64.4	26.06.
1993	0.09	04.08.	1.17	29.1	05.04.
1994	0.16	13.08.	0.9	34.4	28.04.
1995	0.21	13.10.	2.06	51.3	03.04.
1996	0.15	28.07.	2.60	66.2	17.05.
1997	0.24	05.07.	1.92	30.9	03.04.
1998	0.12	04.08.	1.77	25.7	15.02.
1999	0.44	26.08.	2.92	55.5	27.02.
2000	0.07	24.08.	1.65	14.7	10.02.
2001	0.12	20.08.	1.94	85	27.09.
2002	0.15	19.07.	2.15	79.8	11.10.
2003	0.18	10.08.	1.40	10.2	11.03.
2004	0.21	14.09.	2.08	35.4	27.02.
2005	0.438	01.08.	3.16	57.6	07.05.
2006	0.3	20.08.	3.07	76.4	23.03.
2007	0.18	26.07.	2.14	67.1	22.05.
2008	0.19	04.09.	1.5	15.3	06.05.
2009	0.28	29.09.	2.32	46	25.06.
2010	0.436	28.09.	3.19	115	23.06.

11.6 Дијаграми водостаја и протицаја реке Бјелице

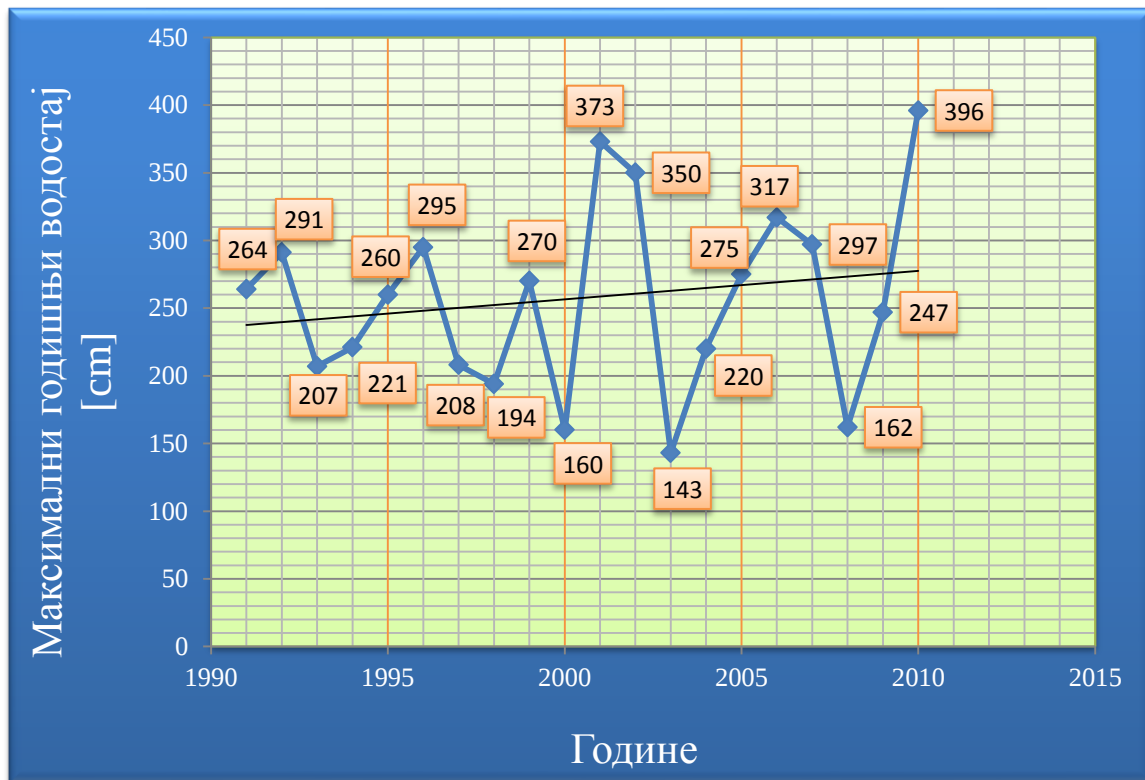
На основу *табеле 17 и 18* у којима су приказани минимални, средњи и максимални водостаји и протицаји реке Бјелице, формиран су следећи дијаграми. На дијаграмима су дати минимални, средњи и максимални водостаји и протицаји у одређеним временским периодима. На ординатној оси дијаграма дате су вредности минималних, средњих и максималних водостаја и протока, док се на апсцисној оси налазе различити временски периоди.



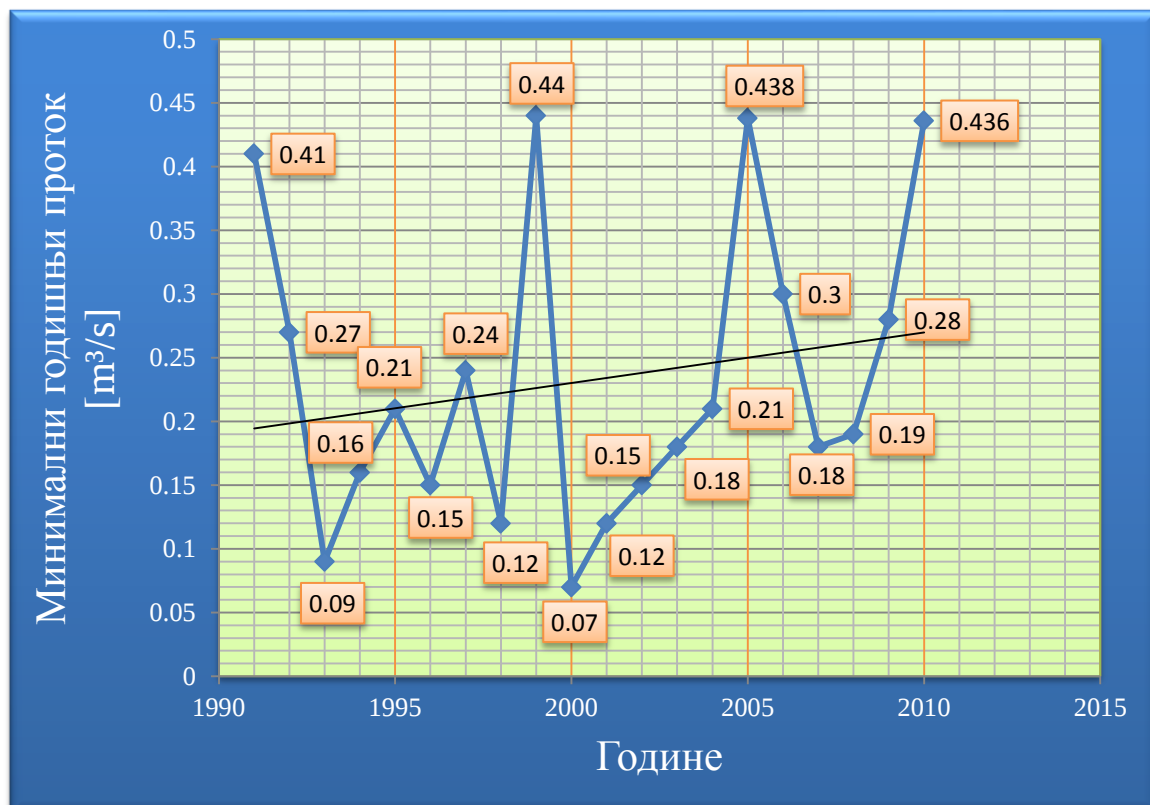
Дијаграм 1 Минимални годишњи водостаји



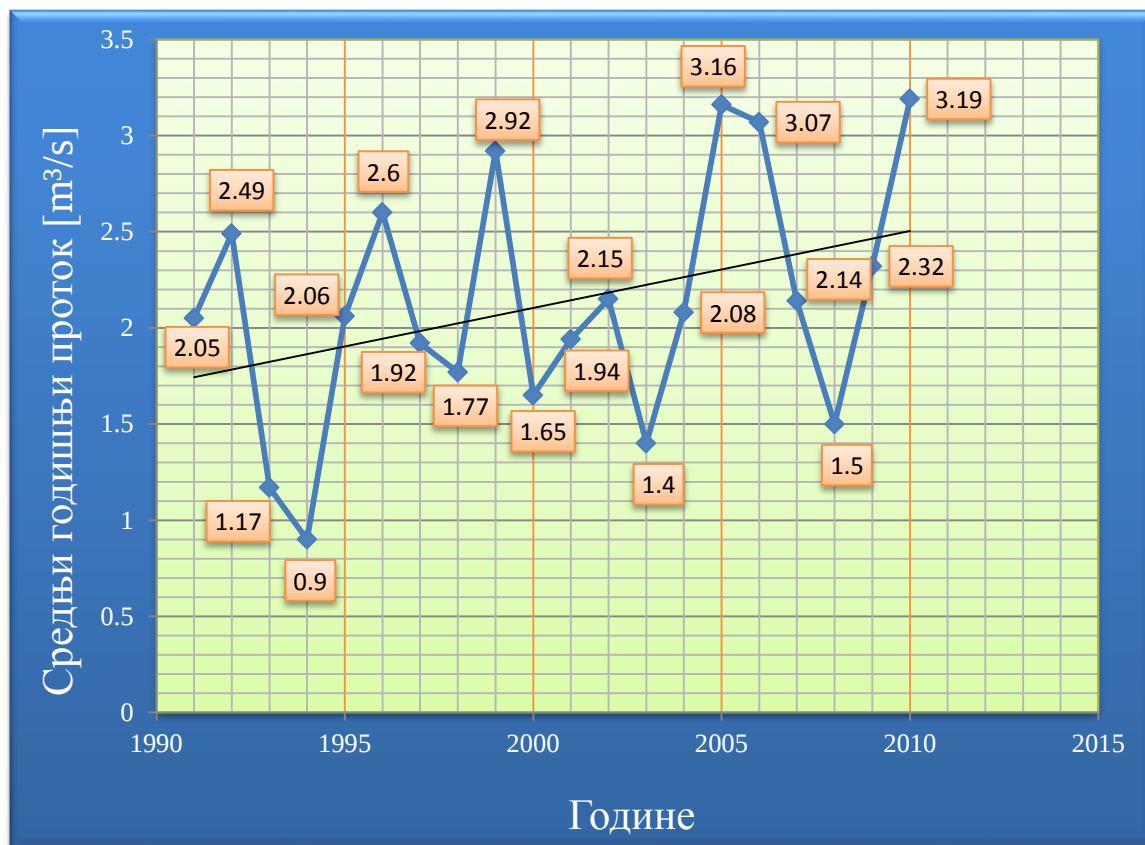
Дијаграм 2 Средњи годишњи водостаји



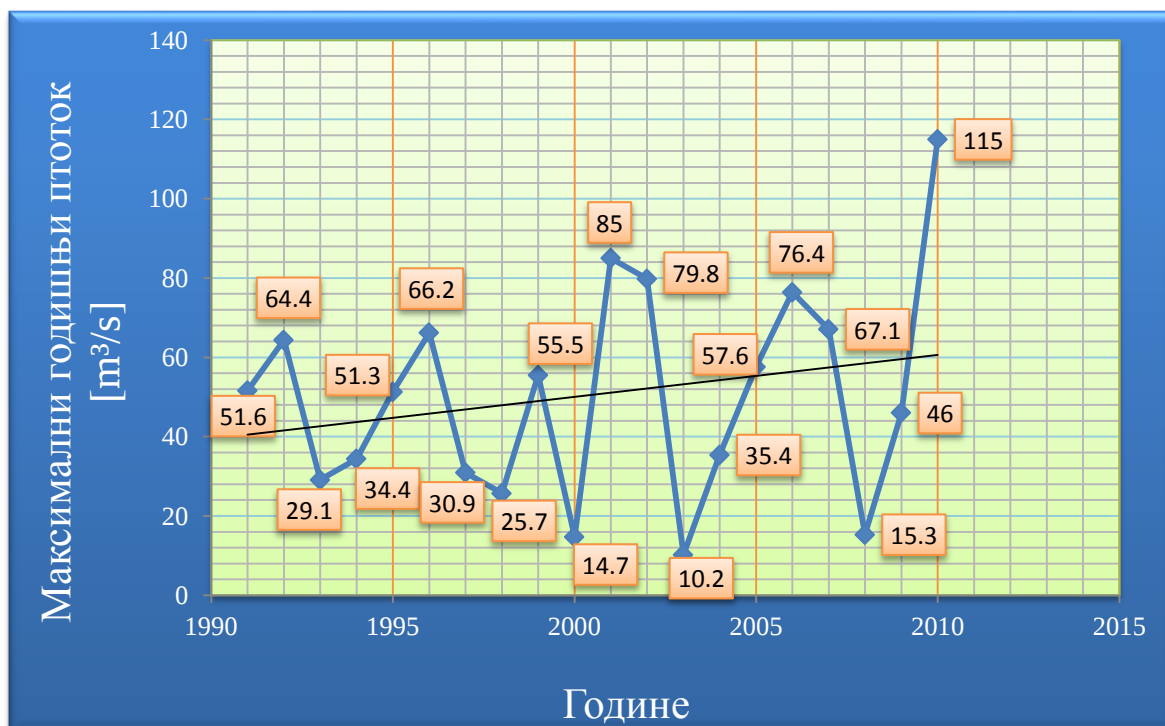
Дијаграм 3 Максимални годишњи водостаји



Дијаграм 4 Минимални годишњи протицаји



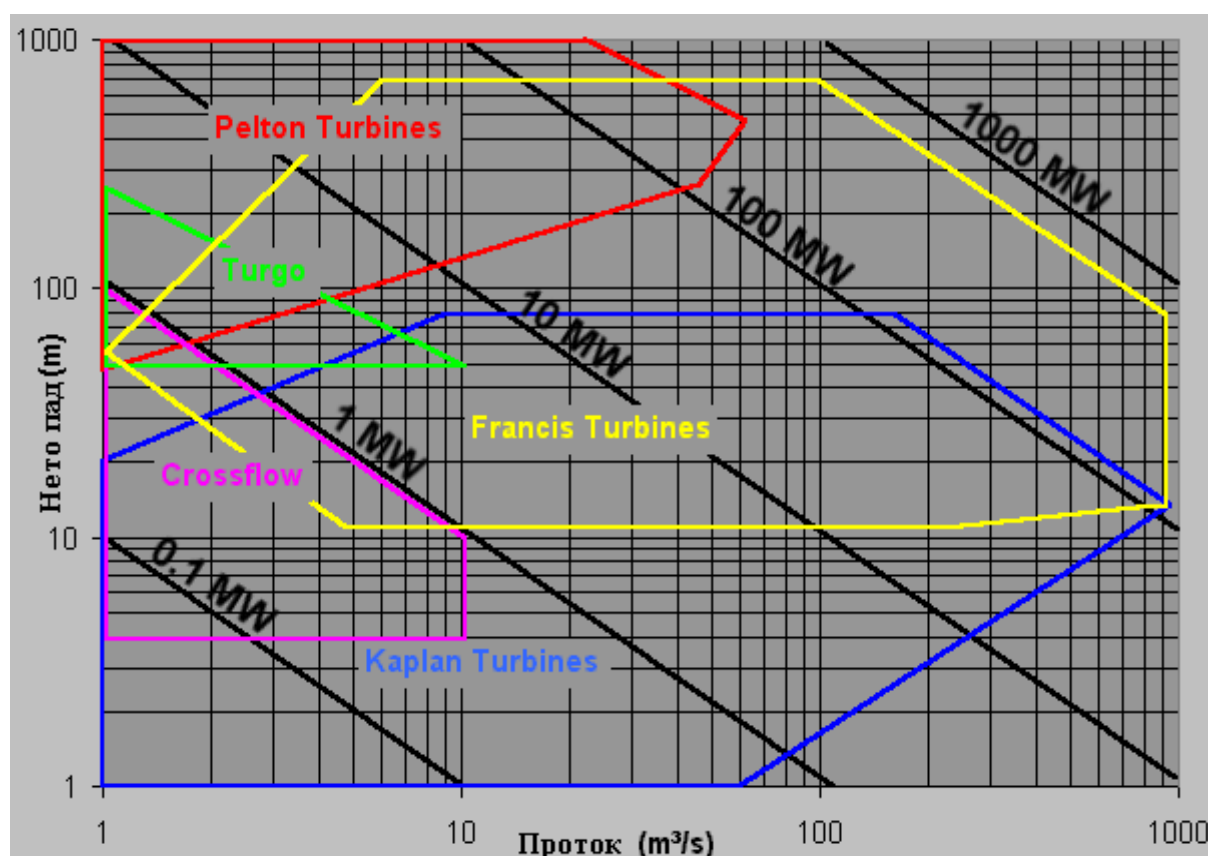
Дијаграм 5 Средњи годишњи протицаји



Дијаграм 6 Максимални годишњи протицаји

11.7 Избор турбине

Из економских разлога произвођачи хидротурбина увели су типизацију и стандардизацију, која значи избор врста и величина водних турбина, која покривају најчешћа подручја падова и протока. Типизација малих турбина омогућава: брз избор одговарајуће турбине прилагођене анализираном водотоку, брзо пројектовање, брзо конструисање, брзу и једноставну монтажу, заменљивост појединих конструктивних склопова, лако добављање опреме и слично.



Дијаграм 7 Дијаграм на основу којег се врши одабир турбине [37]

Избор турбине зависи од расположивог нето пада и протока, цене постројења, броја обртаја генератора, захтева одржавања, могућности појаве кавитације, осетљивости турбине на механичке нечистоће у струји воде и од осталих критеријума.

Хидро турбину треба одабрати тако да одговара специфичним условима који се јављају на локацији а са циљем да се оствари очекивана висока ефикасност. На различитим локацијама се појављују различити напори/падови као и расположиви протоци, а број комбинација протока и падова је практично једнак броју локација, па (иако је број расположивих обртаја генератора ограничен) се само случајношћу једна иста турбина може ефикасно употребити на више локација.

За брдско-планинска подручја за локације са високим падовима и малим протоцима бујичастих водотока погодне су Пелтонове турбине. Ове турбине одржавају висок степен искоришћења у врло широком опсегу промене протока. Овај тип турбина нема проблема у вези кавитације због атмосферског притиска који влада унутар кућишта турбине, а ниске температуре брдско-планинских области нису опасне за ове турбине. Код проточних МХЕ поставља се Један генератор са вишемлазном Пелтон турбином [11].

12 *Израда лабораторијског модела МХЕ са Пелтоновом турбином*

Дизајн лабораторијског модела МХЕ са Пелтоновом турбином, морао је имати везе са реалним радом једног оваквог постројења. Зато је било најбоље прво размотрити како права МХЕ са Пелтоновом турбином ради и тек када се разуме шта се заиста дешава у стварности може се приступити реализацији поједностављеног система, намењеног лабораторијским вежбама. Поред тога неопходно је било извршити прорачун (прилог 1) реалног постројења МХЕ на реци Бјелици, у циљу добијања параметара и димензија елемената МХЕ. Разматрањем добијених резултата, дошло се до закључка да је неопходно лабораторијски модел МХЕ са Пелтоновом турбином конструисати тако да, према теорији сличности размера реалног постројења и модела буде у односу 1:4.

