

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Марјан Р. Арсовић

**ТЕРМОДИНАМИЧКИ ПРОЦЕСИ
ОДСТРАЊИВАЊА СОЛИ
ИЗ МОРСКЕ ВОДЕ**

докторска дисертација

Београд, 2016.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Marjan R. Arsović

**THERMODYNAMIC PROCESSES OF
SEAWATER DESALINATION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016.

Комисија за преглед, оцену и одбрану:

Ментор: Др Мирко Коматина, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

Чланови Комисије: Др Милош Бањац, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

Др Цветко Црнојевић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

Др Милан Гојак, ванредни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

Др Вукман Бакић, научни саветник,
Институт за нуклеарне науке, Винча

Датум одбране: _____ 2016.

*Посвећено мојој предивној деци: Анђелини и Александру,
мојим драгим родитељима и сестри*

ПРЕДГОВОР

Ова дисертација је настала као резултат вишегодишњег рада на истраживачким пројектима десалинизационих технологија реверзибилне осмозе воде. У циљу интегрисања утицајних фактора процеса реверзибилне осмозе воде, током истраживања су се поставили различити изазови али и сложени задаци које је требало решити. Имајући то у виду, изузетну захвалност дугујем свом ментору др Мирку Коматини, редовном професору Машинског факултета у Београду, на усмеравању, сугестијама и стручној подршци која је допринела изради и квалитету ове докторске дисертације. Професору др Радивоју М. Топићу захвалан сам на избору и предлогу области за израду докторске дисертације, као и на пруженој подршци и саветима, везаним за објављивање научног рада у часопису *Thermal Science*. Свим члановима комисије, захваљујем се на колегијалности и корисним сугестијама током прегледа тезе.

Експериментално истраживање ове дисертације је реализовано у лабораторији истраживачког института компаније “*Doosan Hydro Technology*”, *Tampa, Florida* у Сједињеним Америчким Државама, уз несебичну помоћ стручних колега и пријатеља. Захваљујем се директору, господину *Chris Claessen*, који ми је омогућио да користим лабораторију, опрему и мерне уређаје за свој истраживачки рад. Такође, захваљујем се колегама *Dr Hoon Hyung*, магистрима *Nick Suarin* и *Scoot Jackson*, на пруженој подршци током извођења бројних експеримената.

Захваљујем се својој породици, кћерки Анђелини, сину Александру, која су моја стална мотивација и инспирација, на пруженој подршци и бескрајном разумевању током израде ове тезе. Они мом животу и раду дају посебан смисао и чине ме бољим човеком. Захваљујем се својим родитељима Ранку и Снежани, сестри Маријани на бескрајној подршци коју су ми пружили свих протеклих година у свим ситуацијама које је живот доносио. На посебан начин захваљујем се свом ујаку, дипломираном машинском инжењеру Радомиру Димитријевићу, на целокупном ангажовању током израде ове дисертације. Захваљујем се родбини и пријатељима на моралној подршци да истрајем у свом раду.

Јун, 2016. године

Марјан Р. Арсовић

ТЕРМОДИНАМИЧКИ ПРОЦЕСИ ОДСТРАЊИВАЊА СОЛИ ИЗ МОРСКЕ ВОДЕ

Резиме:

Предмет рада у овој дисертацији је истраживање термодинамичких процеса десалинизације морске воде методом реверзибилне осмозе. Овим истраживањем развијени су модели запреминског протока пречишћене воде, потрошње електричне енергије и укупних трошкова процеса реверзибилне осмозе у зависности од радних режима процеса: трансмембранског притиска, концентрације соли морске воде, температуре морске воде, степена корисности процеса и карактеристика мембранске пропустљивости. Утврђене су теоријске оптималне вредности радних режима процеса, којима се постиже минимална потрошња енергије и минимални укупни трошкови одстрањивања соли из морске воде. У циљу верификације постављеног модела, осмишљено је и израђено лабораторијско постројење реверзибилне осмозе воде. Коришћене су три врсте мембранских модула различитих својстава пропустљивости и степена одстрањивања соли. Одабрани мембрански модули подвргнути су радним режимима трансмембранског притиска воде у опсегу $32 \cdot 10^5$ до $55 \cdot 10^5$ Pa, концентрацији растворених материја у морској води у опсегу 27500 до 40000 mg/l (TDS), температури морске воде у опсегу 15°C до 30°C и степеном корисности процеса у опсегу од 42 до 51%. Резултати истраживања потврдили су да концентрација растворених материја у морској води и степен корисности процеса имају значајан утицај на потрошњу енергије система, док температура морске воде значајно утиче на квалитет пречишћене воде. Установљено је да се правилним одабиром својстава мембранских модула, конфигурације мембранских елемената и радних режима, може утицати на смањење потрошње енергије по запремини пречишћене воде. Верификација добијених резултата извршена је поређењем резултата сопственог модела са резултатима сопственог експерименталног истраживања као и са моделима других аутора. У циљу додатног смањивања енергетских захтева приказани су аспекти интегрисања система реверзибилне осмозе воде са фотонапонским ћелијама.

Кључне речи: Десалинизација, реверзибилна осмоза, морска вода, одстрањивање соли, соларни извор енергије.

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Термомеханика

УДК број: 628.165:620.98(043.3)

THERMODYNAMIC PROCESSES OF SEAWATER DESALINATION

Abstract:

The motivation of the research presented in this thesis was to investigate processes that appears during the desalination of seawater by reverse osmosis treatment. This research developed thermodynamic models which describes the influence of the following process operational parameters on the permeate water flux and energy consumption of seawater reverse osmosis systems: feed water pressure, feed water salinity, feed water temperature, recovery ratio and membrane permeability performance. Optimal operational conditions for the theoretical minimum energy consumption and minimum capital cost were determined. Laboratory pilot reverse osmosis skid was designed and built in order to achieve and measure all relevant reverse osmosis process parameters. Three types of membrane modules with different permeability and salt rejection properties and was tested. The chosen membrane modules were subjected to the operational parameters: feed water pressure in range $32 \cdot 10^5$ to $55 \cdot 10^5$ Pa, feed water stream salt concentration in range 27500 to 40000 mg/l (*TDS*), feed water temperature in range 15°C to 30°C and recovery rate of the system in range 42 to 51%. The results confirmed that the salt concentration of feed water and recovery rate have significant impacts on the energy consumption of the system, while on the other side the temperature of feed water significantly affects the quality of permeate water. It was discovered that appropriate selection of membrane modules, configuration of membrane elements and operating parameters could increase system energy efficiency and reduce specific energy consumption of produced permeate water volume. The results of thermodynamic model equation were compared with the experimental results and with the models of the other authors in order to be verified. Aspects of the integration of reversible osmosis water system with photovoltaic cells with purpose of further optimizing the energy consumption was presented.

Keywords: Desalinations, reverse osmosis, seawater, desalting, solar energy source.

Scientific discipline: Mechanical Engineering

Scientific subdiscipline: Thermomechanics

UDC classification: 628.165:620.98(043.3)

С А Д Р Ж А Ј:

| | |
|---|-----|
| ИНДЕКС СКРАЋЕНИЦА И ОЗНАКА | XI |
| СПИСАК СЛИКА | XII |
| СПИСАК ТАБЕЛА | XXI |
| 1. УВОД | 1 |
| 2. ПОСТАВКА ПРОБЛЕМА ИСТРАЖИВАЊА И ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ | 4 |
| 2.1 Приказ и карактеристике процеса одстрањивања соли из морске воде..... | 4 |
| 2.2 Опис проблема истраживања..... | 12 |
| 2.2.1 Основни принципи једнофазног десалинизационог процеса реверзибилне осмозе воде | 13 |
| 2.3 Модели подсистема реверзибилне осмозе воде за повраћај енергије..... | 16 |
| 2.3.1 Термодинамичка ограничења десалинизационих процеса реверзибилне осмозе воде | 18 |
| 2.4 Преглед теоријских и експерименталних истраживања процеса реверзибилне осмозе воде..... | 21 |
| 2.5 Термодинамички модел мембранског процеса реверзибилне осмозе воде | 29 |
| 3. ТЕОРИЈСКО ИСТРАЖИВАЊЕ ДЕСАЛИНИЗАЦИОНИХ ПРОЦЕСА РЕВЕРЗИБИЛНЕ ОСМОЗЕ ВОДЕ | 39 |
| 3.1 Дефинисање модела процеса једнофазне конфигурације мембранског система реверзибилне осмозе воде..... | 39 |
| 3.1.1 Термодинамичко ограничење у десалинизационим системима реверзибилне осмозе воде..... | 45 |
| 3.1.2 Дефинисање протока пречишћене воде у околини термодинамичких граничних вредности..... | 46 |
| 3.2 Оптимизација енергетских захтева модела процеса једнофазне конфигурације мембранског система реверзибилне осмозе воде без повраћаја енергије високог притиска концентроване воде | 47 |
| 3.2.1 Утицај трошкова управљања протоком концентроване воде на термодинамичка ограничења и минималне енергетске потребе десалинизационог система реверзибилне осмозе воде | 49 |
| 3.3 Оптимизација модела процеса једнофазне конфигурације мембранског система реверзибилне осмозе воде за режиме рада изнад термодинамичког ограничења | 51 |
| 3.3.1 Оптимизација модела процеса једнофазне конфигурације мембранског система реверзибилне осмозе воде у зависности од радног режима протока пречишћене воде..... | 51 |
| 3.3.2 Оптимизација модела процеса једнофазне конфигурације мембранског система реверзибилне осмозе воде у зависности од радног режима протока морске воде | 54 |
| 3.3.3 Утицај одабира модела средње вредности разлике осмотског притиска морске воде и пречишћене воде дуж мембранског канала на специфичну потрошњу енергије модела процеса једнофазне конфигурације мембранског система реверзибилне осмозе воде | 57 |
| 3.4 Удео пада притиска услед трења дуж деонице мембранског модула у трансмембранском притиску процеса једнофазне конфигурације мембранског система реверзибилне осмозе воде | 59 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.4.1 | Утицај степена корисности склопа пумпе и електромотора на специфичну потрошњу електричне енергије процеса реверзибилне осмозе воде | 62 |
| 3.4.2 | Утицај уређаја за повраћај енергије на специфичну потрошњу енергије процеса реверзибилне осмозе воде | 62 |
| 4. | ОПТИМИЗАЦИЈА ПРОЦЕСА РЕВЕРЗИБИЛНЕ ОСМОЗЕ ВОДЕ..... | 66 |
| 4.1 | Квалитет и значај постојећих мембрана..... | 66 |
| 4.2 | Моделирање процеса реверзибилне осмозе и резултати..... | 67 |
| 4.2.1 | Специфична потрошња електричне енергије система <i>RO</i> при термодинамичким граничним вредностима..... | 68 |
| 4.2.2 | Специфични трошкови мембране за процес <i>RO</i> при термодинамичким граничним вредностима..... | 70 |
| 4.2.3 | Однос специфичних трошкова мембране и специфичне потрошње електричне енергије процеса <i>RO</i> при термодинамичким граничним вредностима..... | 72 |
| 4.3 | Закључци и препоруке за будуће потребе истраживања | 75 |
| 5. | ПОСТАВКЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА МОДЕЛА ПРОЦЕСА ОДСТРАЊИВАЊА СОЛИ ИЗ МОРСКЕ ВОДЕ..... | 77 |
| 5.1 | Експериментална инсталација процеса <i>RO</i> за десалинизацију морске воде | 78 |
| 5.1.1 | Процес чишћења мембрана хемијским растворима..... | 82 |
| 5.1.2 | Десалинизација морске воде високе концентрације растворених соли | 82 |
| 5.2 | „ <i>NanoH₂O</i> ” мембранска технологија | 83 |
| 5.3 | Специфична потрошња енергије процеса <i>RO</i> за различите типове мембрана..... | 85 |
| 5.3.1 | Мембрански модул <i>QFX SW 75 ES</i> (10 елемената) | 85 |
| 5.3.1.1 | Мембрански модул <i>QFX SW 75 ES</i> (14 елемената)..... | 86 |
| 5.3.1.2 | Мембрански модул <i>QFX SW 75 R</i> (14 елемената)..... | 87 |
| 5.4 | Резултати експерименталног испитивања..... | 88 |
| 5.4.1 | Експериментално испитивање <i>ES</i> мембранских модула | 88 |
| 5.4.1.1 | Експериментално испитивање <i>ES</i> мембранских модула (10 елемената) | 89 |
| 5.4.1.2 | Експериментално испитивање <i>ES</i> мембранских модула (14 елемената) | 91 |
| 5.4.2 | Експериментално испитивање <i>ES</i> мембранских елемената са побољшаним карактеристикама одстрањивања соли | 94 |
| 5.4.2.1 | Експериментално испитивање <i>ES</i> мембранских елемената са побољшаним карактеристикама одстрањивања соли коришћењем морске воде ниске концентрације растворених соли | 95 |
| 5.4.2.2 | Експериментално испитивање <i>ES</i> мембранских елемената са побољшаним карактеристикама одстрањивања соли коришћењем морске воде високе концентрације растворених соли | 98 |
| 5.4.3 | Закључци експерименталног испитивања <i>ES</i> мембранских модула | 101 |
| 5.4.4 | Експериментално испитивање <i>R</i> мембранских модула | 101 |
| 5.4.5 | Експериментално испитивање <i>R</i> мембранских модула коришћењем морске воде са ниском концентрацијом растворених соли | 102 |
| 5.4.6 | Експериментално испитивање <i>R</i> мембранских модула коришћењем морске воде високе концентрације соли | 104 |
| 5.4.7 | Закључци експерименталног испитивања <i>R</i> мембранских модула..... | 108 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.4.8 | Резултати процеса чишћења мембрана хемијским растворима | 108 |
| 5.4.9 | Однос између електричне проводљивости и концентрације растворених соли..... | 111 |
| 5.5 | Аутопсија мембране..... | 112 |
| 5.6 | Резултати експерименталног испитивања процеса <i>RO</i> коришћењем <i>Nano H₂O</i> мембранских модула..... | 116 |
| 5.7 | Анализа енергетских трошкова процеса и инвестиционих трошкова постројења реверзибилне осмозе воде | 118 |
| 5.7.1 | Анализа једнопролазне конфигурације <i>SWRO</i> | 120 |
| 5.7.2 | Индустријске и двопролазне конфигурације система <i>SWRO</i> | 124 |
| 5.7.3 | Прорачун инвестиционих трошкова процеса одстрањивања соли из морске воде..... | 128 |
| 5.8 | Дискусија и закључци експерименталних истраживања..... | 128 |
| 5.8.1 | <i>QFX SW ES</i> мембрански модули | 128 |
| 5.8.2 | <i>QFX SW R</i> мембрански модули..... | 129 |
| 5.8.3 | Хибридне мембранске конфигурације | 129 |
| 5.8.4 | Анализа трошкова процеса одстрањивања соли из морске воде | 130 |
| 5.8.5 | Препоруке..... | 130 |
| 6 | ПОРЕЂЕЊЕ РЕЗУЛТАТА ТЕОРИЈСКИХ МОДЕЛА И РЕЗУЛТАТА ЕКСПЕРИМЕНТА..... | 132 |
| 6.1 | Дефинисање математичких модела и њихових параметара..... | 132 |
| 6.2 | Поређење експерименталних резултата са резултатима модела..... | 134 |
| 7 | АСПЕКТИ ИНТЕГРАЦИЈЕ ОБНОВЉИВОГ ИЗВОРА СОЛАРНЕ ЕНЕРГИЈЕ СА ДЕСАЛИНИЗАЦИОНИМ СИСТЕМОМ РЕВЕРЗИБИЛНЕ ОСМОЗЕ ВОДЕ | 150 |
| 7.1 | Фотонапонски ефекат | 150 |
| 7.1.1 | Анализа фотонапонских ћелија..... | 152 |
| 7.1.2 | Степен корисности фотонапонских соларних ћелија | 156 |
| 7.1.3 | Вишеслојне фотонапонске соларне ћелије..... | 157 |
| 7.2 | Развој фотонапонских система | 158 |
| 7.2.1 | Профили и процена електричних оптерећења | 160 |
| 7.2.2 | Процена доступног Сунчевог зрачења | 161 |
| 7.2.3 | Димензионисање фотонапонских система..... | 161 |
| 7.3 | Интеграција соларних фотонапонских система са десалинизационим системом реверзибилне осмозе | 162 |
| 7.3.1 | Фотонапонски модули..... | 163 |
| 7.3.2 | Могућности коришћења соларне енергије на локацији Тампа, Флорида, САД | 164 |
| 7.3.3 | Анализа могућности коришћења соларних фотонапонских панела за рад експерименталног десалинизационог постројења..... | 166 |
| 7.3.4 | Закључак студије изводљивости интеграције соларних фотонапонских панела са десалинизационим постројењем..... | 167 |
| 8 | ЗАКЉУЧАК..... | 168 |
| | ЛИТЕРАТУРА | 176 |
| | ПРИЛОЗИ | 186 |
| | БИОГРАФИЈА АУТОРА..... | 221 |

ИНДЕКС СКРАЋЕНИЦА И ОЗНАКА

| Ознака | Значење |
|---|---|
| <i>ANN</i> | Вештачке неуронске мреже |
| <i>ED</i> | Електродијализа |
| <i>EDR</i> | Реверзибилна електродијализа |
| <i>ERD</i> | Уређај за повраћај енергије |
| <i>FO</i> | Директна осмоза |
| <i>HPP_{wv}</i> | Радни напон пумпе високог притиска |
| <i>ICD</i> | Концентрат деминерализације |
| <i>MER</i> | Специфични трошкови израде мембрана у односу на специфичну потрошњу енергије |
| <i>MED</i> | Вишеструки ефекат дестилације |
| <i>MD</i> | Мембранска дестилација |
| <i>MSF</i> | Мулти-етапна фаза |
| <i>MINLP</i> | Модел нелинеарног програмирања |
| <i>MPPT_v</i> | Максимални напон фотонапонског модула са системом праћења позиције сунца у времену |
| <i>NF</i> | Нанофилтрација |
| \overline{NDP} | Укупни ефективни притисак процеса реверзибилне осмозе воде |
| <i>P&ID</i> | Процесни дијаграм експерименталног пилот постројења |
| <i>PV</i> | Фотонапонски модул |
| <i>PVRO</i> | Фотонапонски систем реверзибилне осмозе воде |
| <i>RO</i> | Реверзибилна осмоза |
| <i>RSM</i> | Вишепараметарске просторне површи |
| <i>SEC</i> | Специфична потрошња енергије |
| <i>SEC_{norm}</i> | Нормализована специфична потрошња енергије |
| <i>SEC^{ERD}</i> | Специфична потрошња енергије у систему са уређајем за повраћај енергије |
| <i>SEC^{ERD}_{tr, norm}</i> | Нормализована специфична потрошња енергије у систему са уређајем за повраћај енергије |
| <i>SMC</i> | Специфични трошкови мембране |
| <i>SMC_{tr}</i> | Нормализовани специфични трошкови мембране |
| <i>SWRO</i> | Реверзибилна осмоза морске воде |
| <i>TDS</i> | Укупно растворене соли у води |
| <i>ZLD</i> | Нулто пражњење течности |