Конструкција модела (слика 58) садржи следеће елементе:

- радно коло,
- две млазнице,
- доводни цевовод у виду гипког црева,
- кућиште,
- вратило,
- два куглична лежаја,
- држаче за лежаје у виду навојне шипке,
- генератор електричне енергије (динама) и сијалица,
- радни сто на коме је модел монтиран.



Слика 58 Приказ лабораторијског модела МХЕ са Пелтоновом турбином

Радно коло (слика 59) је израђено од две врсте материјала. Лопатице су израђене од пластике, док је основа радног кола израђена од челика. У табели 19 приказани су параметри радног кола лабораторијског модела МХЕ са Пелтоновом турбином. Лопатице су причвршћене на основу радног кола помоћу шrafoва и матица. Основа радног кола на себи садржи пет рупа које служе за причвршћивање радног кола и вратила турбине, помоћу шrafoва и матица.



Слика 59 Приказ радног кола Пелтонове турбине

Табела 19 Параметри радног кола лабораторијског модела

Параметри	Вредност
Пречник радног кола турбине [mm]	200
Ширина лопатице [mm]	40
Дужина лопатице [mm]	40
Дубина лопатице [mm]	10
Број лопатица радног кола [/]	15
Дужина руке лопатице [mm]	20

Овај лабораторијски модел Пелтонове турбине садржи две млазнице, као што је и прорачуном предвиђено. Млазнице (слика 60) су такође израђене од пластичног материјала, а у себи садрже два механизма.



Слика 60 Приказ млазнице

Унутар млазнице се налази игла, која је у овом случају статична, а има за циљ да регулише млаз. Одвртањем/завртањем механизма на врху млазнице добија се ефекат сличан, као код млазница Пелтонових турбина, с тим да се у овом случају не помера игла, већ врх млазнице. Други механизам је у виду полуге, која омогућава пролаз воде кроз млазницу, тако што се њеним притискањем отвара вентил у млазници и омогућава пролаз воде. Такође, ову полуку је могуће закочити, држачем који се налази на млазници и тиме обезбеди константан проток воде кроз млазницу. На дну млазнице налази се прикључак, на који се помоћу спојнице (слика 60) везује гипко црево.

Спојнице су неповратне што значи да вода може тећи само у једном смеру, а у себи садрже гунице које спречавају појаву цурења воде. Са једне стране спојнице су прикључене за довод воде (чесма), а са друге стране за одвод воде преко црева (слика 61).



Слика 61 Приказ спојнице

Доводни цевовод овог лабораторијског модела Пелтонове турбине је у виду гипког црева, а укупна дужина црева износи 20 m. Црево је подељено на три дела и то тако да два дела износе по 8 m, а трећи део износи 4 m. Ови делови су спојени преко звездасте спојнице (слика 62) и класичних спојница у једну целину, тако да једно место напајања водом, напаја обе млазнице, а самим тим и цело постројење.



Слика 62 Приказ звездасте спојнице

Кућиште турбине (слика 63) је израђено од плексигласа (клирит) и провидно је. Четвртастог је облика, димензија 25x10x30 cm, са четири рупе на четири различите стране. Две рупе су димензија ϕ 26 mm, друге две рупе износе ϕ 23 mm. Дно кућишта турбине је слободно тј. није затворено, у циљу одвођења воде из лабораторијског

модела МХЕ са Пелтоновом турбином. Такође, кућиште садржи 20 рупа, пречника ϕ 4 mm, које служе за њено причвршћивање са радним столом, помоћу шrafoва и матица.



Слика 63 Приказ кућишта турбине

Вратило турбине је израђено од челика, пречника ϕ 25 mm, а док је пречник рукавца ϕ 13 mm. Вратило је са обе стране обрешено, тако да се лежаји могу веома лако навући на вратило. Лежаји на себи садрже по два навоја, чијим завртањем се остварује чврсто налегање вратила и лежаја турбине. Са једне стране вратило је дуже у односу на другу страну, јер се на тој страни поставља ременик или точак (у овом случају) са којег се преноси обртни момент на генератор електричне енергије. Вратило на средини садржи плочицу (спољашњи пречник ϕ 48 mm, унутрашњи пречник ϕ 25 mm), која на себи садржи пет рупа. Ове рупе служе за причвршћивање вратила са радним колом, помоћу шrafoва и матица, као што је већ раније напоменуто. Плочица је заварена за вратило турбине, у циљу елиминације појаве проклизавања и ваносног осциловања при раду радног кола.

Лабораторијски модел МХЕ са Пелтоновом турбином садржи два куглична лежаја (слика 64), пречника ϕ 25 mm и ширине 34 mm. Кућиште лежаја садржи на себи отвор за подмазивање лежаја, као и две навртке, које служе за причвршћивање вратила

и лежаја. Кућиште лежаја садржи две рупе, које служе да кроз њих прође навој, у циљу његовог причвршћивања. Поред његовог причвршћивања, повећава се и стабилност целе конструкције.



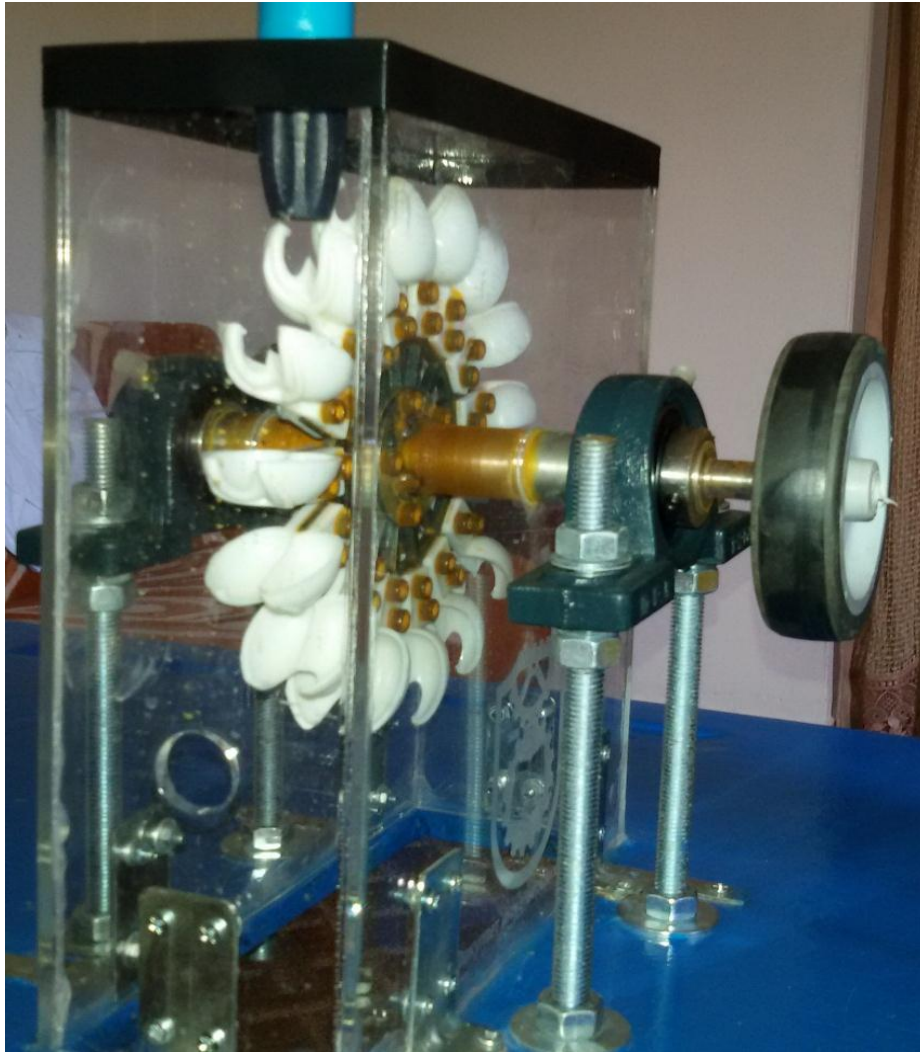
Слика 64 Приказ лежаја

Држачи за лежаје су у виду навојне шипке М12 (слика 65). Укупна дужина навојне шипке износи 1 m, а подељена је на четири једнака дела дужине 250 mm.



Слика 65 Приказ навојне шипке

Постављају се тако да пролазе кроз рупе на кућишту лежаја, а причвршћују се помоћу матица и подлошки. Регулисањем положаја матица, лежаји се доводе у раван, чиме се омогућава неометано окретање вратила, а самим тим и радног кола. На слици 66 су приказани постављени лежаји на вратилу са радним колом.



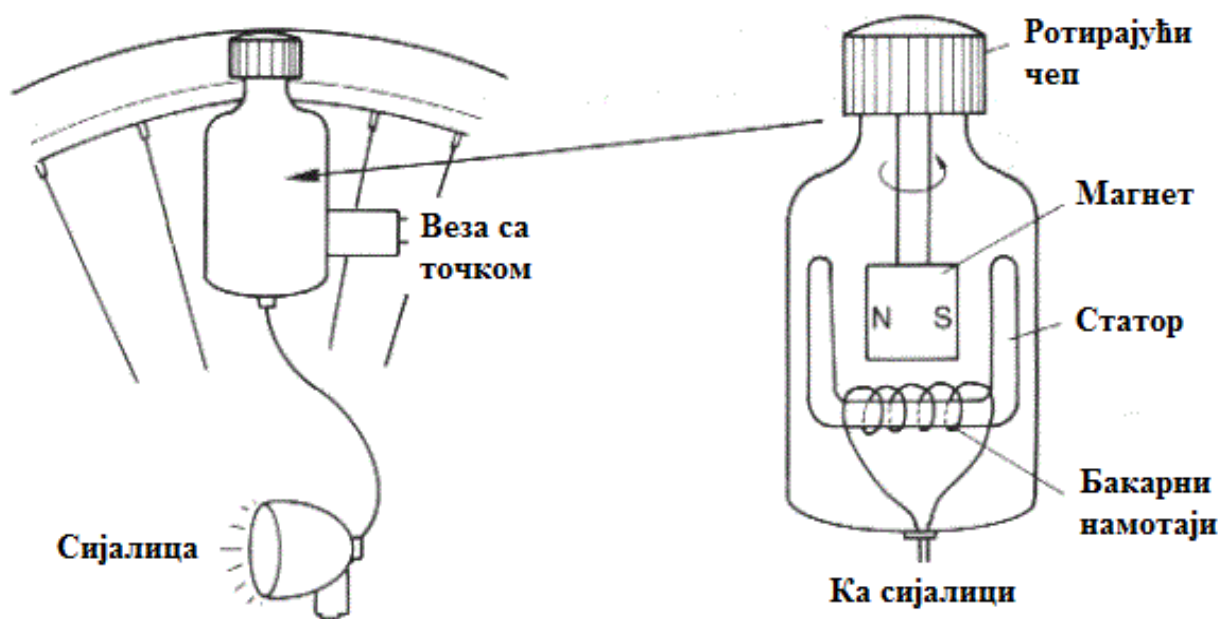
Слика 66 Приказ постављених лежаја на вратилу

Динама за бициклу (слика 67) у овом случају представља генератор електричне енергије. Она је генератор једносмерне струје која се састоји од статора, око којег су намотаји бакарне жице и сталног (перманентног) магнета који се ротира унутар динаме тј. у средини статора.



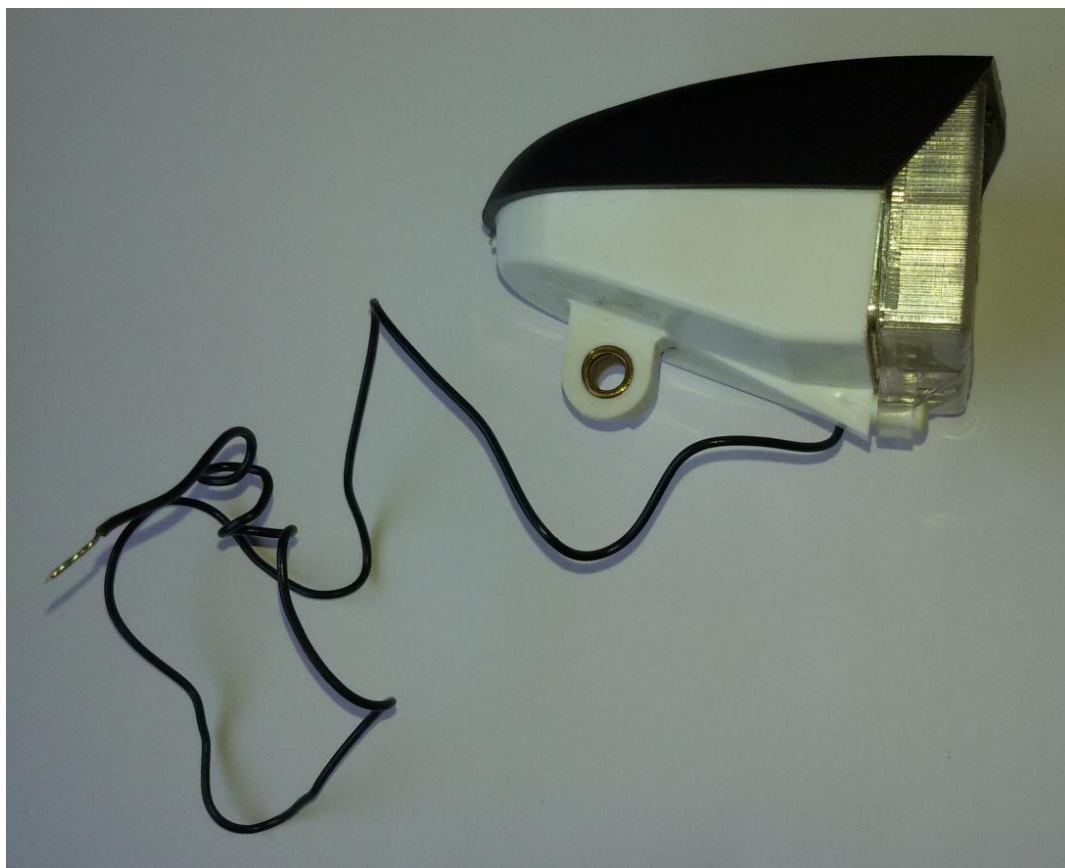
Слика 67 Приказ динаме за бициклу

Стални магнет је преко осовине повезан са изрезбареним ваљкастим поклопцем, који има улогу да пренесе обртни момент са ротирајућег елемента (точка) на стални магнет (слика 68). Ротацијом сталног магнета јавља се електромагнетна индукција тј. генерише се електрична енергија у бакарним намотајима на статору. Намотаји су на излазу динаме залемљени за металну плочицу, на коју се привезује сијалица.



Слика 68 Шематски приказ везивања динаме

Сијалица је са динамом повезана путем једножилног проводника (слика 69), тако да она представља позитивни потенцијал електричног кола. На динаму се такође налази и метална плочица која на себи има отвор, у циљу повезивања тог отвора са неким металом (у овом случају навојна шипка), који представља негативни потенцијал електричног кола. Повезивањем позитивног и негативног потенцијала, правилно се везује електрично коло. Примењена динама за бицикл генерише напон од 6 V и снагу од 3 W.



Слика 69 Приказ сијалице

Динама је постављена тако да додирује точак, који се налази на делу вратила са навојем (слика 70). Кроз држач динаме пролази навојна шипка, која на себи садржи матице и подлошке у циљу, причвршћивања конструкције са осталим деловима склопа. Такође, на врху навојне шипке се налази сијалица, која је повезана са динамом. Точак, који је постављен на вратило, је облепљен траком за изолацију (изолир трака), у циљу повећавања трења између додирне површине точка и динаме. Неопходно је напоменути, да се ова сијалица користи за бицикле и да је њен напон 6 V, а снага 3 W.



Слика 70 Приказ везе динаме и сијалице

Конструкција лабораторијског модела МХЕ са Пелтоновом турбином је постављена на радном столу, димензија 50x130x75 cm. Радни сто (слика 71) је претежно израђен од метала, док је радна површина дрвена. Део радне површине је изрезан у облику правоугаоника. Димензије изрезаног правоугаоника одговарају слободној страни кућишта турбине, јер је кућиште постављено на радни сто. Улога овог изрезаног дела стола је да вода изађе из кућишта турбине.



Слика 71 Приказ радног стола

13 Закључак

Због све већих потреба за енергијом, ситуација у којој се тренутно налази планета Земља, као и климатске промене које утичу на глобално загревање, натерале су нас да на што бржи начин поправимо свој однос према природи.

Конвенционални начин производње електричне енергије има негативне последице на животну средину у виду емисије гасова стаклене баште (угљен диоксид, метан, азот субоксид, хлорофлуороугљоводоници), тако да коришћење обновљивих извора енергије представља једини прихватљив избор. Један од начина добијања електричне енергије коришћењем обновљивих извора, представљају мале хидроелектране.

У овом мастер раду пројектована је мала хидроелектрана са Пелтоновом турбином на реци Бјелици, са протоком $0,47 \text{ m}^3/\text{s}$ и расположивим бруто падом водотока $61,5 \text{ m}$. На основу наведених параметара, добијена је вредност излазне снаге $244,7 \text{ kW}$. Израдом техно-економске анализе дошло се до закључка да потребна инвестиција за изградњу једног оваквог постројења износи 731.645 € , док годишњи приход од продаје електричне енергије износи 129.867 € . У складу са тим повраћај инвестиционих улагања је $5,6$ година. На основу периода повраћаја инвестиционих улагања, дошло се до закључка да је изградња оваквих енергетских постројења финансијски исплатљиво.

У оквиру овог мастер рада израђен је и лабораторијски модел мале хидроелектране са Пелтоновом турбином на коме се могу вршити разна испитивања. Тиме је омогућена значајнија и боља едукација студената основних и мастер студија техничних факултета, као и ученика средњих и основних школа, у циљу њиховог детаљнијег упознавања и усавршавања у области хидроенергије. Такође, применом наведеног лабораторијског модела, на основу теорије сличности, могућа је израда МХЕ са Пелтоновом турбином различитих параметара.

14 Литература

- [1] <http://mudremisli.net/nikola-tesla-citati-izreke-misli/> , (05.12.2014)
- [2] С. Зрнић, Ж. Ђулум: Грејање и климатизација са применом соларне енергије, Научна књига, Београд, 1988.
- [3] <http://www.rgf.bg.ac.rs/predmet/RO/V%20semestar/Energetika%20i%20odrzivi%20razvoj/Predavanja/Predavanje5.pdf> , (05.12.2014.)
- [4] http://www.izvorienergije.com/obnovljivi_izvori_energije.html , (10.12.2014.)
- [5] <http://www.eps.rs/test/malei.pdf> , (10.12.2014.)
- [6] <http://www.esco.rs/hidroenergija.html> , (16.12.2014.)
- [7] http://gis.srbijavode.rs/mhe/map_full.jsf?width=1777&height=813 , (16.12.2014.)
- [8] Д. Рајковић, Н. Кукољ: Производња и претворба енергије, Рударско-технолошко-нафтни факултет, Загреб, 2011.
- [9] П. Шулентић, Д. Корницер: Мале хидроелектране, Грађевинска књига, Београд, 1949.
- [10] М. Ј. Бабић, С. Стојковић: Турбомашине, теорија и математичко моделирање, Просвета, Београд, 1997.
- [11] Г. Душан: Обновљиви извори енергије 2 – мале хидроелектране, скрипта, Машински факултет Крагујевац, Крагујевац, 2010.
- [12] <http://www.sustainable-energybih.org/wp-content/uploads/2012/12/Pump-storage-BiH.png> , (22.12.2014.)
- [13] <http://www.rasrem.rs/doc/hidroelektrane.pdf> , (22.12.2014.)
- [14] <http://www.srbijavode.rs/> , (22.12.2014.)
- [15] <https://sites.google.com/site/branislavsarcevic/zapadna-morava> , (04.01.2015.)
- [16] http://en.academic.ru/pictures/enwiki/83/Serbia_West_Morava_basin.png, (04.01.2015.)
- [17] Мала енциклопедија Просвета, Треће издање, Београд: „Просвета” 1985.
- [18] Ј. Ђ. Марковић: Енциклопедијски географски лексикон Југославије Сарајево, „Свјетлост” 1990.
- [19] Б. Ђорђевић: Коришћење водних снага, Основе хидроенергетског коришћења вода. Београд, 1981
- [20] Suraj Yadav: Some Aspects of Performance Improvement of Pelton Wheel Turbine with Reengineered Blade and Auxiliary Attachments. International Journal of scientific & Engineering Research Volume 2, Issue 9, September-2011 1 ISSN 2229-5518.
- [21] Д. Хорват: Водне турбине, књига 1. Загреб, 1955.
- [22] <http://www.zeco.it/zeco-turbines/pelton-turbine/> , (10.02.2015.)
- [23] Ј. Перић. Хидраулични мотори и постројења. Знање, Београд, 1952.

- [24] http://www.interactengineering.com/product_details.asp?pid=455 , (10.02.2015.)
- [25] Д. Дивац, С. Прокић, Д. Даниловић: Обнављање мале хидроелектране „Студеница”, Главни пројекат, Институт за водопривреду „Јарослав Черни”, Завод за бране, хидроенергетику, руднике и саобраћајнице, Београд, 2007.
- [26] <http://www.trgometal.rs/Trgometal-katalog.pdf> , (23.02.2015.)
- [27] http://www.kombeg.org.rs/Slike/CeTranIRazvojTehnologija/2009Decembar/Uredba_o_merama_podsticaja_za_proizvodnju_el_energije_koriscenjem_OIE.pdf , (23.02.2015.)
- [28] <https://sr.wikipedia.org/sr/%D0%A0%D0%B5%D0%BA%D0%B0> , (10.05.2015.)
- [29] <http://www.openchannelflow.com/images/blog/timed-gravimetric.gif> , (10.05.2015.)
- [30] <http://www.fao.org/docrep/010/ah810e/AH810E203.gif> , (10.05.2015.)
- [31] <http://3.imimg.com/data3/HO/VK/MY-664027/water-current-meter-cup-type-standard.jpg> , (10.05.2015.)
- [32] [http://gradst.unist.hr/Portals/9/docs/katedre/Hidrologija/HIDROMETRIJA%20NASTAVA%20\(1.%20dio\).pdf](http://gradst.unist.hr/Portals/9/docs/katedre/Hidrologija/HIDROMETRIJA%20NASTAVA%20(1.%20dio).pdf) , (10.05.2015.)
- [33] http://www.valeport.co.uk/Portals/0/Images/Valeport_801_current-meter.jpg. (10.05.2015.)
- [34] http://www.valeport.co.uk/Portals/0/Images/Valeport_801_current-meter.jpg. (10.05.2015.)
- [35] https://riverrestoration.wikispaces.com/file/view/St_Francis_Hydrograph_2006.jpg/326249140/558x376/St_Francis_Hydrograph_2006.jpg , (10.05.2015.)
- [36] <https://kalyan07.files.wordpress.com/2014/04/c2.jpg> , (10.05.2015.)
- [37] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/Water_Turbine_Chart.png. (10.05.2015.)

Прилог 1

Димензионисање Пелтонове турбине

$$H_b = 61.5$$

H_b – расположиви бруто пад водотока [m]

$$Q_t = 0.47$$

Q_t – проток воде кроз турбину [m^3/s]

$$H_g = 0.06 \cdot H_b = 3.69$$

H_g – укупни хидраулични губици при проласку кроз отпадну решетку, захват, доводни цевовод и капију или вентил [m]

$$H_n = H_b - H_g = 57.81$$

H_n – расположиви нето пад одабраног водотока [m]

$$\rho_w = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

ρ – густина воде [kg/m^3]

$$g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

g – убрзање силе земљине теже [m/s^2]

$$c_n = 0.98$$

c_n – коефицијент отпора при протицању воде кроз млазницу (≈ 0.98) [/]

$$P_{ti} = 2.56 \times 10^5$$

P_{ti} – улазна снага турбине [W]

$$Q_m = 0.235$$

Q_m – проток воде кроз млазницу [m^3/s]

$$n_j = \frac{Q_t}{Q_m} = 2$$

n_j – оптимални број млазница турбине [/]

$$N_s = 85.49 \cdot \frac{\sqrt{n_j}}{H_n^{0.243}} = 45.109$$

N_s – специфична брзина радног кола турбине [°]

$$N = N_s \cdot \frac{H_n^{5/4}}{\sqrt{\frac{P_{ti}}{1000}}} = 449.424 = 450$$

N – број обртаја радног кола турбине [min^{-1}]

$$c_j = c_n \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n} = 33.005$$

c_j – брзина воде по изласку из млазнице [m/s]

$$D_r = 38.6 \cdot \frac{\sqrt{H_n}}{N} = 0.653$$

D_r – пречник радног кола турбине [m]

$$c_{tr} = \frac{\pi \cdot N \cdot D_r}{60} = 15.367$$

c_{tr} – тангенцијална брзина радног кола [m/s]

$$D_j = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_m}{\pi \cdot c_j \cdot n_j}} = 0.067$$

D_j – пречник млазнице [m]

$$A_j = \pi \cdot \frac{D_j^2}{4} = 3.56 \times 10^{-3}$$

A_j – површина попречног пресека млазнице [m^2]

$$B_j = 3.2 \cdot D_j = 0.215$$

B_j – ширина лопатице [m]

$$\gamma = 20^\circ$$

γ – угао нагиба цевовода [°]

$$L_{pt} = \frac{H_n}{\sin \gamma} = 169.025$$

L_{pt} – дужина цевовода између усиса и турбине [m]

$$n_p = 0.012$$

n_p – Манингов коефицијент за челичне глатке цеви [/]

$$D_{pt} = 2.69 \cdot \left(\frac{n_p^2 \cdot Q_t^2 \cdot L_{pt}}{H_b} \right)^{0.1875} = 0.446$$

D_{pt} – пречник доводне цеви [m]

$$t_p = \left(\frac{D_{pt} + 508}{400} + 1.2 \right) \cdot 10^{-3} = 2.471 \times 10^{-3}$$

t_p – оптимална дебљина зида доводног цевовода [m]

$$A_p = D_{pt}^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 0.171$$

A_p – површина попречног пресека доводног цевовода [m²]

$$\Delta c = \frac{Q_t}{n_j \cdot A_p} = 1.375$$

Δc – промена брзине у доводном цевоводу [m/s]

$$K_{wm} = 2.1 \times 10^9$$

K_{wm} – Булов модул за воду [Nm⁻²]

$$M_p = 200 \times 10^9$$

M_p – модул еластичности материјала цевовода [Nm⁻²]

$$c_w = \sqrt{\frac{1}{\rho_w \cdot \left(\frac{1}{K_{wm}} + \frac{D_{pt}}{M_p \cdot t_p} \right)}} = 839.186$$

c_w – брзина простирања ударног таласа [m/s]

$$H_s = c_w \cdot \frac{\Delta C}{g} = 117.639$$

H_s – ударни притисак [m]

$$D_{pn} = \frac{D_{pt}}{\sqrt{n_j}} = 0.33$$

D_{pn} – пречник доводне цеви ка млазници [m]

$$\beta = 60^\circ$$

β – конусни угао млазнице [°]

$$L_n = \frac{D_{pn} - D_j}{\tan \beta} = 0.152$$

L_n – дужина млазнице [m]

$$D_t = 0.003$$

D_t – дебљина дефлектора [m]

$$\chi_{nr} = 0.05 \cdot D_r + D_t = 0.036$$

χ_{nr} – минимално растојање између млазнице и радног кола [m]

$$\chi_{nb} = 0.625 \cdot D_r = 0.408$$

χ_{nb} – растојање између млазнице и лопатице радног кола турбине узимајући у обзир минимални зазор између њих [m]

$$B_t = 3 \cdot D_j = 0.202$$

B_t – дужина лопатице [m]

$$B_d = 1.2 \cdot D_j = 0.081$$

B_d – дубина лопатице [m]

$$n_b = 20$$

n_b – број лопатица радног кола [/]

$$l_{ab} = 0.195 \cdot D_r = 0.127$$

l_{ab} – дужина руке лопатице [m]

$$R_{br} = 0.47 \cdot D_r = 0.307$$

R_{br} – радијус кружнице која пролази кроз центар маса лопатица [m]

$$V_b = 0.0063 \cdot D_r^3 = 1.754 \times 10^{-3}$$

V_b – запремина лопатица [m³]

$$\rho_m = 7850$$

ρ_m – густина материјала лопатице (специфична густина челика) [kg/m³]

$$M_b = \rho_m \cdot V_b = 13.772$$

M_b – маса лопатице [kg]

$$F_d = \rho_w \cdot Q_m \cdot c_j = 7.756 \times 10^3$$

F_d – сила која делује на сваки дефлектор засебно [N]

$$S_f = 2.6$$

S_f – сигурносни фактор за спречавање хидрауличног удара [/]

$$F_{dr} = F_d \cdot S_f = 2.017 \times 10^4$$

F_{dr} – сила за активацију дефлектора [N]

$$R_d = 0.35$$

R_d – радијус дефлектора [m]

$$F_c = 1.2$$

F_c – фактор трења услед лежаја ($\approx 1,2$) [/]

$$T_{dr} = F_{dr} \cdot F_c \cdot R_d = 8.47 \times 10^3$$

T_{dr} – момент силе која делује на дефлекторску руку [Nm]

$$\psi = 0.98$$

ψ – коефицијент храпавости површине лопатице ($\approx 0,98$) [/]

$$\theta = 160^\circ$$

θ – угао између млаза и лопатице [°]

$$\phi = 180^\circ - \theta = 20^\circ$$

ϕ – одбојни угао [°]

$$P_{to} = \rho_w \cdot Q_t \cdot c_{tr} \cdot (c_j - c_{tr}) \cdot (1 + \psi \cdot \cos \phi) = 2.447 \times 10^5$$

P_{to} – излазна снага турбине [W]

$$\eta_{th} = \frac{P_{to}}{P_{ti}} = 0.956$$

η_{th} – хидраулична ефикасност турбине [/]

$$x = \frac{c_{tr}}{c_j} = 0.466$$

x – однос тангенцијалне брзине радног кола и брзине воде по изласку из млазнице [/]

$$\eta_{thm} = \frac{1 + \psi \cos \phi}{2} = 0.96$$

η_{thm} – максимална вредност хидрауличног степена корисности [/]

$$\eta_{tm} = 0.95$$

η_{tm} – механичка ефикасност (ако је генератор директно постављен на вратило $\eta_{tm}=1$) [/]

$$\rho_a = 1.23$$

ρ_a – густина ваздуха ($\approx 1,23$) [kg/m³]

$$K_d = 1$$

K_d – коефицијент отпора ваздуха [/]

$$\eta_{tw} = 1 - \frac{K_d \cdot \rho_a \cdot A_p \cdot x^3}{\rho_w \cdot A_j} = 0.994$$

η_{tw} – аероефикасност турбине [/]

$$\eta_t = \eta_{thm} \cdot \eta_{tw} \cdot \eta_{tm} = 0.903$$

η_t – ефикасност турбине [/]

$$\omega = \frac{\pi \cdot N \cdot D_r}{60 \cdot \frac{D_r}{2}} = 47.064$$

ω – угаона брзина радног кола [rad/s]

$$T_t = \frac{P_{to}}{\omega} = 5.199 \times 10^3$$

T_t – момент турбине [Nm]

Прорачун вратила

$$P_t = 2.447 \times 10^5$$

P_t – излазна снага турбине [W]

$$n_t = 450$$

n_t – број обртаја вратила [min^{-1}]

$$\eta_s = 0.9$$

η_s – ефикасност спојнице [/]

$$P_1 = P_t \cdot \eta_s = 2.202 \times 10^5$$

P_1 – излазна снага на спојници [W]

$$\omega = \frac{\pi \cdot n_t}{30} = 47.124$$

ω – угаона брзина вратила [rad/s]

$$T_t = \frac{P_t}{\omega} = 5.193 \times 10^6$$

T_t – момент увијања вратила [Nmm]

$$m_t = 500$$

m_t – маса радног кола [kg]

$$g = 9.81$$

g – убрзање силе земљине теже [m/s^2]

$$F_t = m_t \cdot g = 4.905 \cdot 10^3$$

F_t – оптерећење којим радно коло делује на вратило [N]

$$l_1 = 500$$

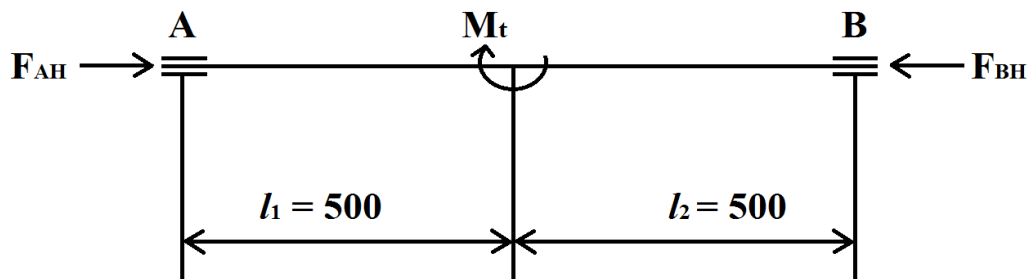
l_1 – растојање између лежаја A и радног кола [mm]

$$l_2 = 500$$

l_2 – растојање између лежаја В и радног кола [mm]

$$M_t = F_t \cdot l_1 = 2.453 \cdot 10^6$$

M_t – момент силе F_t [Nm]



Шема оптерећења вратила у хоризонталној равни ($H-H$)

За тачку А $H-H$

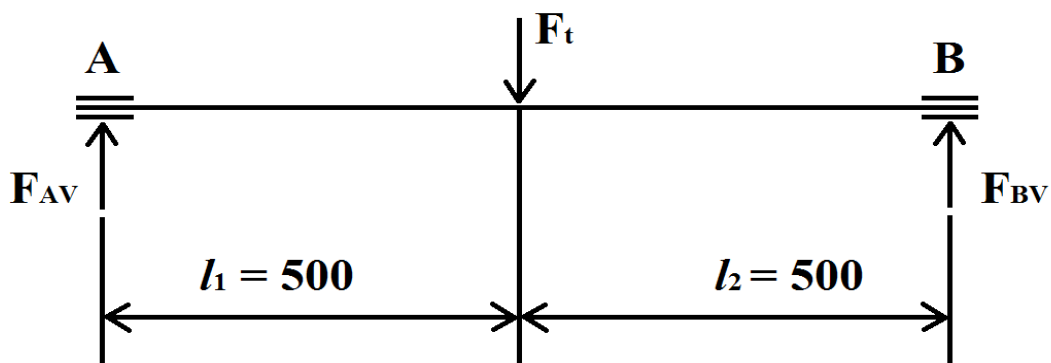
$$F_{BH} = \frac{M_t}{1000} = 2.453 \times 10^3$$

F_{BH} – отпор ослонца тачке В у хоризонталној равни [N]

За тачку В $H-H$

$$F_{AH} = \frac{M_t}{1000} = 2.453 \times 10^3$$

F_{AH} – отпор ослонца тачке А у хоризонталној равни [N]



Шема оптерећења вратила у вертикалној равни ($V-V$)

За тачку А V – V

$$F_{BV} = \frac{F_t \cdot 500}{1000} = 2.453 \times 10^3$$

F_{BV} – отпор ослонца тачке В у вертикалној равни [N]

За тачку В V – V

$$F_{AV} = \frac{F_t \cdot 500}{1000} = 2.453 \times 10^3$$

F_{AV} – отпор ослонца тачке А у вертикалној равни [N]

$$F_A = \sqrt{F_{AH}^2 + F_{AV}^2} = 3.468 \times 10^3$$

F_A – резултујући отпор ослонца тачке А [N]

$$F_B = \sqrt{F_{BH}^2 + F_{BV}^2} = 3.468 \times 10^3$$

F_B – резултујући отпор ослонца тачке А [N]

$$M_{CHL} = F_{AH} \cdot 500 = 1.226 \times 10^6$$

M_{CHL} – момент савијања тачке С у хоризонталној равни (лево) [Nmm]

$$M_{CHD} = F_{BH} \cdot 500 = 1.226 \times 10^6$$

M_{CHD} – момент савијања тачке С у хоризонталној равни (десно) [Nmm]

$$M_{CVL} = F_{AV} \cdot 500 = 1.226 \times 10^6$$

M_{CVL} – момент савијања тачке С у вертикалној равни (лево) [Nmm]

$$M_{CVD} = F_{BV} \cdot 500 = 1.226 \times 10^6$$

M_{CVD} – момент савијања тачке С у вертикалној равни (десно) [Nmm]

$$M_{CL} = \sqrt{(M_{CHL}^2 + M_{CVL}^2)} = 1.734 \times 10^6$$

M_{CL} – резултујући момент савијања тачке С (лево) [Nmm]

$$M_{CD} = \sqrt{(M_{CHD}^2 + M_{CVD}^2)} = 1.734 \times 10^6$$

M_{CD} – резултујући момент савијања тачке С (десно) [Nmm]

За челик Č1530 усвајамо:

$$\sigma_D = 320$$

σ_D – савојна динамичка издржљивост [МПа]

$$\tau_D = 270$$

τ_D – увојна динамичка издржљивост [МПа]

$$R_m = (630 \div 780)$$

R_m – затезна чврстоћа [МПа]

$$s = 2$$

s – степен сигурности вратила (2 – 3) [/]

$$k = 3.2$$

k – фактор [/]

$$\sigma_{doz} = \frac{\sigma_D}{k \cdot s} = 50$$

σ_{doz} – дозвољен напон на савијање [МПа]

$$K_A = 1.1$$

K_A – фактор радних услова [/]

$$M_i = \sqrt{M_{CVD}^2 + \left(\frac{\sigma_D}{\tau_D} \cdot \frac{K_A \cdot T_{tt}}{2} \right)^2} = 3.6 \times 10^6$$

M_i – еквивалентни момент [Nmm]

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_i}{\pi \cdot \sigma_{doz}}} = 90.181 \Rightarrow 95$$

d – пречник вратила [mm]

Провера пречника вратила

$$t = 0.2$$

t – дубина жлеба клина [mm]

$$d_{vr} = d - t = 94.8$$

d_{vr} – кориговани пречник вратила [mm]

$$W_{rac} = \frac{d_{vr}^3 \cdot \pi}{32} = 8.364 \times 10^4$$

W_{rac} – отпорни момент пресека [mm³]

$$\sigma_i = \frac{M_i}{W_{rac}} = 43.042$$

σ_i – напон на савијање [MPa]

$$\sigma_{imax} = \sigma_i \cdot k = 137.735$$

σ_{imax} – максимални напон на савијање [MPa]

$$S_{vr} = \frac{\sigma_D}{\sigma_{imax}} = 2.323$$

S_{vr} – проверени степен сигурности вратила [/]

Проверени степен сигурности треба да буде већи од усвојене вредности степена сигурности ($S_{vr} > S$). У овом случају услов је задовољен.