СПИСАК СЛИКА

| Ред.број | Назив слике |
|------------|---|
| Слика 2.1 | Приказ удела укупно инсталираних десалинизационих постројења у свету, 2011 |
| Слика 2.2 | Приказ кумулативних десалинизационих производних капацитета по годинама у свету |
| Слика 2.3 | Процес осмозе: директна осмоза (<i>FO</i>) и реверзибилна осмоза (<i>RO</i>) |
| Слика 2.4 | Директна осмоза праћена дестилацијом и регенерацијом раствора |
| Слика 2.5 | Структура трошкова десалинизације морске воде процесом реверзибилне осмозе |
| Слика 2.6 | Удео енергетских захтева у двофазном постројењу реверзибилне осмозе |
| Слика 2.7 | Приказ конструкционих компоненти мембранског модула за процес реверзибилне осмозе воде |
| Слика 2.8 | Приказ различитих система за повраћај енергије |
| Слика 2.9 | Приказ упоређивања трансмембранског притиска и осмотског притиска за (а) претходне технологије мембрана (лево) и (б) савремене мембране (десно) <i>RO/NF</i> |
| Слика 2.10 | Шематски приказ дифузног процеса реверзибилне осмозе воде |
| Слика 3.1 | Шематски приказ система реверзибилне осмозе воде, без повраћаја енергије |
| Слика 3.2 | Шематски приказ физичких величина мембранског процеса |
| Слика 3.3 | Промена математичке функције $SEC_{tr, norm}$ нормализоване специфичне потрошње енергије у зависности од степена корисности процеса једнофазног десалинизационог система реверзибилне осмозе воде |
| Слика 3.4 | Промене збирне математичке функције нормализоване специфичне потрошње енергије и нормализованих трошкова управљања концентрованом водом у зависности од степена корисности процеса једнофазног модела десалинизационог система реверзибилне осмозе воде |
| Слика 3.5 | Промена нормализоване специфичне потрошње енергије у зависности од степена корисности процеса за различите нормализоване протоке пречишћене воде једнофазног модела десалинизационог система реверзибилне осмозе |
| Слика 3.6 | а - Промена функције нормализоване минималне специфичне потрошње у зависности од нормализованих протока пречишћене воде; б - Промена функције оптималног степена корисности процеса <i>RO</i> у зависности од нормализованих протока пречишћене воде |

| | |
|------------|--|
| Слика 3.7 | Промена збирне математичке функције нормализоване специфичне потрошње енергије и трошкова управљања протоком концентроване воде у зависности од степена корисности процеса за различите нормализоване протоке пречишћене воде и вредност параметара $b_{norm} = 1$ |
| Слика 3.8 | Промена нормализоване специфичне потрошње енергије у зависности од степена корисности процеса за различите нормализоване протоке морске воде једнофазног модела десалинизационог система реверзибилне осмозе |
| Слика 3.9 | а - Промена нормализоване минималне специфичне потрошње енергије у зависности од нормализованих протока морске воде б - Промена оптималног степена корисности процеса RO у зависности од нормализованих протока морске воде |
| Слика 3.10 | Промена нормализоване специфичне потрошње енергије у зависности од степена корисности процеса за различите нормализоване протоке морске воде једнофазног модела десалинизационог система реверзибилне осмозе воде без повраћаја енергије |
| Слика 3.11 | Функције удела \overline{NDP} , $\Delta\pi$ и Δp_f на вредност трансмембранског притиска при радним режимима за термодинамичке граничне услове |
| Слика 3.12 | Поједностављени систем RO са повраћајем енергије (ERD) |
| Слика 3.13 | Нормализована специфична потрошња енергије у зависности од степена корисности процеса реверзибилне осмозе, коришћењем ERD у једнофазном процесу реверзибилне осмозе |
| Слика 4.1 | Приказ система RO са уређајем за повраћај енергије (ERD) |
| Слика 4.2 | Однос функција (SMC_{tr}^{norm}) и (SEC_{tr}^{norm}) у процесу RO при термодинамичким граничним вредностима. График у горњем десном углу приказује нормализовану SEC_{tr}^{norm} при термодинам. граничним вредностима. |
| Слика 4.3 | Приказ ефекта пропустљивости мембране на SEC и SMC за процес RO при термодинамичким граничним вредностима |
| Слика 5.1 | Технолошка шема ($P&ID$) експерименталног постројења за десалинизацију морске воде $SWRO$ |
| Слика 5.2 | Алгоритам контролног процеса једног подсистема реверзибилне осмозе морске воде |
| Слика 5.3 | CAD 3D модел експерименталног система за реверзибилну осмозу морске воде (лево) и израђено експериментално постројење за реверзибилну осмозу морске воде (десно) |
| Слика 5.4 | Шематски приказ експерименталног десалинизационог постројења и симулирање процеса RO са морском водом која садржи веће концентрације растворених соли |
| Слика 5.5 | Попречни пресек TFN мембране |
| Слика 5.6 | Микроприказ попречног пресека TFN мембране (лево), Микроприказ површине мембране који показује распоред наночестица (десно) |

| | |
|------------|---|
| Слика 5.7 | Специфична потрошња енергије за мембранске модуле <i>QFX SW 75 ES</i> за различите радне режиме процеса <i>RO</i> |
| Слика 5.8 | Специфична потрошња енергије за 14 мембранских модула <i>QFX SW 75 ES</i> за различите радне режиме процеса <i>RO</i> |
| Слика 5.9 | Специфична потрошња енергије за 10 мембранских модула <i>QFX SW 75 R</i> за различите радне режиме процеса <i>RO</i> |
| Слика 5.10 | Специфична потрошња енергије система <i>RO</i> који садржи 10 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 ES</i> у току оперативног времена према промени трансмембранског притиска морске воде |
| Слика 5.11 | Запремински проток пречишћене воде, степен корисности процеса и пад притиска услед трења система <i>RO</i> који садржи 10 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 5.12 | Степен одстрањивања соли из морске воде, концентрације растворених соли у пречишћеној води у систему <i>RO</i> који садржи 10 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 5.13 | Специфична потрошња енергије система који садржи 14 мембранских модула типа <i>DOW Filmtec</i> до 37. дана и мембранског модула типа <i>QFX SW 75 ES</i> за временски период после 37. дана према промени трансмембранског притиска |
| Слика 5.14 | Запремински проток пречишћене воде, степен корисности процеса и пад притиска услед трења система <i>RO</i> који садржи 14 мембранских елемената типа <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 5.15 | Степен одстрањивања соли из морске воде, концентрације соли у пречишћеној води система <i>RO</i> који садржи 14 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 5.16 | Специфична потрошња енергије система <i>RO</i> који садржи 14 мембранских модула побољшаних карактеристика одстрањивања соли типа <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 5.17 | Запремински проток пречишћене воде, степен корисности процеса и пад притиска услед трења система <i>RO</i> који садржи 14 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 5.18 | Степен одстрањивања соли из морске воде, концентрације соли у пречишћеној води система <i>RO</i> који садржи 14 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 ES</i> са морском водом ниске концентрације соли |
| Слика 5.19 | Степен одстрањивања соли из морске воде, температура морске воде у систему <i>RO</i> који садржи 14 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 5.20 | Специфична потрошња система <i>RO</i> који садржи 14 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 ES</i> у оперативном процесу са морском водом високе концентрације соли |
| Слика 5.21 | Запремински проток пречишћене воде, степен корисности процеса и пад притиска услед трења система <i>RO</i> који садржи 14 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 5.22 | Степен одстрањивања соли из морске воде, концентрације соли у пречишћеној води система <i>RO</i> који садржи 14 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 ES</i> са морском водом високе концентрације соли |

| | |
|------------|--|
| Слика 5.23 | Специфична потрошња енергије и трансмембрански притисак система <i>RO</i> који садржи 14 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 R</i> са морском водом ниске концентрације соли |
| Слика 5.24 | Запремински проток пречишћене воде, степен корисности процеса и пад притиска услед трења система <i>RO</i> који садржи 14 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 R</i> са морском водом ниске концентрације соли |
| Слика 5.25 | Степен одстрањивања соли из морске воде, концентрације растворених соли у пречишћеној води система <i>RO</i> који садржи 14 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 R</i> |
| Слика 5.26 | Специфична потрошња енергије система који садржи 14 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 R</i> и трансмембрански притисак морске воде високе концентрације соли |
| Слика 5.27 | Запремински проток пречишћене воде, степен корисности процеса и пад притиска услед трења система <i>RO</i> који садржи 14 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 R</i> |
| Слика 5.28 | Степен одстрањивања соли из морске воде, концентрације растворених материја у пречишћеној води система <i>RO</i> који садржи 14 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 R</i> |
| Слика 5.29 | Степен одстрањивања соли из морске воде према температури морске воде система <i>RO</i> који садржи 14 мембранских модула типа <i>QFX SW 75 R</i> |
| Слика 5.30 | Трансмембрански притисак, пад притиска услед трења кроз систем и концентрације соли у пречишћеној води пре и после хемијског процеса чишћења мембрана подсистема бр. 1 |
| Слика 5.31 | Трансмембрански притисак, пад притиска услед трења кроз систем и концентрације соли у пречишћеној води, пре и после хемијског процеса чишћења мембрана подсистема бр.2 |
| Слика 5.32 | Трансмембрански притисак, пад притиска услед трења кроз систем и концентрације соли у пречишћеној води, пре и после хемијског процеса чишћења мембрана модификованим <i>CIP</i> поступком, подсистема бр. 2 |
| Слика 5.33 | Зависност између електричне проводљивости и концентрације соли у води |
| Слика 5.34 | Површине појединачних слојева мембране: а) предњи елемент б) средњи елемент и в) задњи елемент, (смер струјања воде је са леве на десну страну) |
| Слика 5.35 | Мембрана са приказаним површинама за узимање узорака материјала |
| Слика 5.36 | Калибрисане посуде за мерење масе прикупљених узорака материјала са површине слојева мембране |
| Слика 5.37 | Маса суве материје сведена на површину мембране од предњег до задњег положаја мембранских елемената у посуди под притиском |
| Слика 5.38 | Електронским микроскопом скенирана површина одводног дела средњег елемента мембране |