Димензионисање лежаја

$$T_v = 5.199 \times 10^3$$

T_v – обртни момент вратила [Nm]

$$d_{vr} = 95$$

d_{vr} – пречник вратила [mm]

$$F_r = \frac{2 \cdot T_v}{d_{vr}} = 1.095 \times 10^4$$

F_r – радијална сила [N]

$$k_t = 1$$

k_t – фактор температуре [/]

$$\alpha = 3$$

α – експонент (за лежаје са куглицама $\alpha = 3$) [/]

$$L_h = 4000$$

L_h – предвиђени радни век [h]

$$n = 450$$

n – број обртаја вратила [min^{-1}]

$$c_{din} = \frac{F_r}{k_t} \cdot \sqrt[\alpha]{\frac{n \cdot L_h}{10^6}} = 5.212 \times 10^4$$

c_{din} – динамичка носивост [kN]

За вредност динамичке носивости c_{din} усваја се куглични лежај ознаке: **1219**

Димензионисање спојнице

$$d_{vr} = 95$$

d_{vr} – пречник вратила [mm]

$$d_u = d_{vr}$$

d_u – унутрашњи пречник спојнице [mm]

$$d_s = 1.7 \cdot d_u = 161.5$$

d_s – спољашњи пречник спојнице [mm]

$$T_v = 5.199 \times 10^3$$

T_v – обртни момент вратила [Nm]

$$k_A = 3.2$$

k_A – фактор радних услова [/]

$$\psi = \frac{d_u}{d_{st}} = 0.588$$

ψ – однос пречника [/]

$$W_p = \frac{\pi \cdot d_s^3 \cdot (1 - \psi^4)}{16} = 7.281 \times 10^5$$

W_p – отпорни момент пресека [mm³]

$$\tau = \frac{T_v \cdot k_A}{W_p} = 22.851$$

τ – напон на увијање [MPa]

$$S_s = 2.5$$

S_s – степен сигурности спојнице [/]

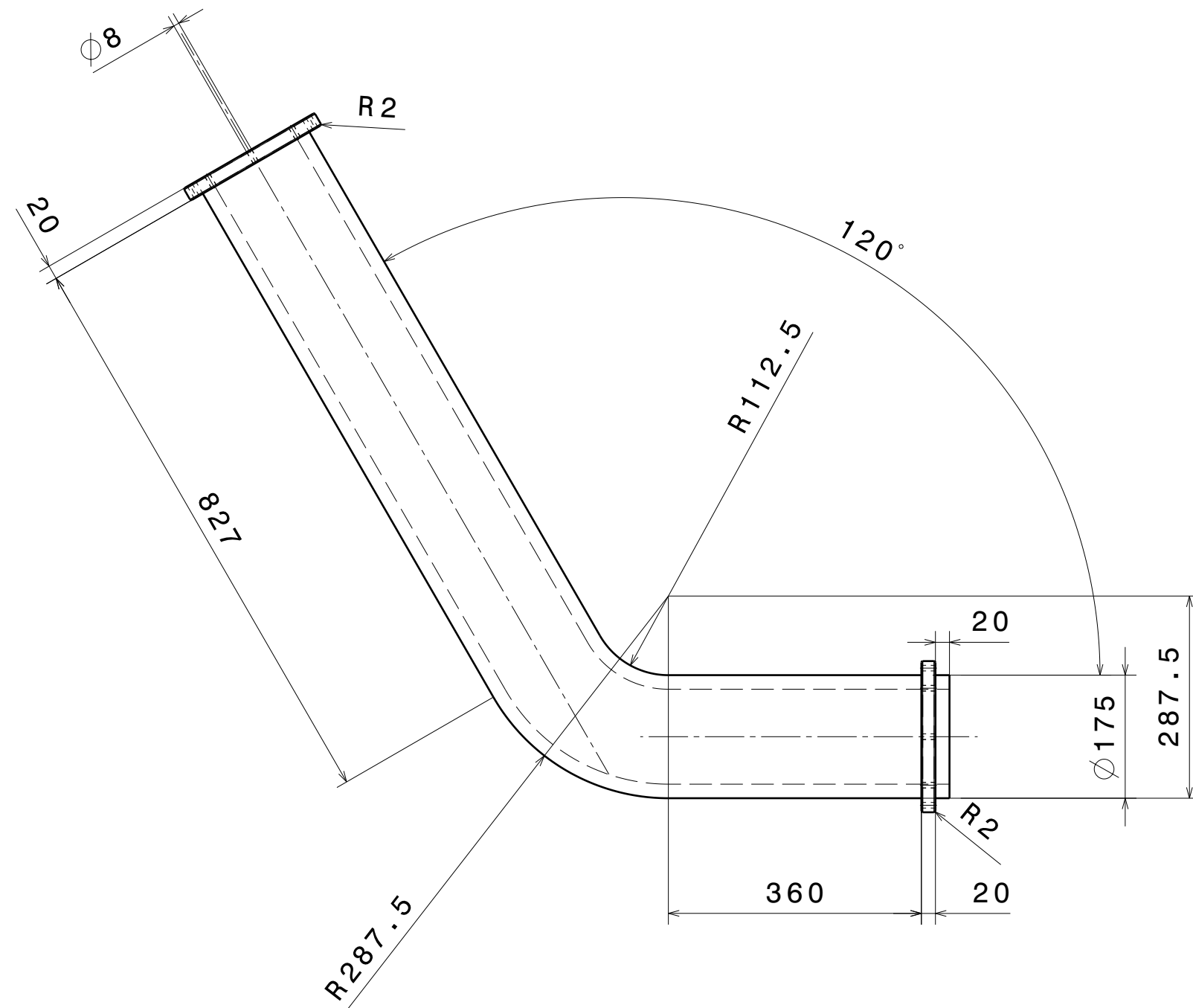
$$\tau_{din} = \tau \cdot S_s = 57.128$$

τ_{din} – динамичка издржљивост чауре (наглавка) [MPa]

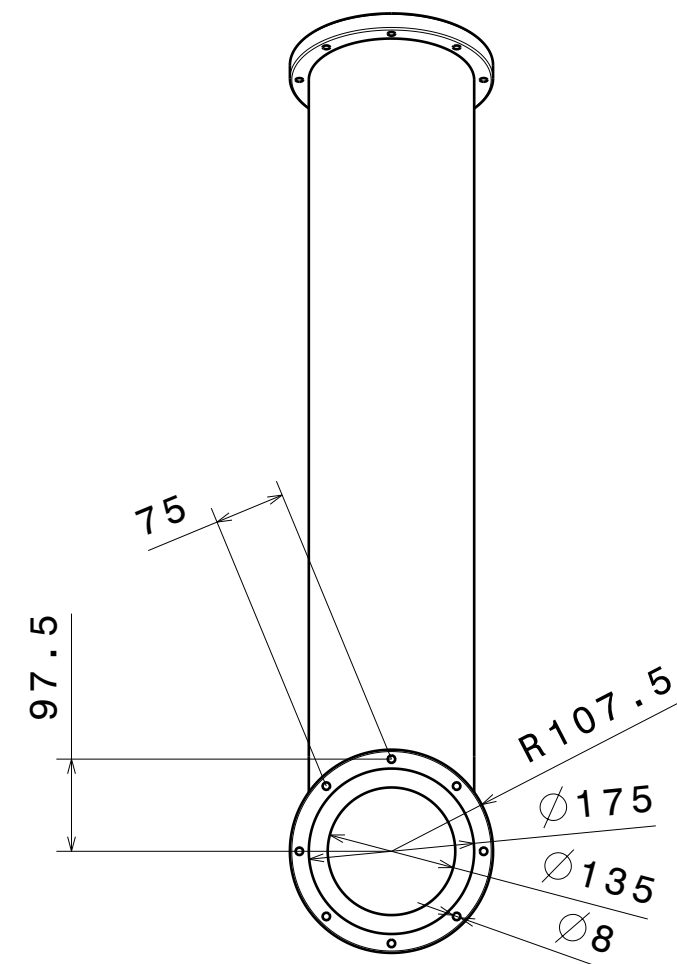
$$L_n = 3 \cdot d_u = 285$$

L_n – дужина наглавка [mm]

Прилог 2

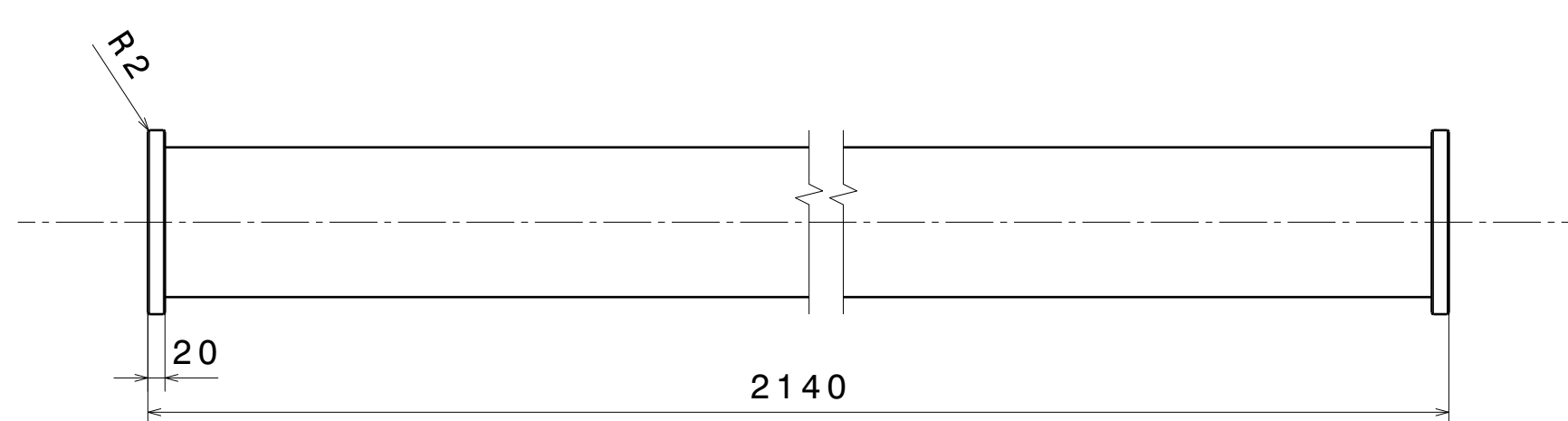


Pogled spreda
Razmera: 1:8

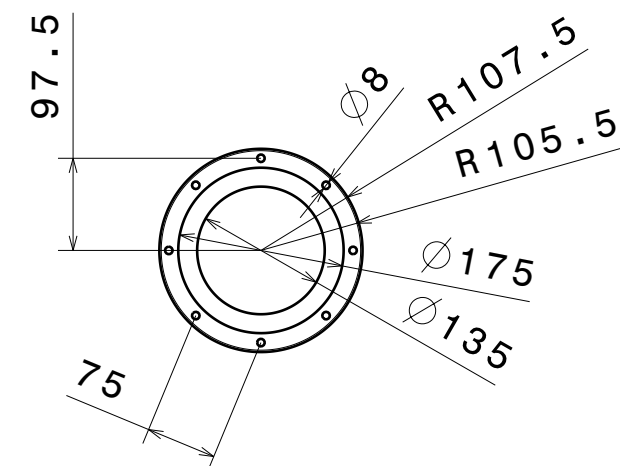


Pogled sa strane
Razmera: 1:8

Tolerancije slobodnih mera				Povrsinska hrapavost			Povrsinska zastita					
Materijal							Termicka obrada					
									Masa	Razmera		
				Datum			Naziv: Dovodni cevovod mlaznice 1					
				Obrad.								
				Stand.								
				Odobr.								
							Oznaka:			List:		
												L
St.i	Izmene	Datum	Ime							Izv.pod.		Zamena za:

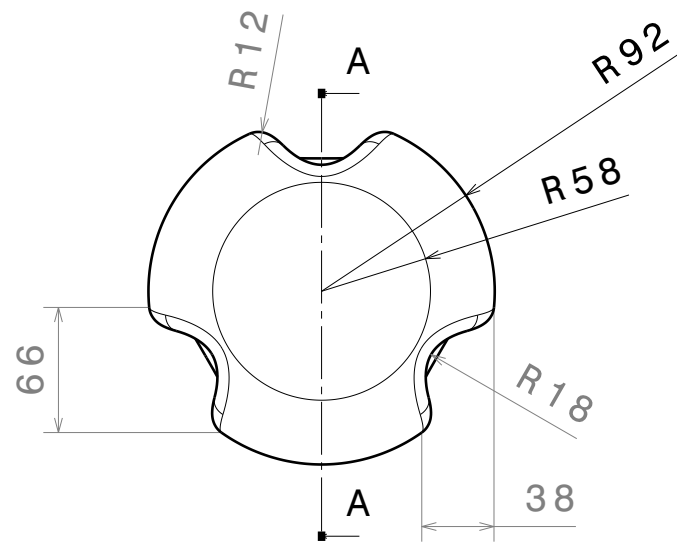


Pogled spreda
Razmera: 1:8

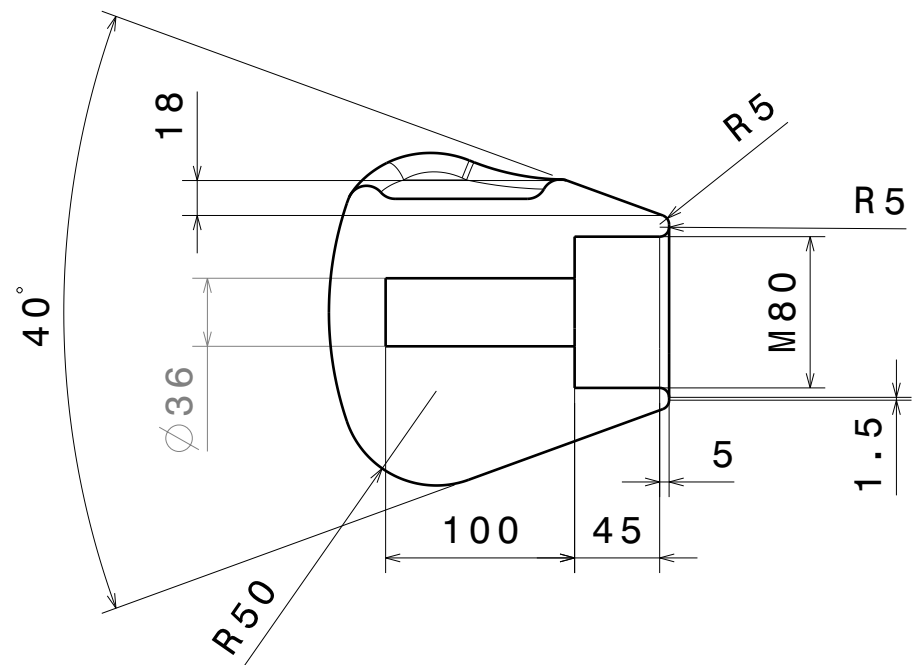


Pogled sa strane
Razmera: 1:8

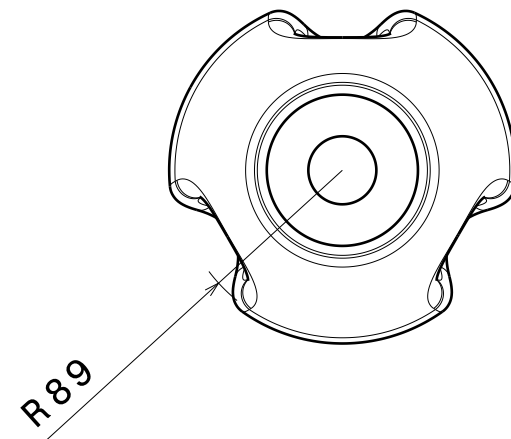
Tolerancije slobodnih mera				Povrsinska hrapavost			Povrsinska zastita					
Materijal							Termicka obrada					
									Masa	Razmera		
				Datum			Naziv: Dovodni cevovod mlaznice 2					
				Obrad.								
				Stand.								
				Odobr.								
							Oznaka:			List:		
										L		
St.i	Izmene	Datum	Ime				Izv.pod.		Zamena za:			



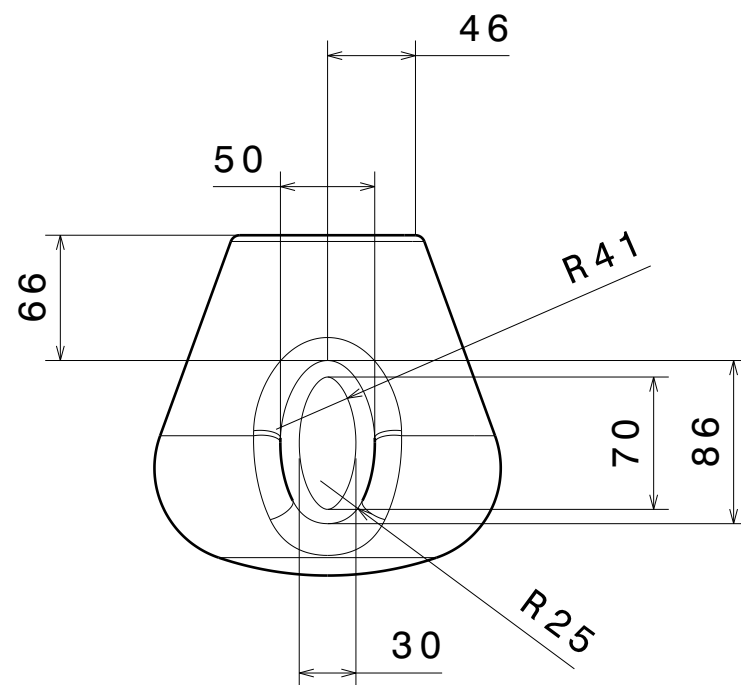
Pogled spreda
Razmera: 1:4



Presek A-A
Razmera: 1:4

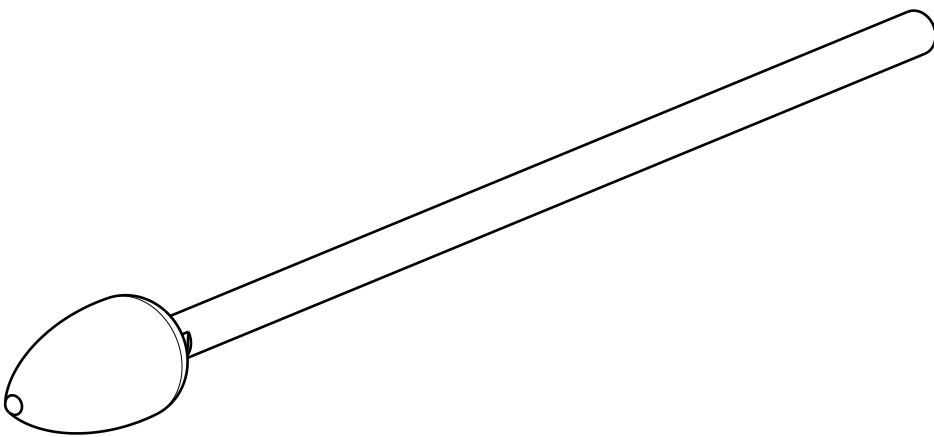
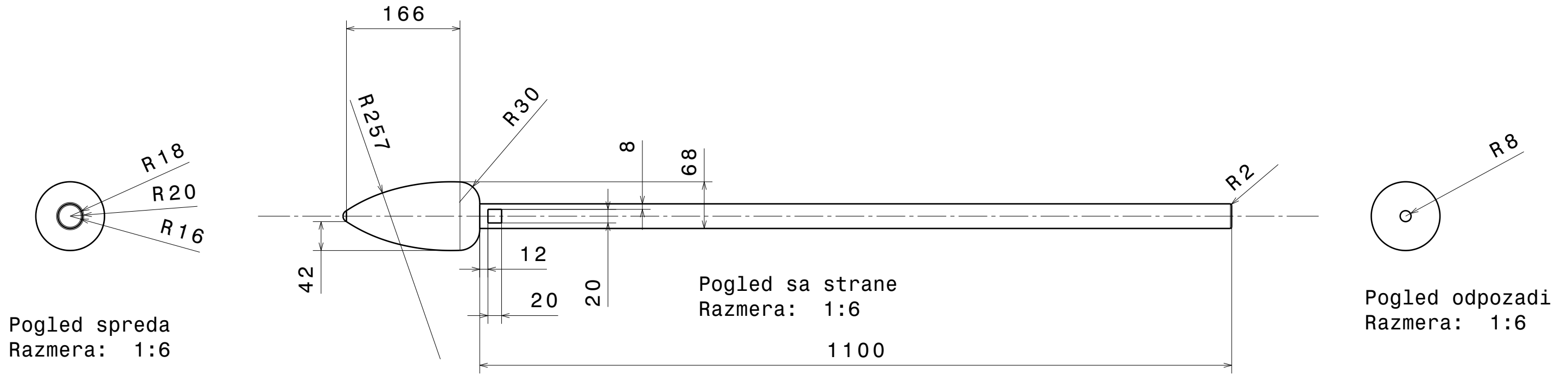


Pogled odpozadi
Razmera: 1:4



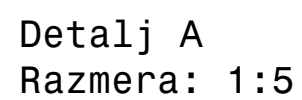
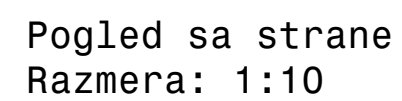
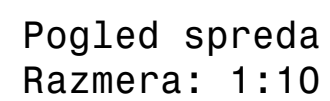
Pogled odozgo
Razmera: 1:4

Tolerancije slobodnih mera				Povrsinska hrapavost			Povrsinska zastita						
Materijal							Termicka obrada						
									Masa	Razmera			
				Datum			Naziv: Navojni cep						
				Obrad.									
				Stand.									
				Odobr.									
							Oznaka:			List:			
											L		
St.i	Izmene	Datum	Ime							Izv.pod.		Zamena za:	

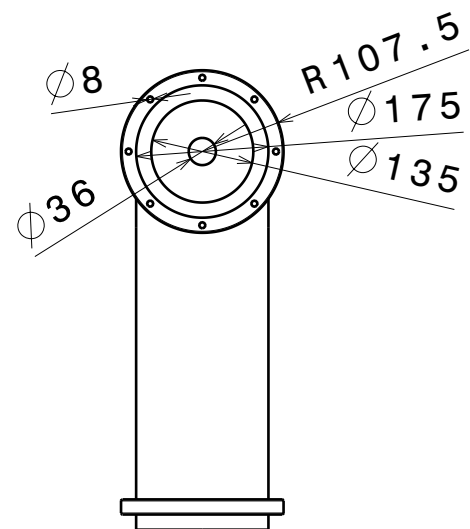


Izometrijski pogled
Razmera: 1:6

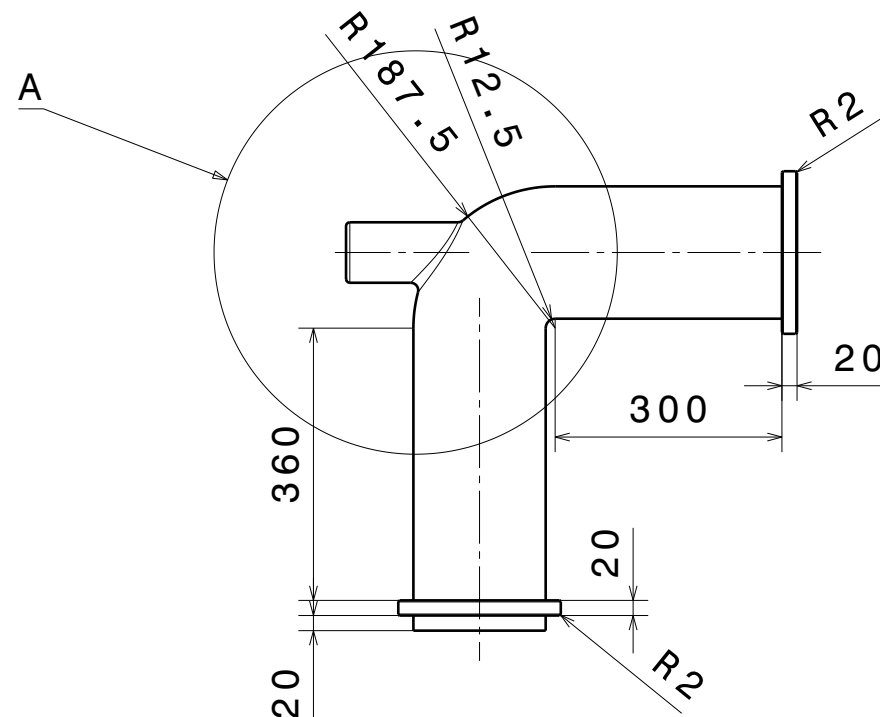
Tolerancije slobodnih mera				Povrsinska hrapavost			Povrsinska zastita					
Materijal							Termicka obrada					
									Masa	Razmera		
				Datum			Naziv: Koplje					
				Obrad.								
				Stand.								
				Odobr.								
							Oznaka:				List:	
												L
St.i	Izmene		Datum	Ime				Izv.pod.		Zamena za:		



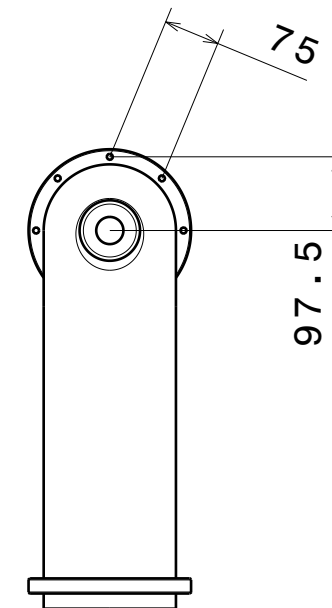
Tolerancije slobodnih mera				Povrsinska hrapavost				Povrsinska zastita						
Materijal								Termicka obrada						
										Masa	Razmera			
				Datum			Naziv: Krivina cevovoda mlaznice broj 1							
				Obrad.										
				Stand.										
				Odobr.										
								Oznaka:			List:			
								Izv.pod.			Zamena za:			L
St.i	Izmene	Datum	Ime											



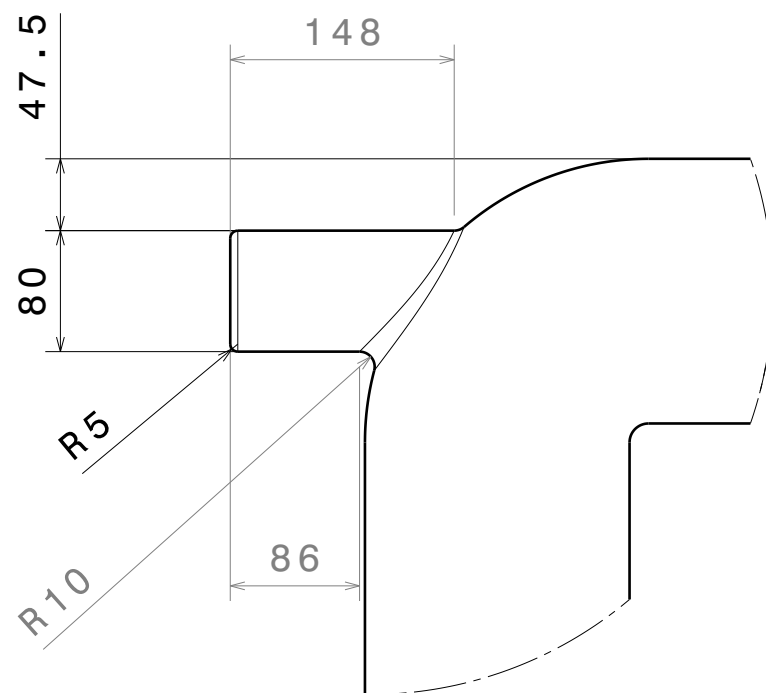
Pogled spreda
Razmera: 1:10



Pogled sa strane
Razmera: 1:10

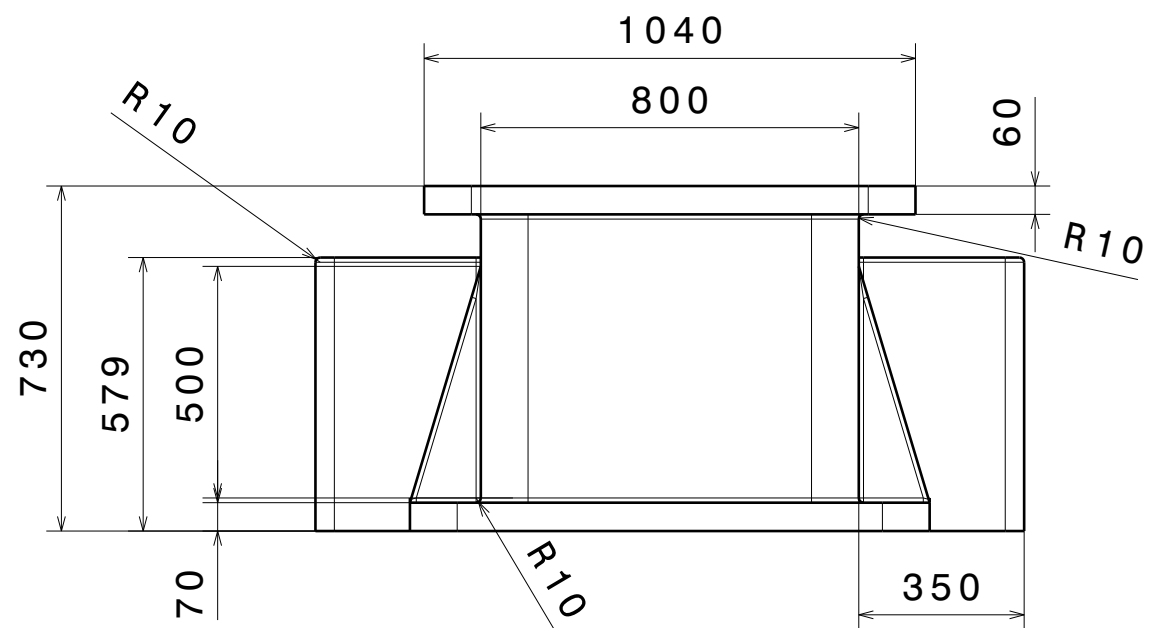


Pogled odpozadi
Razmera: 1:10

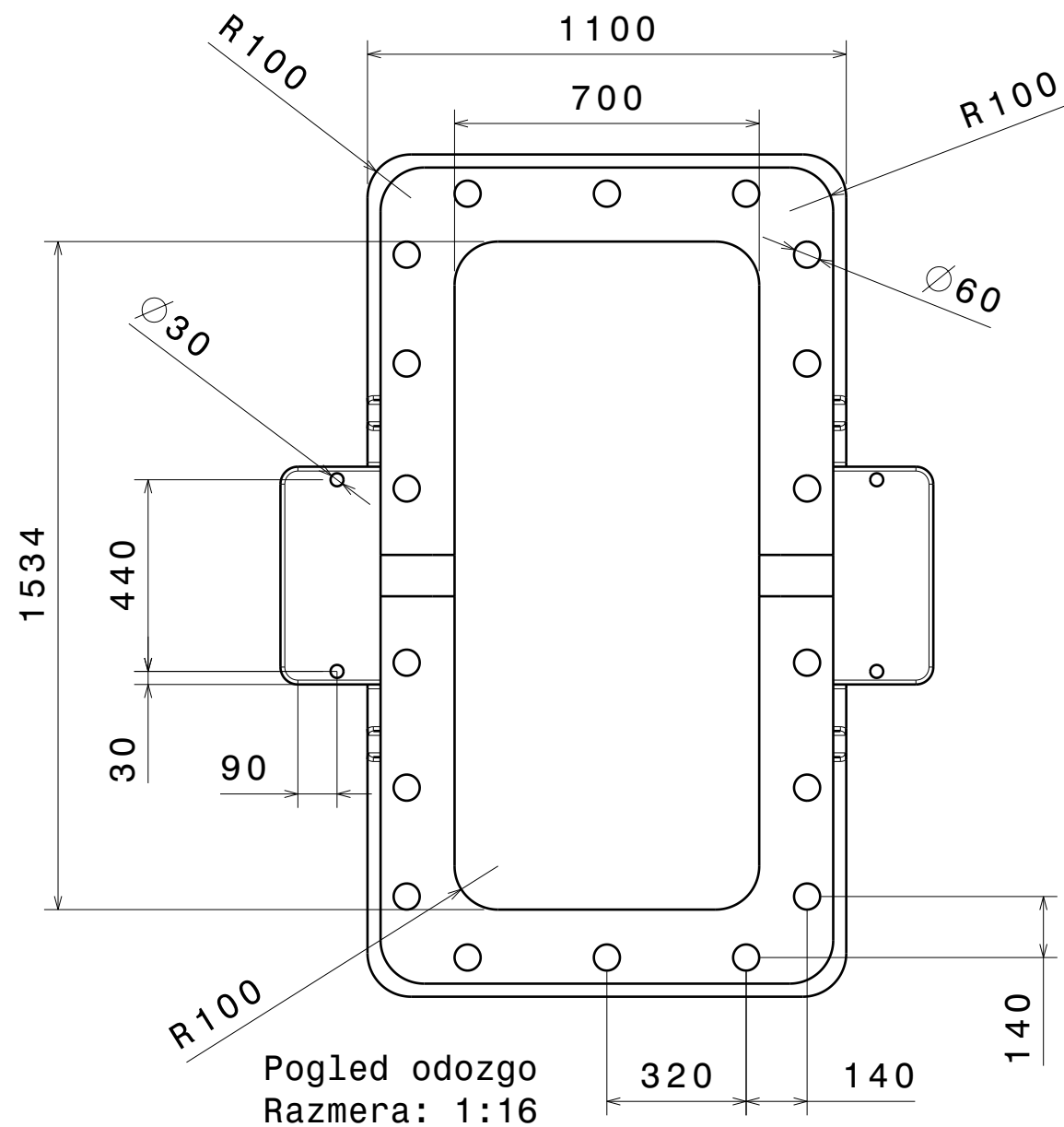


Detalj A
Razmera: 1:5

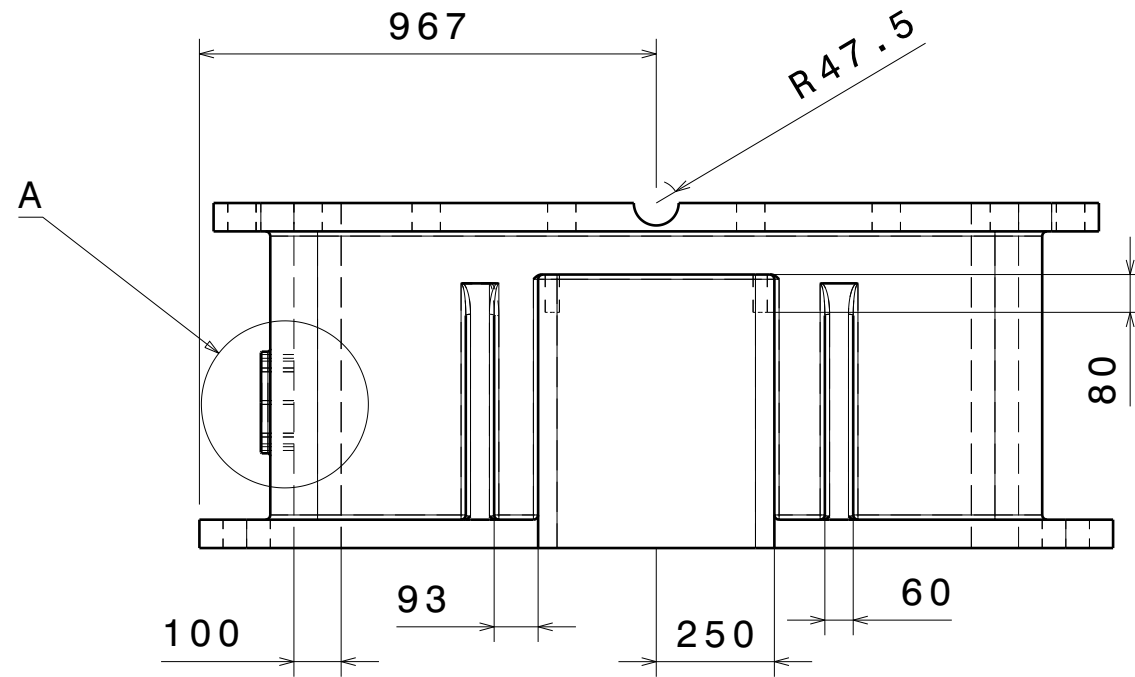
Tolerancije slobodnih mera				Povrsinska hrapavost			Povrsinska zastita			
Materijal							Termicka obrada			
									Masa	Razmera
				Datum			Naziv: Krivina cevovoda mlaznice broj 2			
				Obrad.						
				Stand.						
				Odobr.						
							Oznaka:		List:	
									L	
St.i	Izmene	Datum	Ime				Izv.pod.		Zamena za:	