| | |
|-------------|--|
| Слика 5.39 | Експериментално постројење <i>RO</i> са <i>NanoH₂O</i> мембранским модулима пречника 100 mm |
| Слика 5.40 | Запремински проток пречишћене воде и степен одстрањивања соли система <i>RO</i> који садржи <i>NanoH₂O</i> мембр. елементе пречника 100 mm |
| Слика 5.41 | Пропустљивост и степен одстрањивања соли система <i>RO</i> који садржи <i>QFX</i> мембранске елементе |
| Слика 5.42 | Запремински проток пречишћене воде и расподела степена корисности процеса по мемб. модулима по аксијалној дужини мембранских посуда |
| Слика 6.1 | Упоредни приказ аритметичке средине, стандардног одступања и коефицијента варијације, за експериментални, сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за све 3 мембране |
| Слика 6.2.а | Упоредни приказ аритметичке средине, стандардног одступања и коефицијента варијације, за експериментални, сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за мембрану <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 6.2.б | Упоредни приказ аритметичке средине, стандардног одступања и коефицијента варијације, за експериментални, сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за мембрану <i>QFX SW 75 R</i> |
| Слика 6.2.в | Упоредни приказ аритметичке средине, стандардног одступања и коефицијента варијације, за експериментални, сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за мембрану <i>DOW SW 30</i> |
| Слика 6.3.а | Упоредни приказ одступања сопственог теоријског модела од експерименталних резултата за сваки појединачни експеримент за све 3 мембране |
| Слика 6.3.б | Упоредни приказ одступања теоријског модела аутора <i>Mulder</i> од експерименталних резултата за сваки појединачни експеримент за све 3 мембране |
| Слика 6.3.в | Упоредни приказ одступања теоријског модела аутора <i>Taylor & Zhao</i> од експерименталних резултата за сваки појединачни експеримент за све 3 мембране |
| Слика 6.3.г | Упоредни приказ одступања теоријског модела аутора <i>Vakili-Nazhaad</i> од експерименталних резултата за сваки појединачни експеримент за све 3 мембране |
| Слика 6.4.а | Графички приказ одступања резултата сопственог теоријског модела од експерименталних резултата за сваки појединачни експеримент за све 3 мембране |
| Слика 6.4.б | Графички приказ одступања теоријског модела аутора <i>Mulder</i> од експерименталних резултата за сваки појединачни експеримент за све 3 мембране |
| Слика 6.4.в | Графички приказ одступања теоријског модела аутора <i>Vakili-Nazhaad</i> од експерименталних резултата за сваки појединачни експеримент за све 3 мембране |

| | |
|-------------|--|
| Слика 6.4.г | Графички приказ одступања теоријског модела аутора <i>Taylor & Zhao</i> од експерименталних резултата за сваки појединачни експеримент за све 3 мембране |
| Слика 7.1 | Шематски приказ фотонапонске ћелије |
| Слика 7.2 | Фотонапонска ћелија и приказ еквивалентног струјног кола |
| Слика 7.3 | Криве јачине струје, напона и снаге соларне ћелије |
| Слика 7.4 | Типичне карактеристике јачине струје и напона силицијумске ћелије, ефекти нивоа осветљења и отпорност оптерећења |
| Слика 7.5 | Максимална теоријска ефикасност конверзије соларне енергије као функција разлике енергије између проводне и валентне зоне полупроводника (енергетски процеп) |
| Слика 7.6 | Дијаграм конверзије снаге двослојне фотонапонске ћелије |
| Слика 7.7 | Карактеристике две истоветне фотонапонске ћелије серијски везане |
| Слика 7.8 | Карактеристике две истоветне фотонапонске ћелије паралелно везане |
| Слика 7.9 | Карактеристике две различите фотонапонске ћелије везане а) редно и б) паралелно |
| Слика 7.10 | Дијаграми Сунчевог зрачења на панелу са различитим угловима: а) Часовно Сунчево зрачење, б) Дневно Сунчево зрачење |
| Слика 7.11 | Шематски приказ фотонапонског система |
| Слика 7.12 | Месечне вредности укупног зрачења на хоризонталну раван на локацији Тампа Флорида, САД |
| Слика 7.13 | Часовни индекс прозрачности на локацији Тампа Флорида, САД |
| Слика 7.14 | Часовно укупно Сунчево зрачење на локацији Тампа Флорида, САД |
| Слика 7.15 | Часовно укупно Сунчево зрачење на нагнуту раван (црвена боја) и на хоризонталну раван (зелена боја) на локацији Тампа Флорида, САД |
| Слика 7.16 | Месечне средње дневне вредности укупног Сунчевог зрачења на нагнуту раван на локацији Тампа Флорида, САД |

Прилози:

| | |
|-----------|---|
| Слика 1.а | Упоредни приказ резултата сопственог теоријског модела и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 1.б | Упоредни приказ резултата сопственог теоријског модела и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 R</i> |
| Слика 1.в | Упоредни приказ резултата сопственог теоријског модела и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>DOW SW 30</i> |
| Слика 2.а | Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора <i>MulderM.</i> и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 ES</i> |

| | |
|-----------|--|
| Слика 2.б | Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора <i>Mulder M.</i> и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 R</i> |
| Слика 2.в | Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора <i>Mulder M.</i> и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>DOW SW 30</i> |
| Слика 3.а | Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора <i>Taylor & Zhao</i> и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 3.б | Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора <i>Taylor & Zhao</i> и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 R</i> |
| Слика 3.в | Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора <i>Taylor & Zhao</i> и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>DOW SW 30</i> |
| Слика 4.а | Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 4.б | Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 R</i> |
| Слика 4.в | Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>DOW SW 30</i> |
| Слика 5.а | Упоредни приказ одступања резултата сопственог теоријског модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 5.б | Упоредни приказ одступања резултата сопственог теоријског модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 R</i> |
| Слика 5.в | Упоредни приказ одступања резултата сопственог теоријског модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>DOW SW 30</i> |
| Слика 6.а | Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора <i>Mulder M</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 6.б | Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора <i>Mulder M.</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 R</i> |

| | |
|-----------|---|
| Слика 6.в | Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора <i>Mulder M.</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>DOW SW 30</i> |
| Слика 7.а | Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора <i>Taylor & Zhao</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 7.б | Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора <i>Taylor & Zhao</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 R</i> |
| Слика 7.в | Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора <i>Taylor & Zhao</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>DOW SW 30</i> |
| Слика 8.а | Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 8.б | Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 R</i> |
| Слика 8.в | Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>DOW SW 30</i> |
| Слика 9.а | Збирни дијаграм одступања резултата сопственог теоријског модела и теоријских модела аутора <i>Mulder M.</i> , <i>Taylor & Zhao</i> и <i>Vakili-Nezhaad</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за сва 3 мембранска модула |
| Слика 9.б | Збирни дијаграм одступања резултата сопственог теоријског модела и теоријских модела аутора <i>Mulder M.</i> , <i>Taylor & Zhao</i> и <i>Vakili-Nezhaad</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Слика 9.в | Збирни дијаграм одступања резултата сопственог теоријског модела и теоријских модела аутора <i>Mulder M.</i> , <i>Taylor & Zhao</i> и <i>Vakili-Nezhaad</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>QFX SW 75 R</i> |
| Слика 9.г | Збирни дијаграм одступања резултата сопственог теоријског модела и теоријских модела аутора <i>Mulder M.</i> , <i>Taylor & Zhao</i> и <i>Vakili-Nezhaad</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул <i>DOW SW 30</i> |

| | |
|-----------|--|
| Слика 9.д | Дијаграм фреквентности одступања резултата сопственог теоријског модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сва 3 мембранска модула |
| Слика 9.ђ | Дијаграм фреквентности одступања резултата теоријског модела аутора <i>Mulder M.</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сва 3 мембранска модула |
| Слика 9.е | Дијаграм фреквентности одступања резултата теоријског модела аутора <i>Taylor & Zhao</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сва 3 мембранска модула |
| Слика 9.ж | Дијаграм фреквентности одступања резултата теоријског модела аутора <i>Vakili - Nezhaad</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сва 3 мембранска модула |