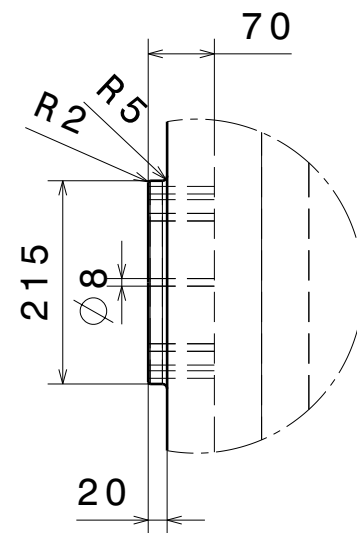
Pogled spreda
Razmera: 1:16



Pogled odozgo
Razmera: 1:16

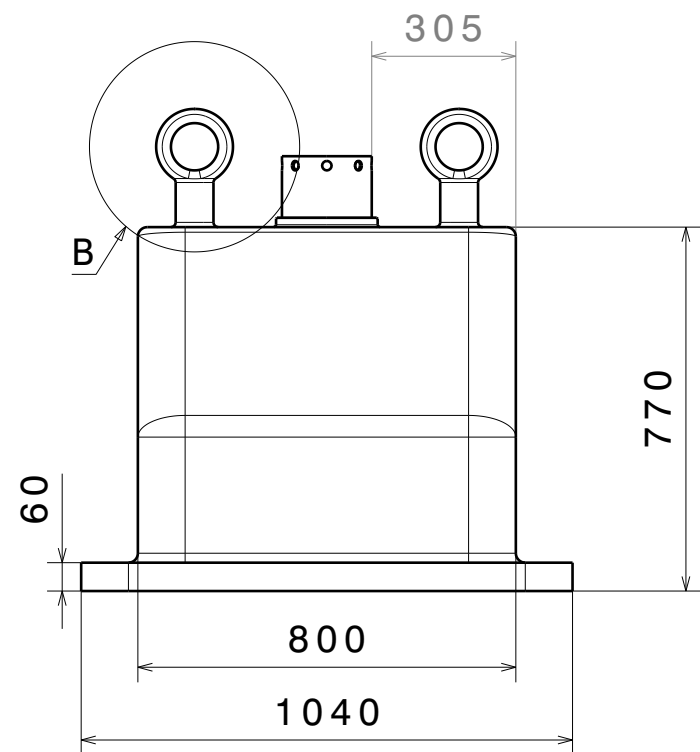


Pogled sa strane
Razmera: 1:16

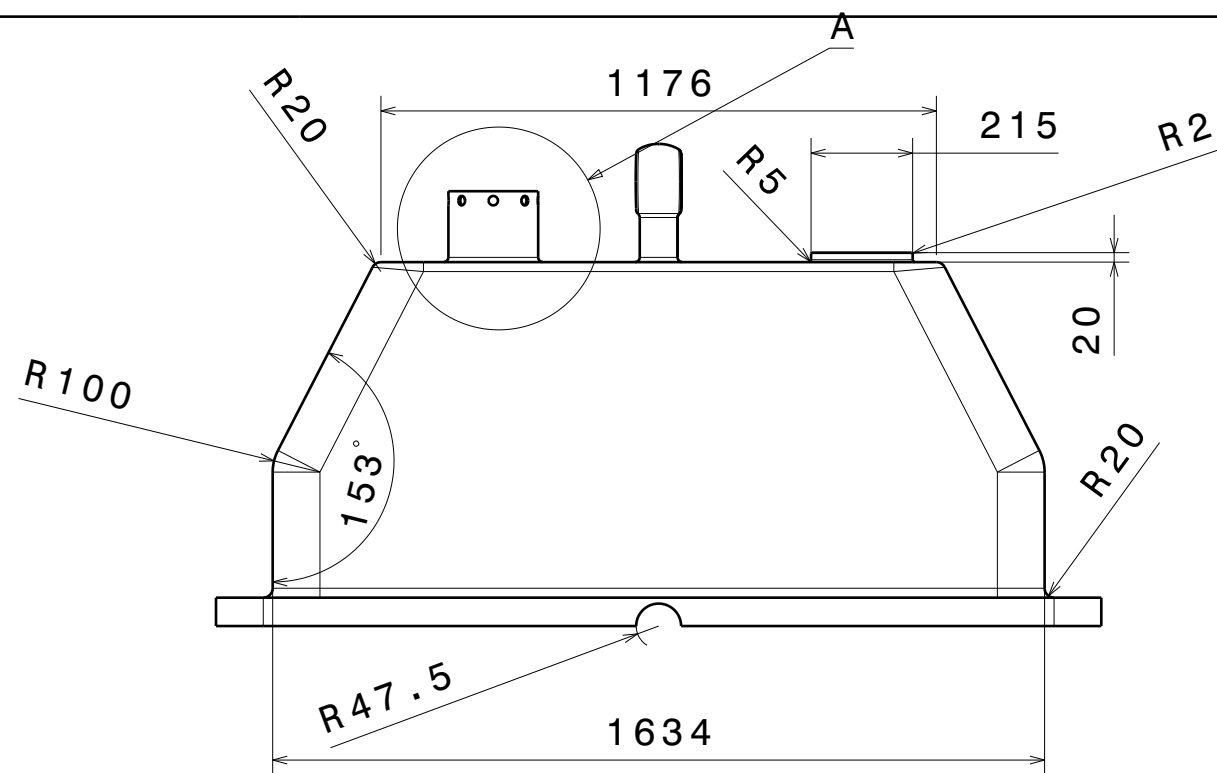


Detalj A
Razmera: 1:16

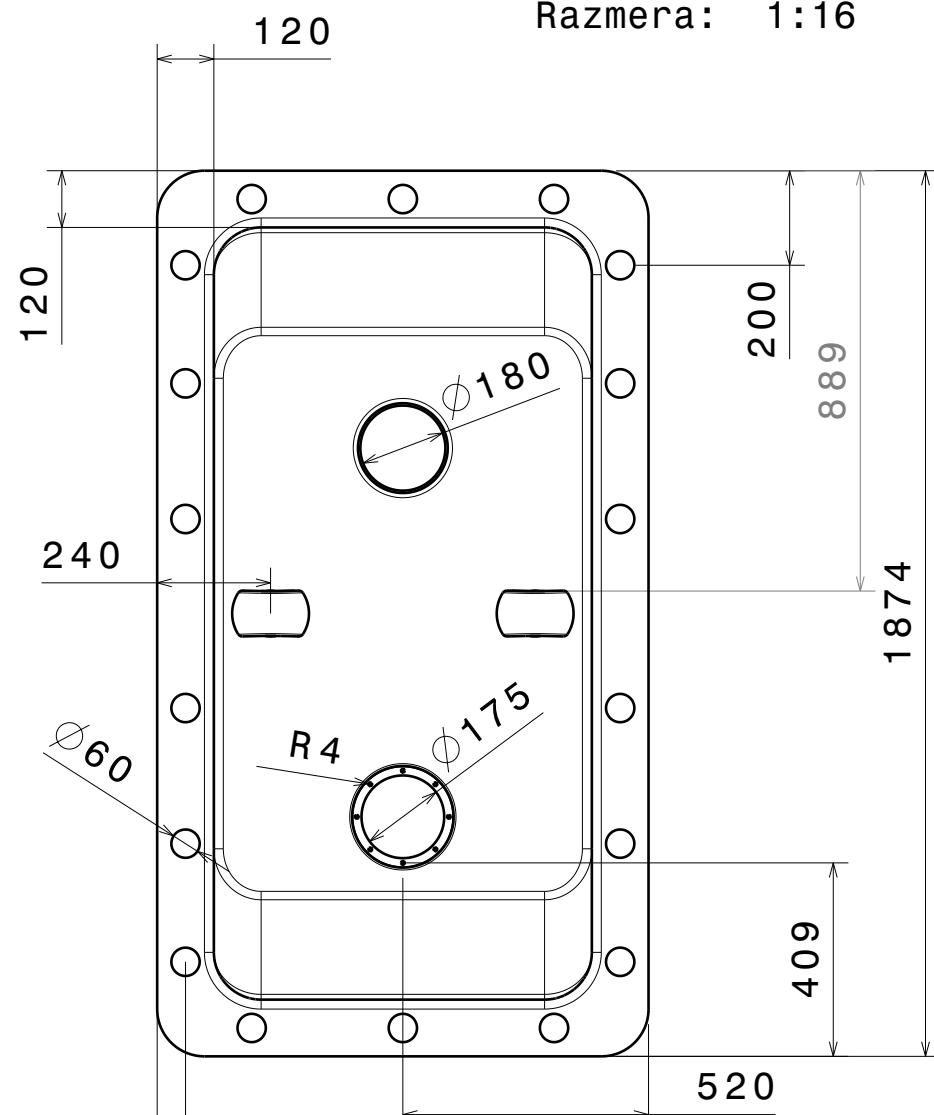
Tolerancije slobodnih mera				Povrsinska hrapavost			Povrsinska zastita							
Materijal							Termicka obrada							
									Masa	Razmera				
					Datum			Naziv: Kuciste turbine - dno						
					Obrad.									
					Stand.									
					Odobr.									
								Oznaka:			List:			
											L			
St.i	Izmene	Datum	Ime					Izv.pod.		Zamena za:				



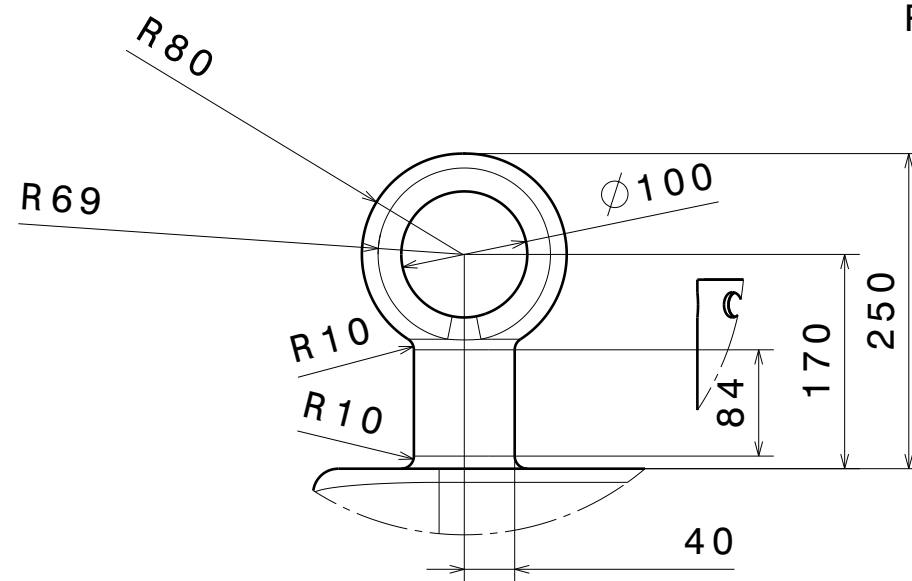
Pogled spreda
Razmera: 1:16



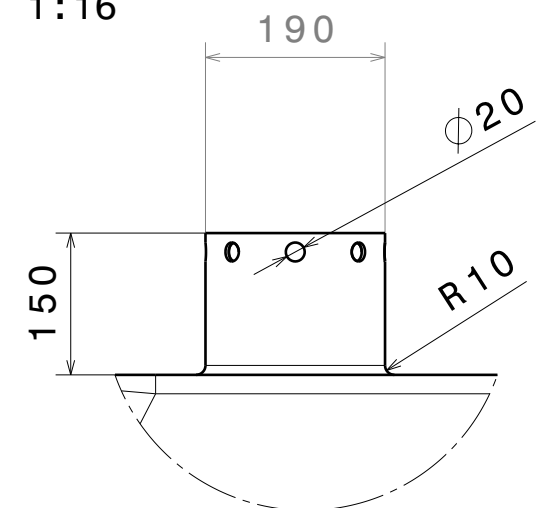
Pogled sa strane
Razmera: 1:16



Pogled odozgo
Razmera: 1:16

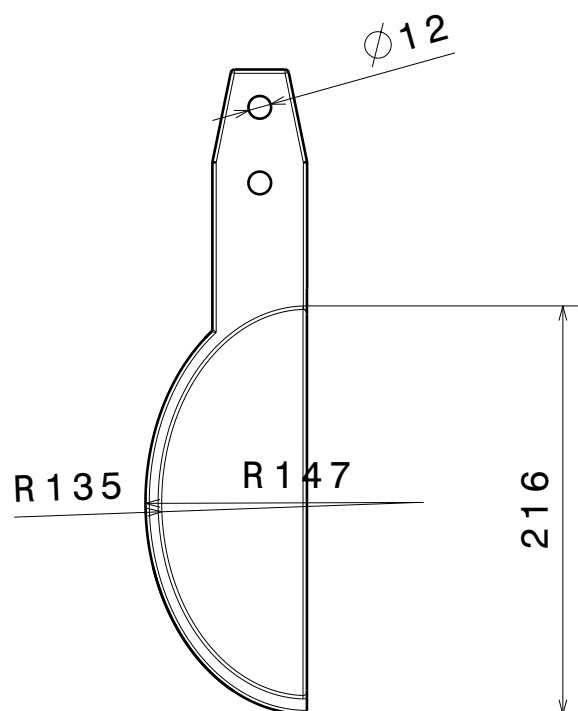
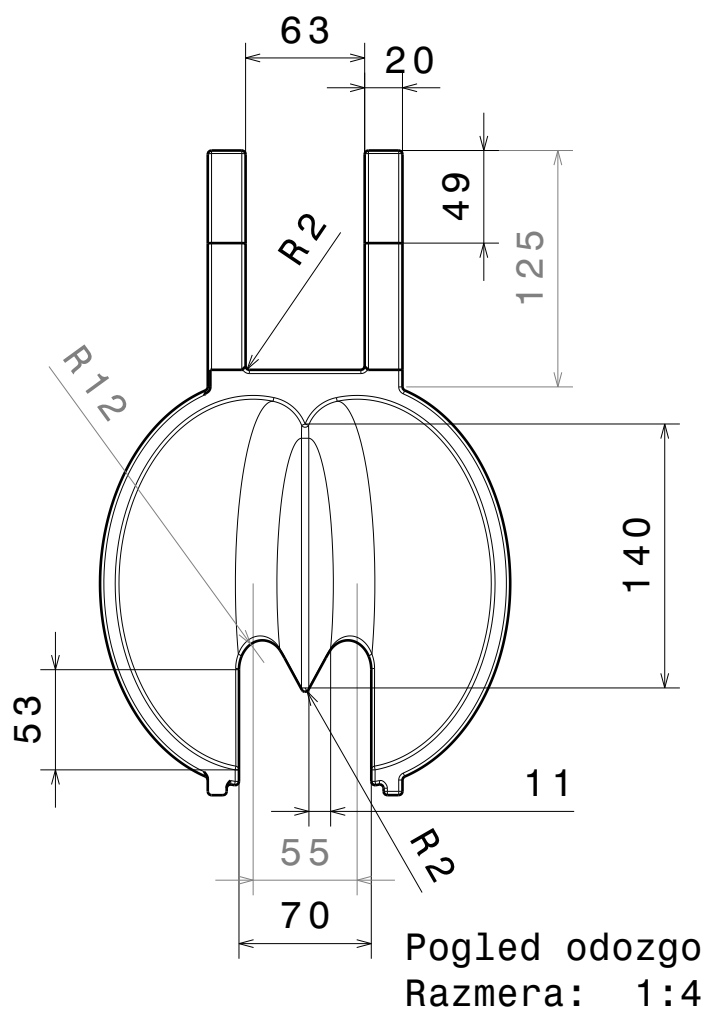
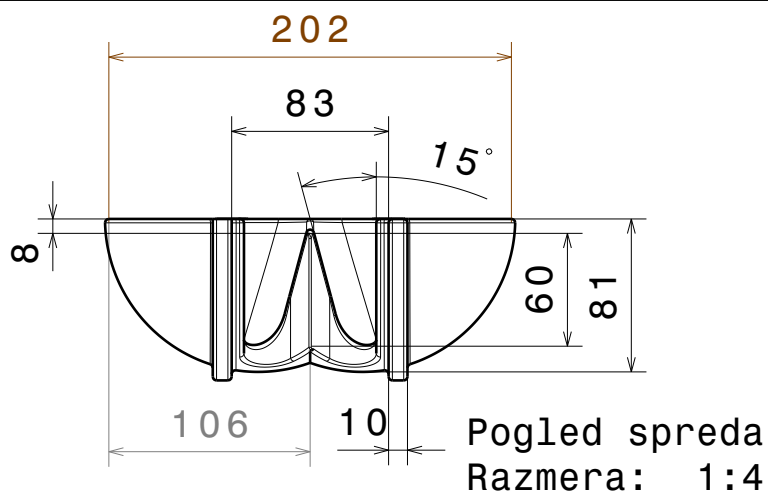


Detalj B
Razmera: 1:6

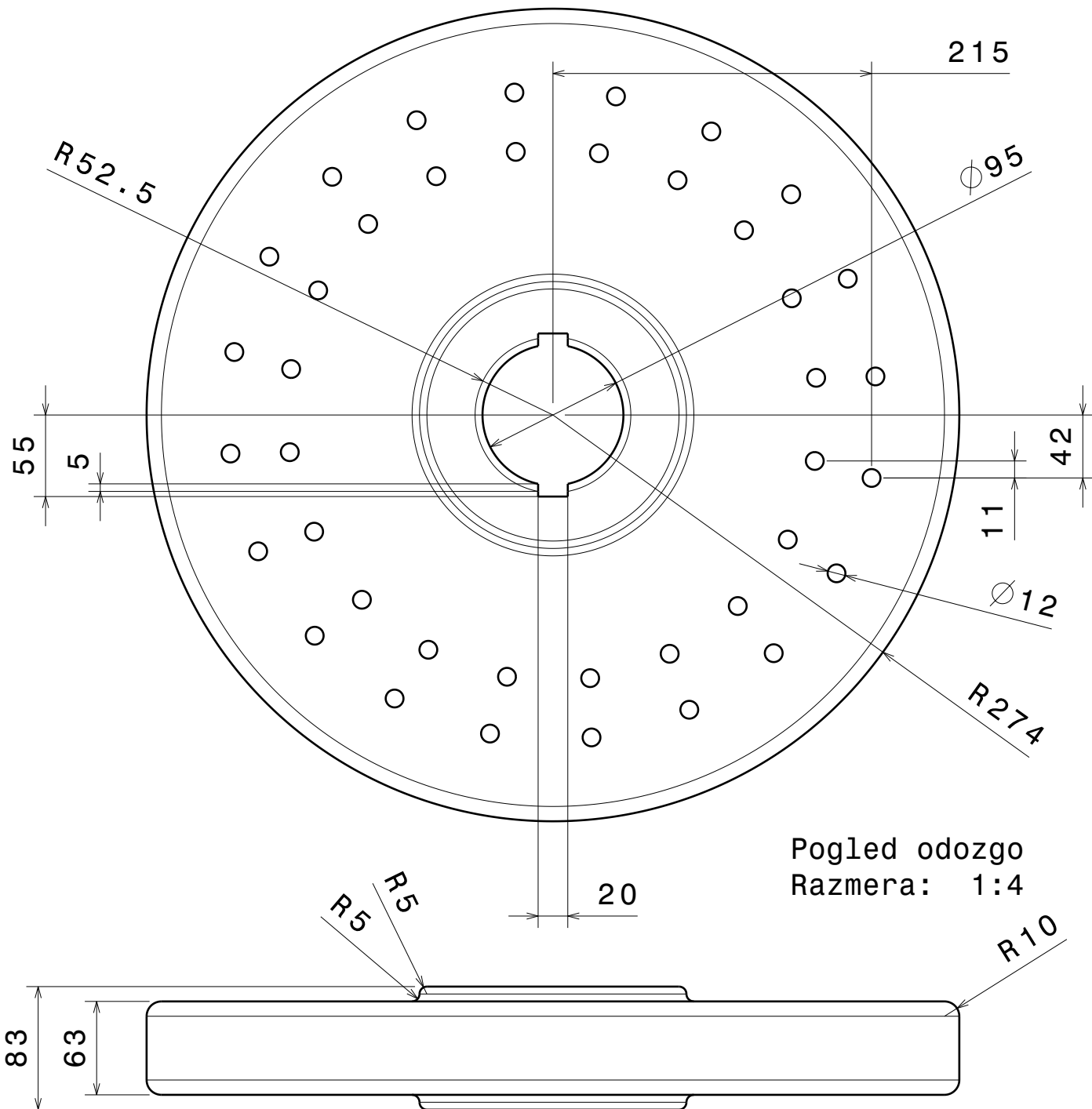


Detalj A
Razmera: 1:8

Tolerancije slobodnih mera				Povrsinska hrapavost			Povrsinska zastita						
Materijal							Termicka obrada						
									Masa	Razmera			
				Datum			Naziv: Kuciste turbine - vrh						
				Obrad.									
				Stand.									
				Odobr.									
							Oznaka:			List:			
										L			
St.i	Izmene	Datum	Ime							Izv.pod.		Zamena za:	



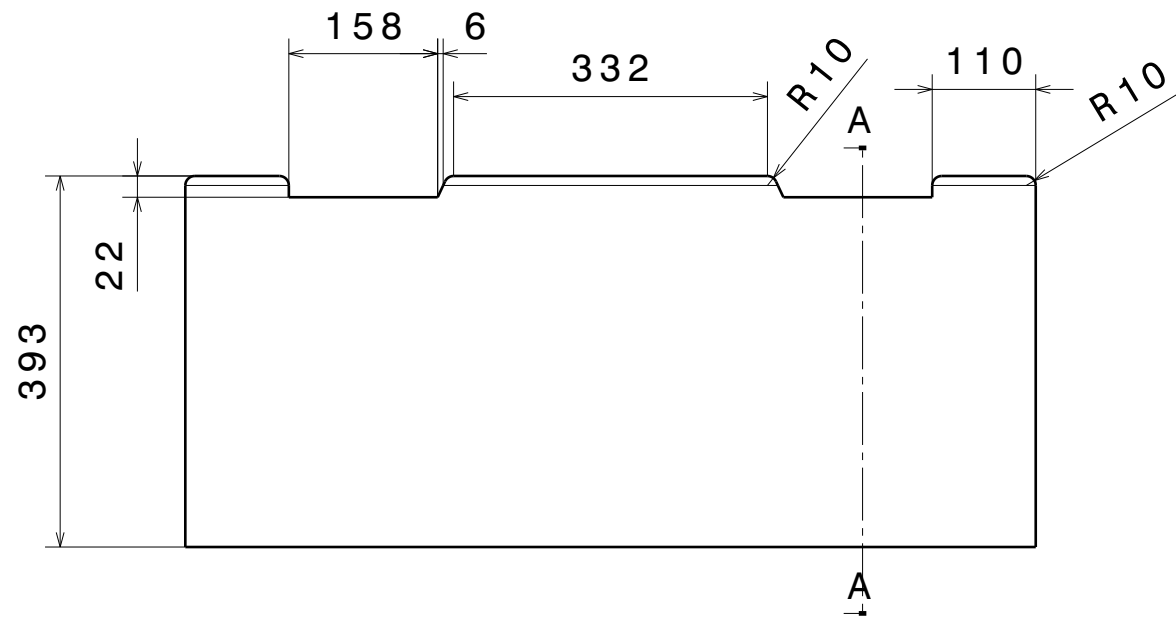
Tolerancija slobodnih mera				Povrsinska hrapavost				Povrsinska zastita					
Materijal				Č1330				Termicka obrada					
										Masa	Razmera		
				Datum			Naziv Lopatica radnog kola						
				Obrad									
				Stand									
				Odobr									
								Oznaka		List			
										L			
St.i	Izmene	Datum	Ime					Izv.pod.				Zamena za:	



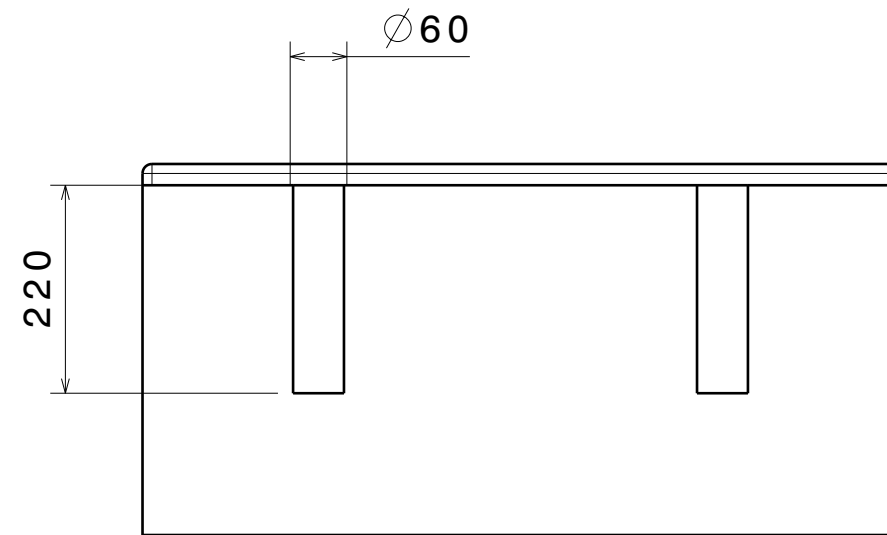
Pogled odozgo
Razmera: 1:4

Pogled spreda
Razmera: 1:4

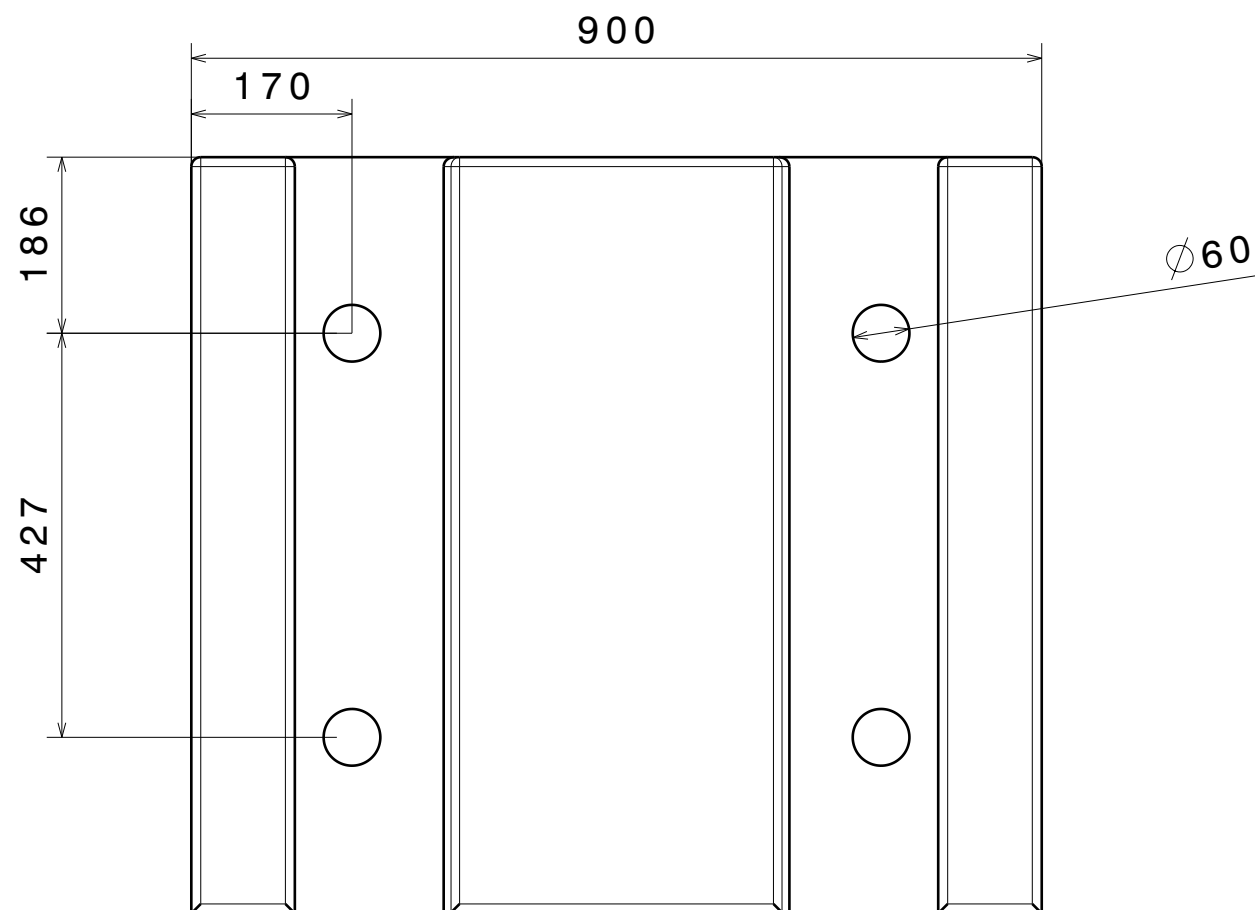
Tolerancija slobodnih mera				Povrsinska hrapavost				Povrsinska zastita							
Materijal								Č1330				Termicka obrada			
										Masa		Razmera			
					Datum			Naziv Osnova radnog kola							
					Obrad										
					Stand										
					Odobr										
								Oznaka				List			
												L			
St.i	Izmene			Datum	Ime	Izv.pod.				Zamena za:					



Pogled spreda
Razmera: 1:8

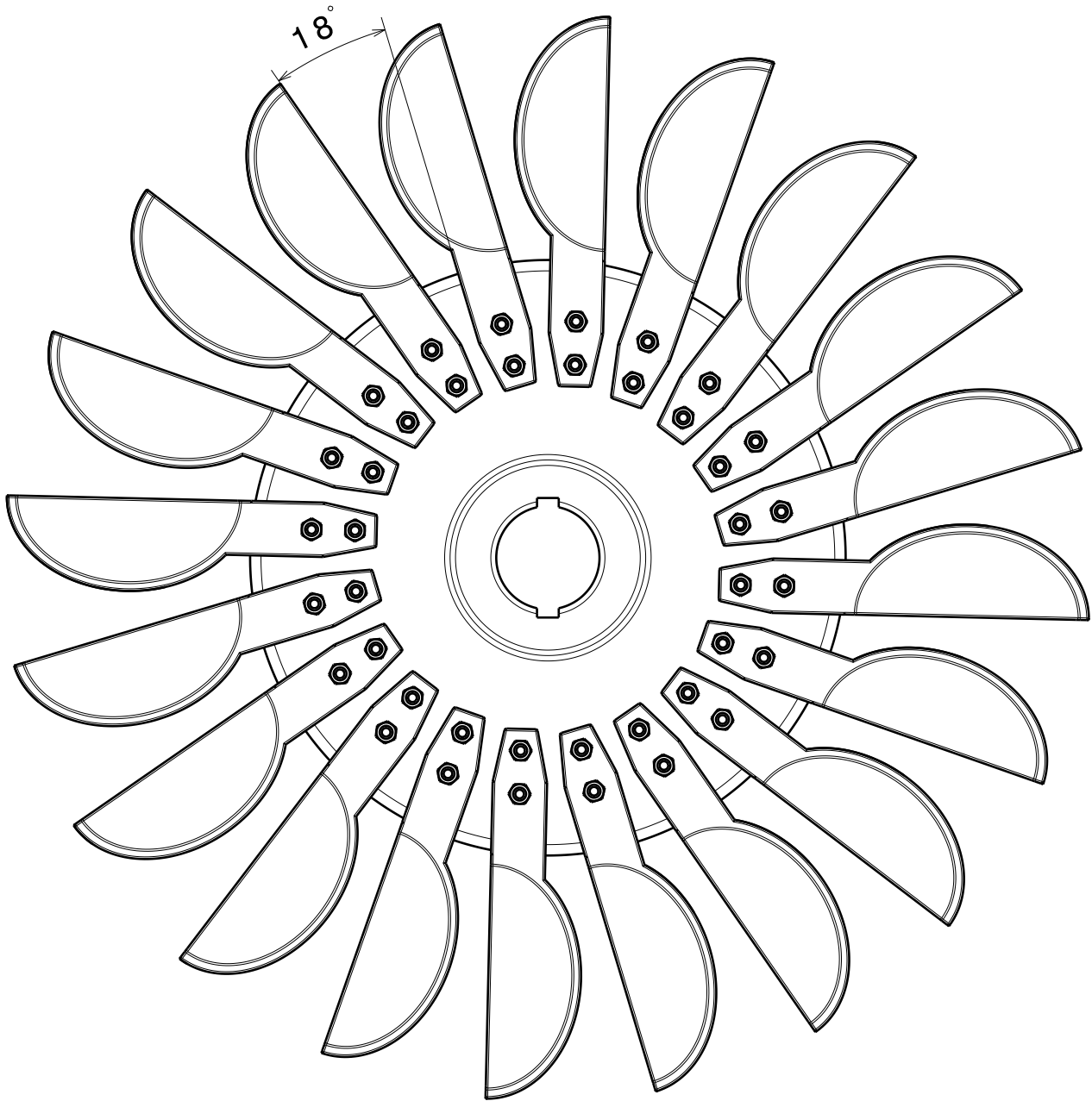


Presek A-A
Razmera: 1:8

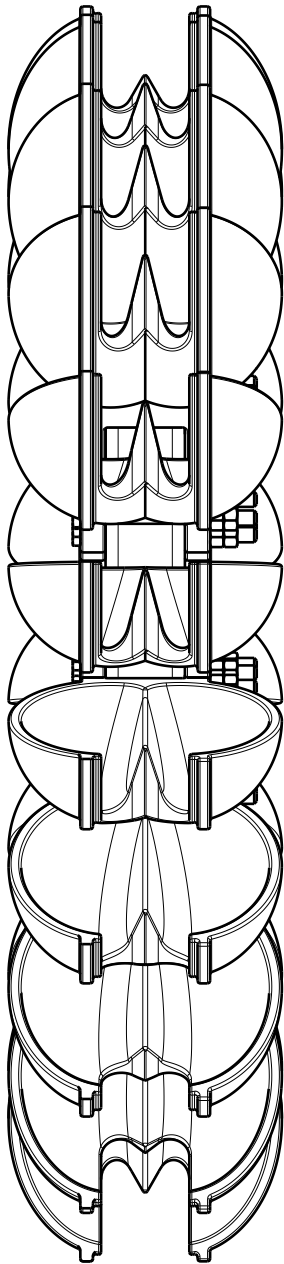


Pogled odozgo
Razmera: 1:8

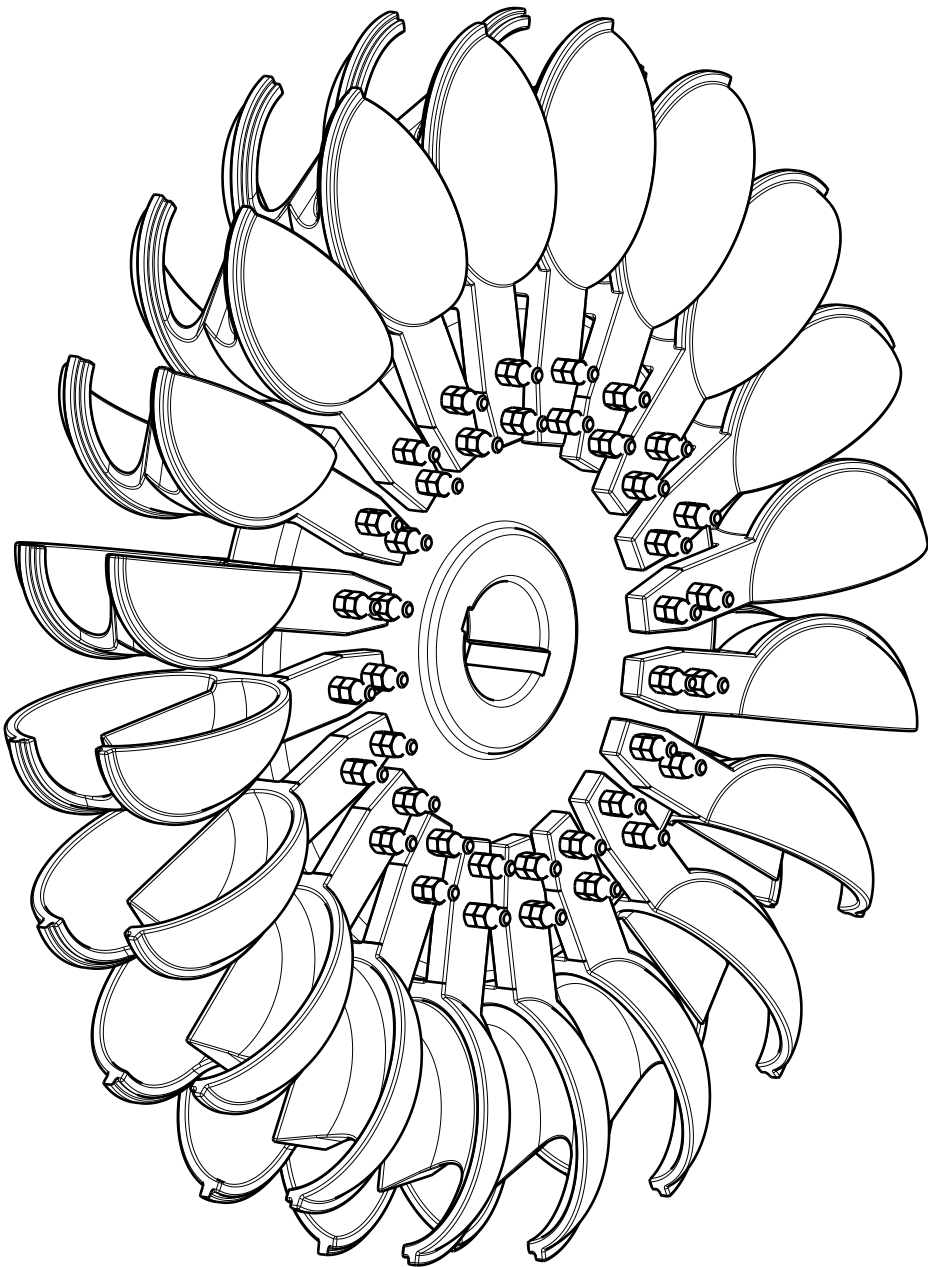
Tolerancije slobodnih mera				Povrsinska hrapavost			Povrsinska zastita				
Materijal							Termicka obrada				
									Masa	Razmera	
				Datum			Naziv: Podloga elektromotora				
				Obrad.							
				Stand.							
				Odobr.							
							Oznaka:		List:		
									L		
St.i	Izmene	Datum	Ime				Izv.pod.		Zamena za:		