СПИСАК ТАБЕЛА

| Ред.број | Назив табеле |
|------------|--|
| Табела 2.1 | Процењена специфична потрошња енергије у процесима директне осмозе |
| Табела 2.2 | Трошкови десалинизације <i>RO</i> |
| Табела 2.3 | Доприноси и недостаци постојећих истраживања |
| Табела 5.1 | Оперативне карактеристике <i>NanoH₂O</i> мембрана коришћених у експерименталном истраживању |
| Табела 5.2 | Резултати процеса одстрањивања соли из морске воде система <i>RO</i> који садржи <i>QFX</i> мембранске модуле и комерцијално заступљене мембранске модуле <i>DOW</i> |
| Табела 5.3 | Приказ концентрација појединачних материја у морској води |
| Табела 5.4 | Карактеристике мембрана које су коришћене у прорачунима програмског пакета <i>Q+ - Projection software</i> |
| Табела 5.5 | Резултати прорачуна за одабране једнопролазне мембранске конфигурације постројења <i>SWRO</i> |
| Табела 5.6 | Збирни резултати прорачуна двопролазних система <i>SWRO</i> |
| Табела 5.7 | Појединачни резултати прорачуна двопролазних система <i>SWRO</i> по пролазима |
| Табела 5.8 | Поређење инвестиционих трошкова система <i>SWRO</i> капацитета 100000 m ³ /дан |
| Табела 6.1 | Преглед одабраних математичких модела других аутора за поређење са сопственим резултатима |
| Табела 6.2 | Упоредни приказ аритметичке средине, стандардног одступања и коефицијента варијације, за експериментални, сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за све 3 мембране |
| Табела 6.3 | Упоредни приказ аритметичке средине, стандардног одступања и коефицијента варијације, за експериментални, сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за мембрану <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Табела 6.4 | Упоредни приказ аритметичке средине, стандардног одступања и коефицијента варијације, за експериментални, сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за мембрану <i>QFX SW 75 R</i> |
| Табела 6.5 | Упоредни приказ аритметичке средине, стандардног одступања и коефицијента варијације, за експериментални, сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за мембрану <i>DOW SW 30</i> |

| | |
|------------|---|
| Табела 6.6 | Упоредни приказ Пирсонових коефицијента просте линеарне корелације, за сопствени теоријски модел и теоријске модела других аутора за све 3 мембране |
| Табела 6.7 | Израчуната збирна апсолутна одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за све мембранске модуле <i>QFX SW 75 ES</i> , <i>QFX SW 75 R</i> и <i>DOW SW 30</i> |
| Табела 6.8 | Упоредни приказ средње разлике, стандардне грешке, коефицијента значајности теоријских модела према експерименталним резултатима за све 3 мембране по методи анализе варијанси <i>Anova</i> |
| Табела 7.1 | Нивои енергије електрона за материјале фотонапонских ћелија |
| Табела 1.а | Експериментални резултати запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул: <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Табела 1.б | Експериментални резултати запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул: <i>QFX SW 75 R</i> |
| Табела 1.в | Експериментални резултати запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул: <i>DOW SW 30</i> |
| Табела 2.а | Резултати запреминског протока пречишћене воде сопственог теоријског модела и теоријских модела аутора <i>Mulder, Taylor & Zhao</i> и <i>Vakili-Nezhaad</i> за мембрански модул: <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Табела 2.б | Резултати запреминског протока пречишћене воде сопственог теоријског модела и теоријских модела аутора <i>Mulder, Taylor & Zhao</i> и <i>Vakili-Nezhaad</i> за мембрански модул: <i>QFX SW 75 R</i> |
| Табела 2.в | Резултати запреминског протока пречишћене воде сопственог теоријског модела и теоријских модела аутора <i>Mulder, Taylor & Zhao</i> и <i>Vakili-Nezhaad</i> за мембрански модул: <i>DOW SW 30</i> |
| Табела 3.а | Израчуната збирна одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за све мембранске модуле <i>QFX SW 75 ES</i> , <i>QFX SW 75 R</i> и <i>DOW SW 30</i> |
| Табела 3.б | Израчуната одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул <i>QFX SW 75 ES</i> |
| Табела 3.в | Израчуната одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул <i>QFX SW 75 R</i> |
| Табела 3.г | Израчуната одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул <i>DOW SW 30</i> |
| Табела 4.а | Израчуната апсолутна одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул <i>QFX SW 75 ES</i> |

| | |
|------------|--|
| Табела 4.б | Израчуната апсолутна одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул <i>QFX SW 75 R</i> |
| Табела 4.в | Израчуната апсолутна одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул <i>DOW SW 30</i> |
| Табела 5.а | Приказ фреквентности одступања резултата сопственог теоријског модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сва 3 мембранска модула |
| Табела 5.б | Приказ фреквентности одступања резултата теоријског модела аутора <i>Mulder</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сва 3 мембранска модула |
| Табела 5.в | Приказ фреквентности одступања резултата теоријског модела аутора <i>Taylor & Zhao</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сва 3 мембранска модула |
| Табела 5.г | Приказ фреквентности одступања резултата теоријског модела аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сва 3 мембранска модула |

1. УВОД

Овим радом представљено је истраживање термодинамичких процеса реверзибилне осмозе за одстрањивање соли из морске воде. Приказана је методологија пројектовања десалинизационог система реверзибилне осмозе воде према термодинамичким величинама стања морске воде, очекиваном квалитету и капацитету пречишћене воде и очекиваној енергетској ефикасности. Развијен је модел промене запреминског протока пречишћене воде и специфичне потрошње енергије система реверзибилне осмозе воде који узима у обзир утицај конфигурације мембранских подсистема, радних режима трансмембранског притиска, температуре и концентрације растворених материја у морској води, степен корисности процеса и карактеристика мембранске пропустљивости. У циљу верификације постављеног модела и одређивања непознатих параметара, осмишљена је и израђена лабораторијска инсталација за одстрањивање соли из морске воде. У експериментима су коришћене три врсте мембранских модула различитих својстава пропустљивости и степена одстрањивања соли. Одабране полупропусне мембране подвргнуте су истим радним режимима, са притиском морске воде у опсегу од $32 \cdot 10^5$ до $55 \cdot 10^5$ Pa, концентрацији растворених материја у морској води у опсегу од 27500 до 40000 mg/l, температури морске воде у опсегу од 15 до 30°C и степену корисности процеса у опсегу од 42% до 51%.

Спроведена истраживања базирана су на претпоставкама да:

- термодинамичке величине стања морске воде битно утичу на процес одстрањивања соли,
- конфигурација мембранских елемената утиче на енергетску ефикасност система,
- коришћењем високопропусних мембрана је могуће остварити радне процесе у оквиру термодинамичких ограничења,
- у појединим случајевима и временским интервалима рада процеса могуће је занемарити параметре таложења материја на површини мембрана.

Анализиран је утицај трансмембранског притиска, температуре, концентрације растворених материја у морској води и степена корисности процеса. Резултати истраживања су потврдили да концентрација растворених материја у морској води и степен корисности процеса имају значајан утицај на специфичну потрошњу енергије система, док температура морске воде значајно утиче на квалитет пречишћене воде. Варирањем трансмембранског притиска и степена корисности процеса могуће је остварити веће протоке уз истовремено задржавање захтеваног нивоа квалитета пречишћене воде.

Резултати истраживања указују на могућност повезивања и обједињавања утицајних параметара десалинизационог процеса реверзибилне осмозе воде јединственим моделом. У циљу верификације теоријских модела извршено је поређење резултата сопственог модела запреминског протока пречишћене воде са резултатима спроведеног сопственог експерименталног истраживања, као и са моделима других аутора.

Разматран је развој хибридних мембранских конфигурација у циљу смањења укупне потрошње енергије и остваривања високог квалитета пречишћене воде. Истовременим коришћењем два типа мембранских модула различитих својстава пропустљивости, услед равномерне расподеле протока по мембранским модулима, остварене су предности у погледу квалитета пречишћене воде и специфичне потрошње енергије процеса. У циљу додатног смањивања специфичне потрошње енергије приказани су аспекти интегрисања система реверзибилне осмозе воде са фотонапонским ћелијама. Симулационим прорачунима приказана је студија изводљивости интеграције фотонапонских енергетских система са десалинизационим системом *RO* морске воде за географску локацију Тампа, Флорида, САД.

Научни допринос ове докторске тезе се пре свега огледа у једном свеобухватном приступу у развоју модела запреминског протока пречишћене воде у зависности од термодинамичких величина стања морске воде и радних режима процеса реверзибилне осмозе. Битна карактеристика предложеног модела је његова општост, која се огледа у примени низа режима рада модела за симулацију испитиваних високопроточних мембрана и других мембранских елемената сличних карактеристика. Анализом показатеља енергетске ефикасности процеса

одстрањивања соли из морске воде у десалинизационим системима реверзибилне осмозе, могуће је предвидети и евентуалне кофигурационе измене мембранских елемената које би довеле до побољшања рада система.

Добијени су нови теоријски и експериментални резултати у недовољно истраженој области, који омогућавају боље разумевање процеса и појава у систему. Ови резултати су значајни за предвиђање реалног понашања система и пружају могућност оптимизације рада система. Створена је добра подлога за даља истраживања која могу довести до побољшања процеса одстрањивања соли из морске воде и повећања енергетске ефикасности система.

2. ПОСТАВКА ПРОБЛЕМА ИСТРАЖИВАЊА И ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

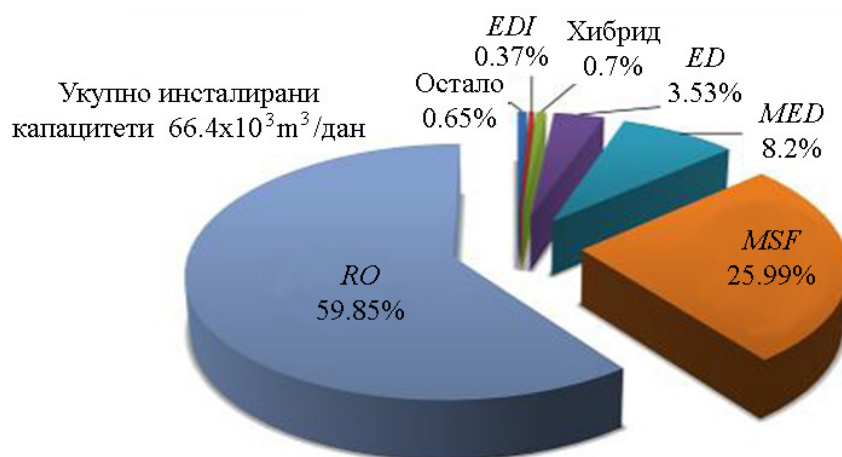
2.1 Приказ и карактеристике процеса одстрањивања соли из морске воде

Вода је неопходна за живот и представља један од наших најдрагоценијих ресурса. Међутим, она истовремено представља ресурс коме се не придаје довољно пажње и значаја. Земља поседује $1382 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ воде, док су одрживи капацитети пијаће воде погодни за људску употребу мањи од једног процента од наведене количине [1]. Поред тога, сушни климатски услови у многим деловима света додатно смањују расположиве капацитете воде. Ови услови су приморали снабдеваче да иницирају промене и иновације у начину снабдевања водом, коришћењем нетрадиционалних извора воде, као што су морска вода и вода доступна из других извора (реке, језера и сл.).

Са даљим растом светске популације, као и са климатским променама, очекује се погоршање квалитета и дефицит слатководних извора [1],[2],[3],[4]. Употребљавани су различити приступи у циљу повећања доступности залиха пијаће воде, притом водећи рачуна о очувању воде, рециклажи, повећању ефикасности коришћења воде и десалинизацији. Индустриска примена десалинизационе технологије реверзибилне осмозе (*RO*) воде представља значајну компоненту пројеката од стратешког значаја у великом броју земаља (Сингапур, Аустралија, Сједињене Америчке Државе, Саудијска Арабија, Уједињени Арапски Емирати, Израел и Шпанија). *RO* као мембрански процес десалинизације воде представља битан сегмент технологије за производњу пијаће воде, као и код побољшања капацитета прераде воде за пољопривредне, комуналне и индустријске употребе [5],[6],[7],[8]. Реверзибилна осмоза је примарна технологија десалинизације. Практикује се у комбинацији са вишефазном фракцијском десалинизацијом (*MSF*), вишеструком дестилацијом (*MED*), компресијском дестилацијом, електро-дијализом (*ED*) и реверзибилном електродијализом (*EDR*).

Претходних година су биле предлагане и друге десалинизационе технологије, у којима је коришћена мембранска дестилација (*MD*) и процес директне осмозе (*FO*). У погледу истог квалитета пречишћене воде, реверзибилна осмоза се у већини случајева показала енергетски најефикаснијом. Специфична потрошња енергије (*SEC*) била је у распону од 2 до 4 kWh/m³, у зависности од перформанси и капацитета постројења, квалитета морске воде и температуре [4],[9].

На развој технологије мембранске сепарације за прераду воде утицали су строги захтеви у погледу квалитета воде у развијеним државама, као и мањак воде у регионима широм света. Заступљеност постојећих десалинизационих технологија прераде воде приказана је на слици 2.1.

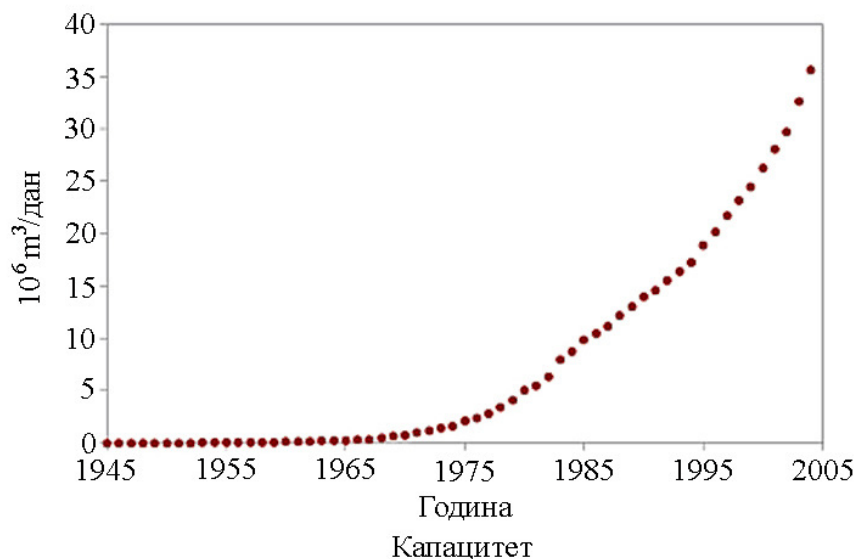


Слика 2.1. Приказ удела укупно израђених десалинизационих постројења у свету, 2011 [3]

Десалинизација морске воде представља технологију која и има примену у многим земљама света. Инвестициони трошкови и трошкови експлоатације су високи што ограничава коришћење само у развијеним деловима света. Развојем десалинизационих технологија значајно су смањени трошкови производње пијаће воде, чиме је тржиште доживело битан напредак током неколико последњих деценија, слика 2.2. Десалинизација је постала економски одржива технологија за производњу пијаће воде у многим приобалним деловима света.

Реверзибилна осмоза (*RO*) је процес којим се успоставља повећање притиска флуида на страни мембране која садржи већу концентрацију растворених материја у циљу проласка флуида кроз полупропустљиву мембрану. Полупропустљива мембрана поседује својства веће пролазности молекула чисте воде, у односу на

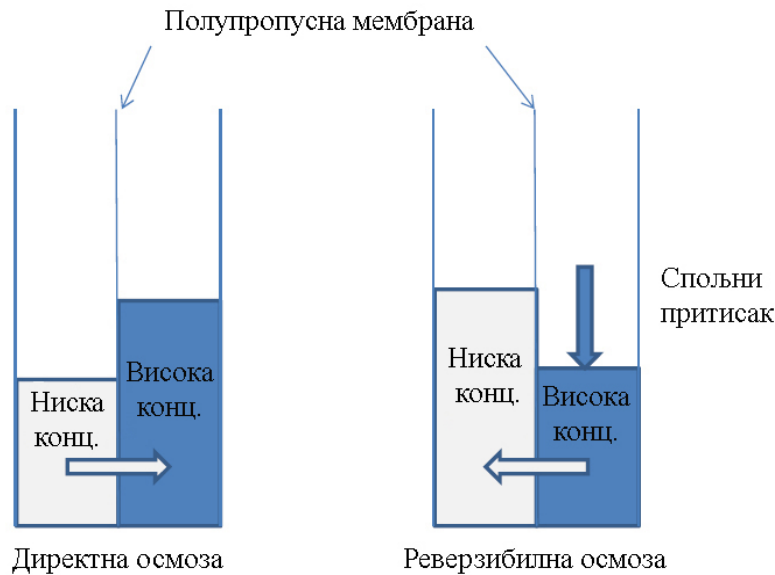
воду која садржи растворене материје. На овај начин се врши одстрањивање соли из морске воде уз помоћ *RO* и као крајњи резултат добија се пречишћена вода са малим садржајем соли.



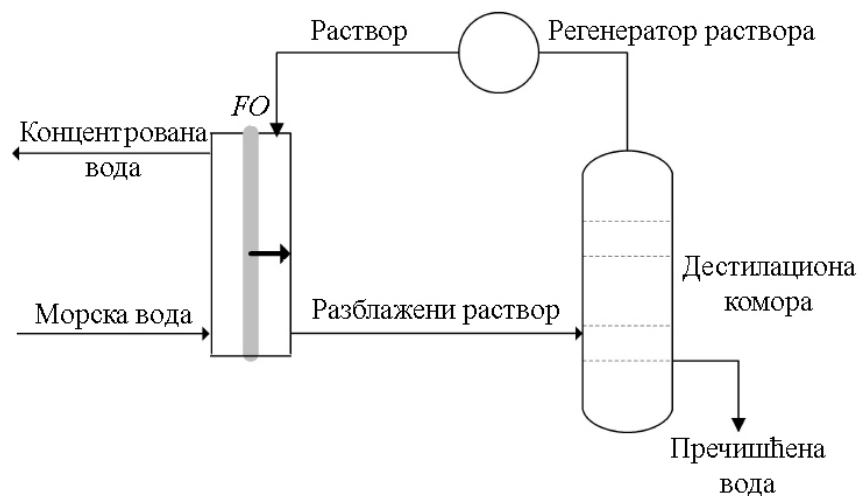
Слика 2.2. Приказ кумулативних десалинизационих производних капацитета по годинама у свету [4]

Као што је приказано на слици 2.3, процес реверзибилне осмозе захтева повишење притиска на страни мембране са сланом водом, док директна осмоза (*FO*) представља другачији мембрански процес при коме молекули раствора воде са ниском концентрацијом растворених материја пролазе кроз мембрану у смеру раствора са већом концентрацијом растворених материја [4]. Одстрањивање активних хемијских састојака раствора се постиже дестилацијом, као што је приказано на слици 2.4, чиме се повећавају енергетски трошкови процеса *FO*. Потребно је напоменути да је код широко примењиваног процеса *FO*, у којем се амонијум-карбонат користи за раствор [10], потребна велика количина топлоте за одвајање активних продуката раствора (нпр. амонијака и CO_2 из раствора за испаравање великих запремина воде). Скорашња истраживања [7],[11], која су приказана у табели 2.1, показују да је специфична потрошња енергије у процесу десалинизације *FO* око четири пута већа него у процесу десалинизације *RO*. У циљу смањења трошкова регенерисања раствора, предложено је да се искористе реагенси-супстанце са магнетним својствима како би се повећао осмотски притисак [12], међутим, касније уклањање магнетних реагенса употребом магнетног поља

није показало добре резултате, нити је остварен ниво захтеваног уклањања активних супстанци из раствора, па самим тим није остварено смањење енергетских захтева процеса FO .