Pogled spreda
Razmera: 1:6

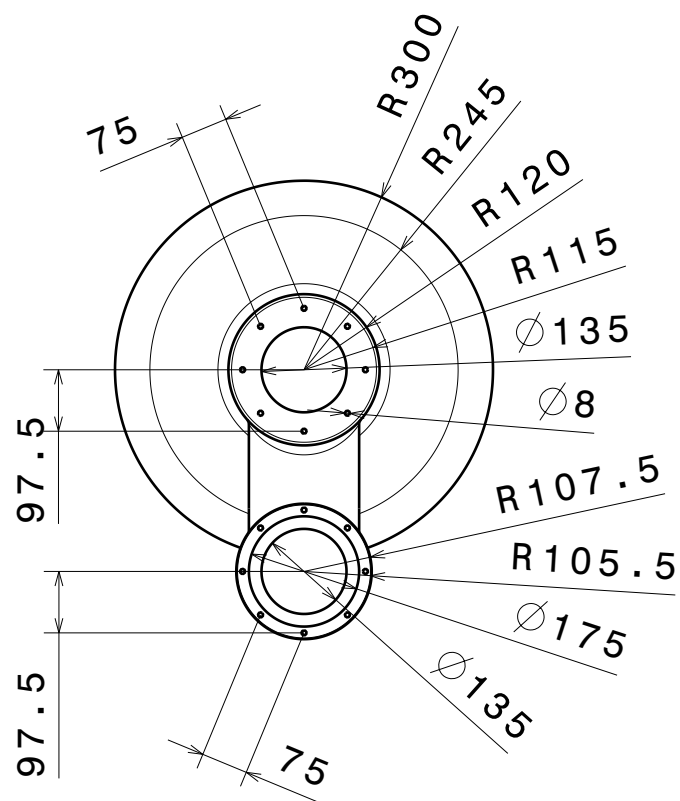


Pogled sa strane
Razmera: 1:6

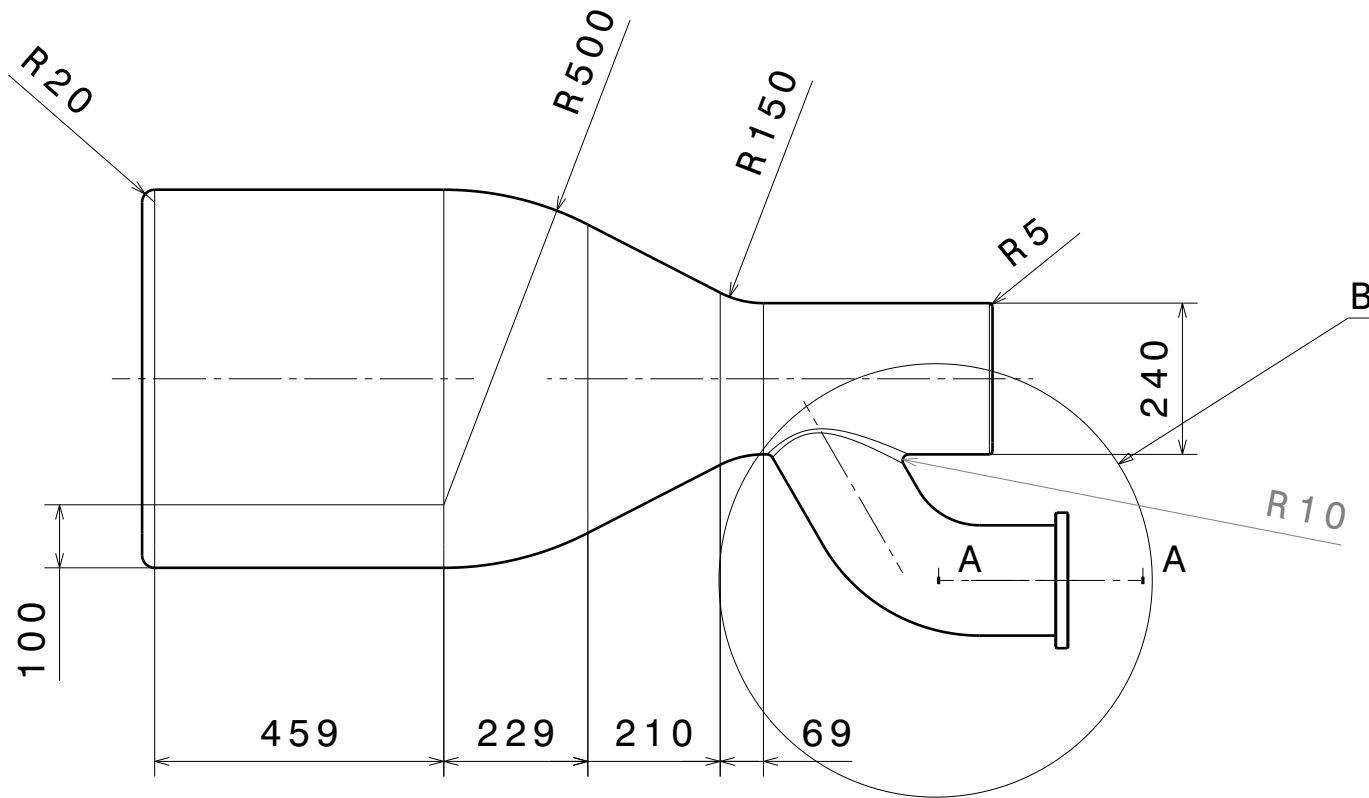


Izometrijski pogled
Razmera: 1:6

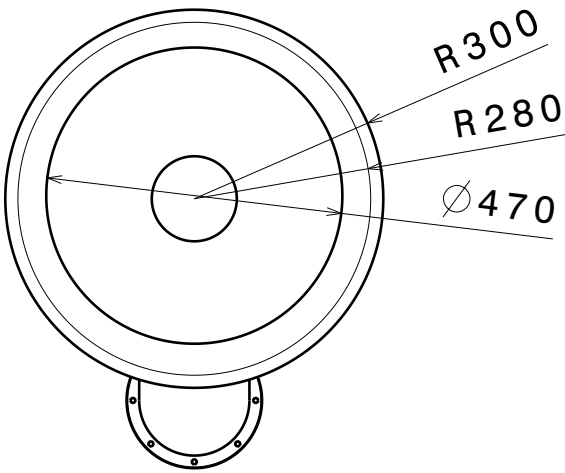
Tolerancije slobodnih mera				Povrsinska hrapavost			Povrsinska zastita					
Materijal							Termicka obrada					
									Masa	Razmera		
				Datum			Naziv: Radno kolo					
				Obrad.								
				Stand.								
				Odobr.								
							Oznaka:			List:		
										L		
St.i	Izmene		Datum	Ime				Izv.pod.		Zamena za:		



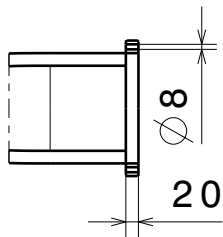
Pogled spreda
Razmera: 1:12



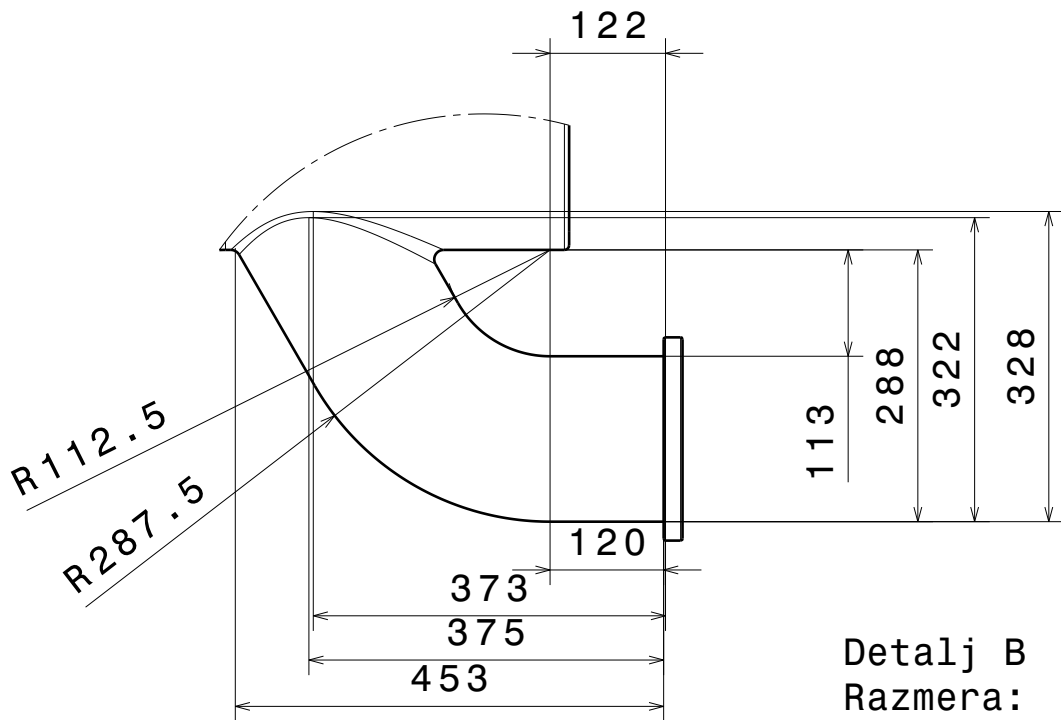
Pogled sa strane
Razmera: 1:12



Pogled odpozadi
Razmera: 1:12

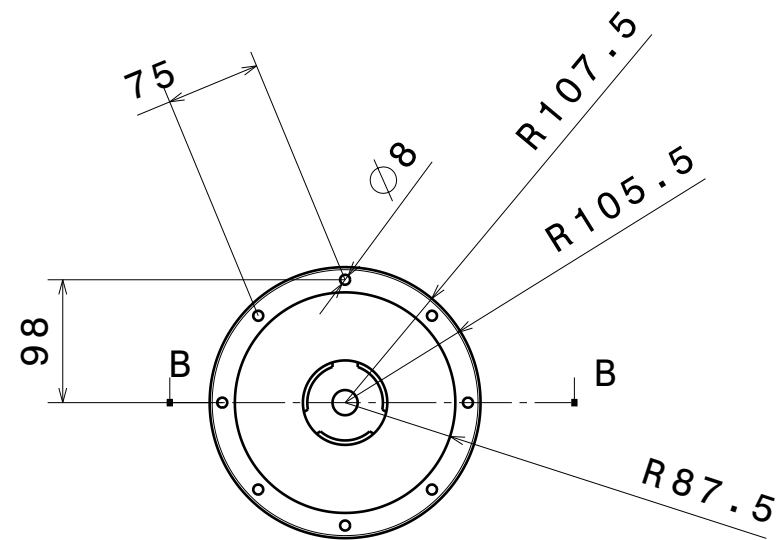


Presek A-A
Razmera: 1:12

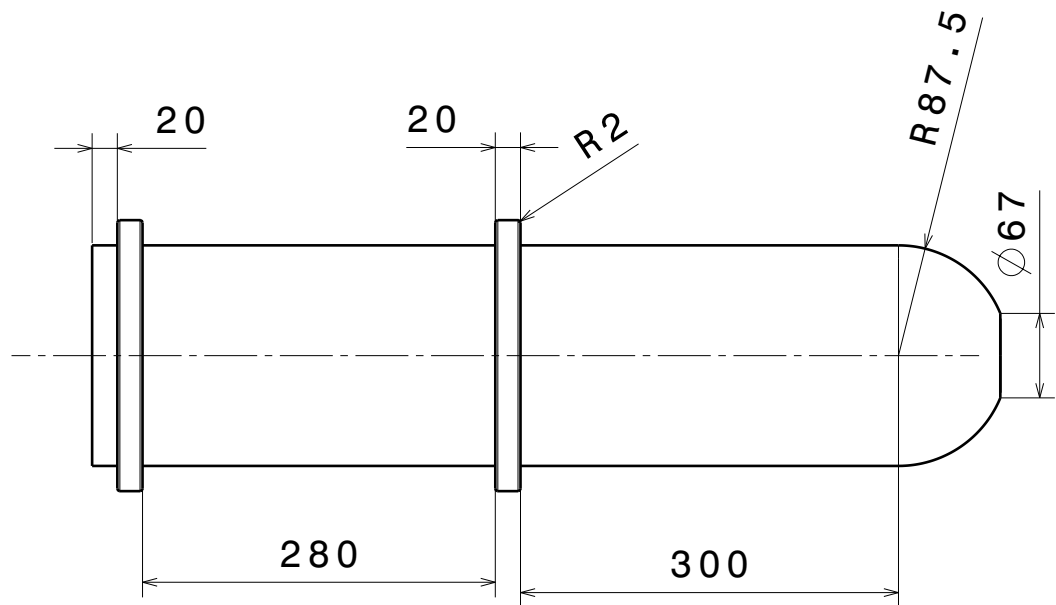


Detalj B
Razmera: 1:8

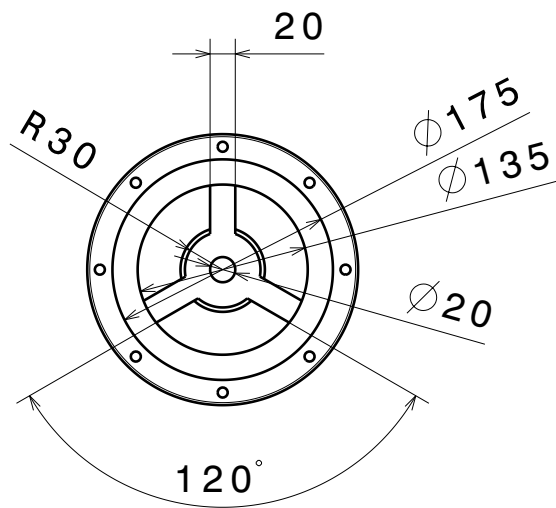
Tolerancije slobodnih mera				Povrsinska hrapavost			Povrsinska zastita							
Materijal							Termicka obrada							
									Masa	Razmera				
				Datum			Naziv: Spoj dovodnih cevi							
				Obrad.										
				Stand.										
				Odobr.										
							Oznaka:			List:				
										L				
St.i	Izmene	Datum	Ime							Izv.pod.		Zamena za:		



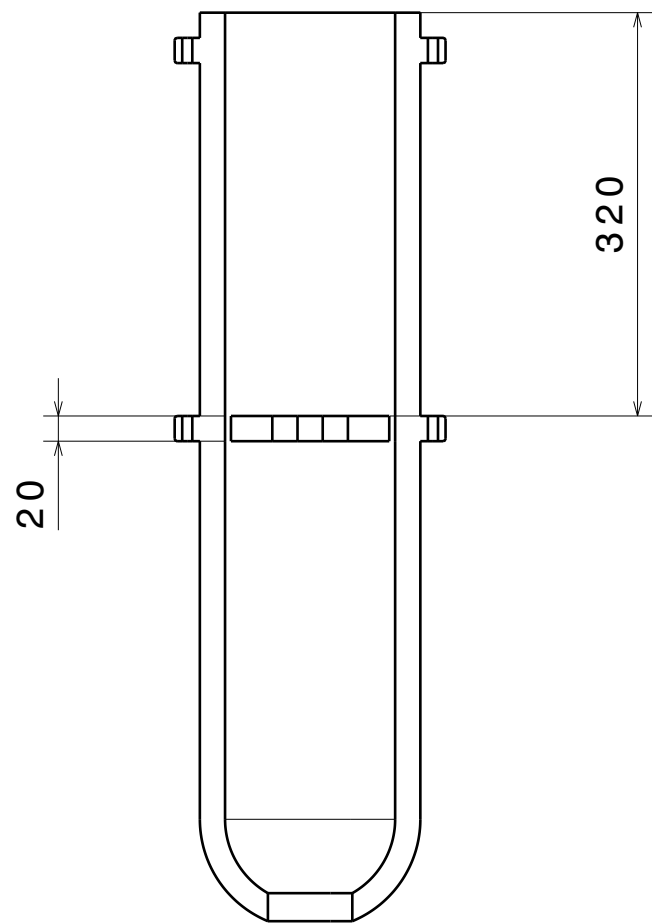
Pogled spreda
Razmera: 1:6



Pogled sa strane
Razmera: 1:6



Pogled odpozadi
Razmera: 1:6



Presek B-B
Razmera: 1:6

Tolerancije slobodnih mera				Povrsinska hrapavost			Povrsinska zastita							
Materijal							Termicka obrada							
									Masa	Razmera				
				Datum			Naziv: Vrh mlaznice							
				Obrad.										
				Stand.										
				Odobr.										
							Oznaka:			List:				
										L				
St.i	Izmene	Datum	Ime							Izv.pod.		Zamena za:		