Слика 2.3. Процес осмозе: директна осмоза (FO) и реверзибилна осмоза (RO)



Слика 2.4. Директна осмоза праћена дестилацијом и регенерацијом раствора [10]

Развој мембрана високих перформанси средином 2000-их година са малом пропустљивошћу соли [13] изазвао је велико интересовање, јер је уочен потенцијал за смањење потрошње енергије у процесу десалинизације RO [13],[14],[15],[16]. Трошкови производње пречишћене воде у десалинизационом процесу RO састоје

се од трошкова: енергије, опреме, мембрана, управљања концентрованом водом, рада и одржавања. Укупни трошкови десалинизације морске воде *RO* су приказани у табели 2.2, где потрошња електричне енергије заузима највећи удео [17],[18],[19], који може да достигне и до приближно 58% од укупних трошкова производње пречишћене воде, слика 2.5.

Табела 2.1. Процењена специфична потрошња енергије у процесима директне осмозе [11]

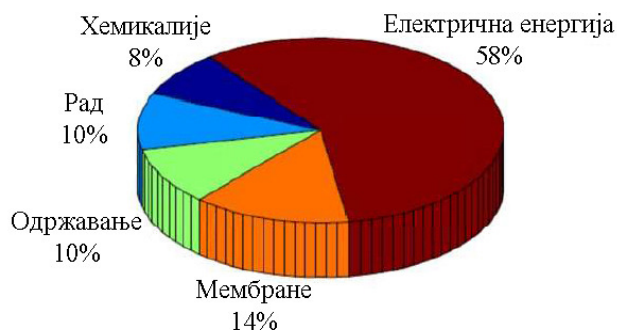
| Операција | Процењена специфична потрошња енергије (kWh/m ³ воде) | Напомене |
|--|--|---|
| Припрема радног флуида воде и одлагање концентрата | 1,7 | Транспорт пумпом, филтрација (слично као и у постројењу <i>RO</i>) |
| Транспорт воде пумпом и раствора кроз мембране | 0,3 | |
| Процес испаравања воде | 3 | Потребна електрична енергије од 13 kWh/t испарене супстанце |
| Хлађење воде у дестилационој комори | 3 | Енергија пумпе |
| Хлађење водом апсорбованих гасова ослобођених из раствора | 4 | Енергија пумпе |
| Уклањање некондензованих гасова вакуум пумпом | 4 | |
| Преношење топлотне енергије из десализационе коморе флуиду воде за хлађење и коришћење у даљим процесима | 3 | Уклањање топлотне енергије из 250 kg паре. |
| Укупно | 13 | ±20% грешка процене |

Као што је наведено у табели 2.2 и приказано на слици 2.5, трошкови електричне енергије десалинизације морске воде *RO* су од 10 до 20 пута већи од минималних теоријских енергетских трошкова десалинизације морске воде *RO*, где је предвиђено 0,7 kWh/m³ (за процес са трансмембранским притиском морске воде од $p = 2,5 \cdot 10^6$ Pa [20]). Потребно је напоменути да трансмембрански притисак представља разлику притисака морске воде и пречишћене воде. Специфична потрошња енергије система *RO* у великој мери зависе од степена корисности процеса (односа протока пречишћене воде и протока морске воде [21]), повраћаја

енергије високог притиска концентроване воде [21], губитка енергије услед трења у елементима *RO* и цевоводима, степена корисности пумпе, радних режима процеса (температуре, протока, притиска) и геометријске конфигурације постројења у погледу расподеле мембранских модула.

Табела 2.2. Трошкови десалинизације *RO* [22]

| Локација постројења | Врста воде | Дневна производња (m ³) | Просечни трошак (\$/m ³) (2014) |
|--------------------------------|------------|-------------------------------------|---|
| <i>Madwar and Tarazi study</i> | Отпадна | 10000 | 0,54 |
| <i>Ashkelon, Israel</i> | Морска | 273973 | 0,61 |
| <i>Brownsville, USA</i> | Речна | 94635 | 0,73 |
| <i>Corpus Christi, USA</i> | Морска | 94635 | 1,01 |
| <i>Madwar and Tarazi study</i> | Морска | 10000 | 1,18 |
| <i>Freeport, USA</i> | Речна | 37854 | 1,20 |

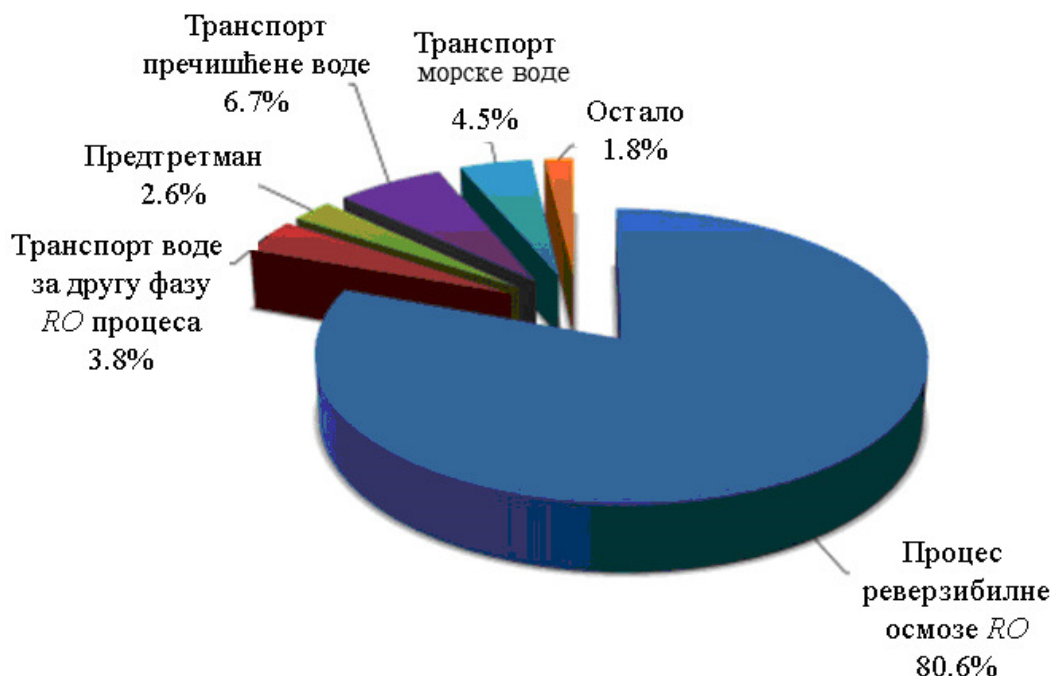


Слика 2.5. Структура трошкова десалинизације морске воде процесом реверзибилне осмозе [22]

Расподела енергије за типичан двофазни процес реверзибилне осмозе (са два нивоа) је приказана на слици 2.6. Са поменуте слике је евидентно да процес реверзибилне осмозе користи највећи део електричне енергије у десалинизационом постројењу. Због тога, смањење потрошње електричне енергије током процеса реверзибилне осмозе може водити до значајних уштеда трошкова за цело постројење.

Код мембранских десалинизационих технологија, пролазак воде кроз мембрану одвија се у три фазе:

- апсорпција воде по површини мембране,
- пролазак кроз активне слојеве мембране,
- долазак на слој мембране који прикупља пречишћену воду.



Слика 2.6. Удео енергетских захтева у двофазном постројењу реверзибилне осмозе [7]

У десалинизационим системима који се користе за производњу пијаће воде, значајни трошак процеса *RO* представља управљање добијеном концентрованој водом, након издвајања продукта пречишћене воде [3],[4],[23],[24]. У унутрашњим урбаним локацијама, опције одлагања концентроване воде су често ограничене и скупе [25]. Термички системи испаравања и кристализације, познати као технологија нултог - пражњења течности (*ZLD*), су у стању да трансформишу концентровану воду у суви концентрат, али су често енергетски недостижни за системе *RO* великих капацитета и протока [4],[25],[26],[109]. Сходно томе, исплативи процеси десалинизације морске воде захтевају висок ниво степена корисности процеса *RO* (90-95%) при производњи питке воде у циљу смањивања остварене количине концентроване воде. Процесом реверзибилне осмозе морске воде поред соли уклањају се хемијска једињења чији су молекули већи од молекула воде (магнезијум, хлор, олово, калцијум итд.). Међутим, са повећањем степена корисности процеса, концентрације растворених минералних материја ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, BaSO_4 , SrSO_4 , CaCO_3 , SiO_2 , итд.) у концентрованој води могу достићи концентрације изнад граница растворљивости. Као резултат, долази до таложења материја у мембранском слоју и заптивања површина мембране и тиме до смањења

учинка мембране (смањења проласка воде кроз мембрану) што директно утиче на повећање трошкова десалинизације [27],[28]. Стога, да би се остварио већи степен корисности процеса *RO*, неопходно је смањити концентрације растворених материја (нпр. калцијум, баријум, сулфат, итд.) испод нивоа при коме настаје таложење материја у мембранском слоју. Интеграцијом процеса *RO* са теоријом таложења материја, могуће је остваривање наведеног циља [27],[29]. Користећи овај приступ, током примарног пролаза воде систем *RO* одстрањује соли из морске воде до нивоа концентрација материја које су испод прага таложења материја у мембранском слоју. Повећањем температуре морске воде смањује се ефекат таложења материја у мембранском слоју док се истовремено повећава концентрација растворених материја у пречишћеној води. Повећањем притиска морске воде повећава се вредност протока пречишћене воде што поспешује стварања наслага материја у мембранском слоју. Каснијим процесом деминерализације (*ICD*) концентроване воде врши се одстрањивање материја у циљу припреме концентроване воде за даљу обраду. Деминерализована концентрована вода се подвргава даљој десалинизацији процесом *RO*, чиме се повећава степен корисности процеса одсољавања морске воде [27]. Напомиње се да су у десалинизационим процесима *RO* специфична потрошња енергије (потребна електрична енергија процеса сведена на јединицу запремине пречишћене воде) директно је сразмерна степену корисности процеса [30]. У циљу остваривања минималних енергетских захтева, потребно је контролисати радне режиме, процеса *RO* воде, уз истовремено спречавање заптивања слојева мембрана.

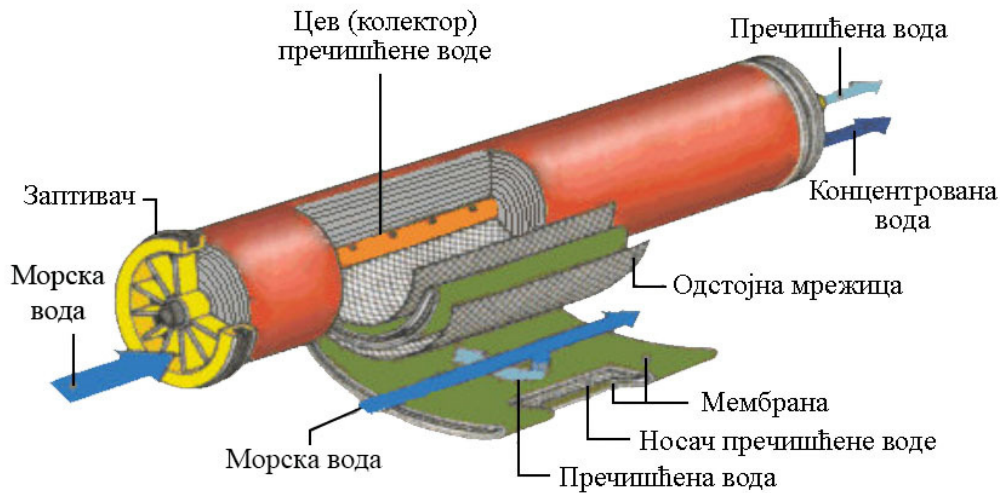
Потребно је нагласити да садржај хлора у концентрацији већој од 1 mg/l у морској води, негативно утиче на процес реверзибилне осмозе воде јер оштећује полиамидни слој мембране, након чега долази до повећаног проласка соли кроз мембрану, а самим тим и до повећања концентрације растворених соли у пречишћеној води. Ефикасност процеса *RO* зависи од хемијског састава воде, концентрације растворених материја, температуре воде и физичких својстава таложења материја у мембранском слоју. Радни режими процеса *RO* воде морају имати интегрисане контролне алгоритме прилагођавања тренутним променама термодинамичких величина стања морске воде у циљу повећања енергетске ефикасности процеса одсољавања воде. Концентрација растворених материја у

морској води може варирати услед сезонских падавина (мешањем са подземним водама и сл.). Температура морске воде је такође променљива величина и зависи од атмосферских услова и временског интервала дана. Оптималан и непрекидан процес *RO* у постројењима захтева правовремено подешавање радних услова на основу методологије оптимизације енергетских захтева уз константну контролу параметара процеса.

2.2 Опис проблема истраживања

Претходне студије о оптимизацији термодинамичких процеса одстрањивања соли из морске воде биле су усмерене на оцену зависности *SEC* од степена корисности процеса за један или неколико нормализованих протока морске воде и пречишћене воде. Међутим, минимални *SEC* није идентификована заједно са оптимизацијом у теоријским оквирима истраживања. Економска оправданост мембранске десалинизације зависи од оперативних трошкова при чему је удео енергије најзначајнији. Начини смањивања оперативних трошкова представљају значајан циљ при истраживању процеса *RO*.

Сагледавањем претходних теоријских приступа, смањивања потрошње енергије процеса *RO*, може се констатовати да ниједан са довољном сигурношћу не описује поступак десалинизације користећи модерне, високопропусне мембране ниског притиска и мембране нанофилтрације (*NF*). Приказ конструкционих компоненти мембранског модула процеса реверзибилне осмозе воде дат је на слици 2.7. Сходно томе, неопходно је представити модел процеса десалинизације који укључује термодинамичке величине стања морске воде, радне режиме својства мембранских модула, трошкове одлагања концентроване воде и примену уређаја за повраћај енергије. Овај приступ омогућиће оптимизацију једнофазних мембранских конфигурација према термодинамичким величинама стања морске воде, радним режимима и степену корисности процеса. Оптимизирани модели процеса требају се користити као основа за даље истраживање мембранских десалинизационих система.



Слика 2.7. Приказ конструкционих компоненти мембранског модула за процес реверзибилне осмозе воде

Њиховим интегрисањем у контролне алгоритме процеса *RO* могуће је развити интелигентан систем који је у стању да се аутоматски прилагоди промени термодинамичких величина стања и хемијског састава морске воде прилагођавањем радних режима са крајњим циљем остваривања максималне енергетске ефикасности.

2.2.1 Основни принципи једнофазног десалинizacionог процеса реверзибилне осмозе воде

Реверзибилна осмоза представља устаљену и често примењивану технологију десалинизације воде. Истраживањима су представљени интензивни напори за смањењем трошкова десалинизације *RO* у циљу повећања економске оправданости примене наведене технологије [1],[30],[32],[33]. Трошкови за производњу пречишћене воде у стандардном десалинizacionом постројењу *RO* углавном се састоје од трошкова коришћења енергије, опреме, мембрана, рада и одржавања [33],[34],[35],[36]. Потрошња енергије представља највећи део укупних трошкова десалинизације воде и може да достигне и до 58% од укупних трошкова производње пречишћене воде [17],[18],[19]. Трошкови енергије по запремини произведене пречишћене воде (специфична потрошња енергије или *SEC*) и директно зависе од вредности трансмембранског притиска (који износи од $8 \cdot 10^6$ Pa до $12 \cdot 10^6$ Pa за морску воду и у интервалу од $7 \cdot 10^5$ до $4 \cdot 10^6$ Pa за десалинизацију

воде из других извора који садрже мање вредности концентрације растворених материја.

Поред трансмембранског притиска на вредност специфичне потрошње енергије у процесу реверзибилне осмозе морске воде утиче велики број других фактора. Међу тим факторима су осмотски притисак, отпор струјању воде кроз мембрану, степен корисности пумпе, мотора, цевовода и неопходни процеси предтретмана морске воде. Истраживања, фокусирана на један или више наведених фактора, имају за циљ повећање енергетске ефикасности процеса реверзибилне осмозе морске воде и смањење укупних трошкова десалинизације воде.

Осмотски притисак је директно пропорционалан концентрацији растворених материја (*TDS*) у морској води која зависи од географске локације на којој се ресурс воде налази. Осмотски притисак се може представити Вант Хофовом (*Van't Hoff*) једначином [8]:

$$\pi = CRT \quad (2.1)$$

где су:

π - осмотски притисак, [Pa],

R - константа која износи 8314,5 [l·Pa/mol·K],

T - температура, [K],

C – концентрација растворених материја [mol/l].

Израз (2.1) је заснован на својствима идеалног раствора. Овај израз се може користити за приближно израчунавање вредности осмотског притиска у раствору. За процес реверзибилне осмозе, потребно је остварити притисак морске воде изнад вредности осмотског притиска, у циљу проласка воде кроз мембрану. Разлика притиска морске воде и притиска пречишћене воде представља трансмембрански притисак. Ефективним притиском процеса реверзибилне осмозе назива се разлика трансмембранског притиска и осмотског притиска.

При процесу реверзибилне осмозе морске воде постоји неколико врста отпора који се односе на струјање и пролазак воде кроз мембрану. Ови отпори смањују вредност ефективног притиска процеса реверзибилне осмозе. Примарни отпори који се јављају у системима реверзибилне осмозе морске воде укључују унутрашње отпоре мембране, мембранска запушења и концентрацијску поларизацију. Укупни отпор проласку воде кроз мембрану приказан је изразом (2.2) [5]:

$$R_{tot} = R_m + R_f \quad (2.2)$$

где су:

R_{tot} - укупан отпор проласку воде кроз мембрану, [Pa],

R_m - унутрашњи отпори проласку воде кроз мембрану, [Pa],

R_f - отпор проласку воде кроз запушени мембрански слој, [Pa].

Унутрашњи отпор проласку воде кроз мембрану је неодвојива карактеристика материјала мембране. Произвођачи мембрана модификују хемијска својства површи материјала мембране како би смањили отпор проласку воде. Овим приступом смањује се дебљина сепарационог слоја мембране.

Запушење мембране настаје постепеном акумулацијом контаминирајућих материја на површи или у порозној структури мембране, што за последицу има отежано струјање воде кроз мембрану и смањење степена корисности процеса RO [6]. Ова појава је проузрокована наслагама честица на површи или унутар мембранске структуре, које отежавају пролаз воде и реализацију процеса. Запушења доводе до повећане потрошње енергије, учесталијих потреба за отклањањем нечистоћа са површи мембрана употребом хемијских раствора што доводи до смањења животног века материјала мембране. Процеси хемијског отклањања нечистоћа са површи мембрана стварају додатне, значајне трошкове у смислу одржавања, времена ангажовања запослених, као и трошкове хемикалија и управљања отпадним раствором. Мембранска запушења проузрокована су формирањем таложних соли, формирањем колоидних органских материја и развојем биофилмова бактерија на површи и у самим мембранама [32].

Концентрацијска поларизација је феномен који се дешава у непосредној близини површи мембране током проласка воде кроз њу и акумулације пливајућих и растворених супстанци. Резултат је различитост концентрације растворених материја у околини мембране, уз највећу концентрацију на самој површи мембране. Ова појава значајно увећава осмотски притисак на површи мембране и у складу са тим повећава енергетске захтеве проласка воде кроз мембрану.

Претходна истраживања [37],[38],[39],[40] односила су се на оптимизацију појединачних трошкова у вези са степеном корисности процеса, енергетске ефикасности система, протоком пречишћене воде у зависности од

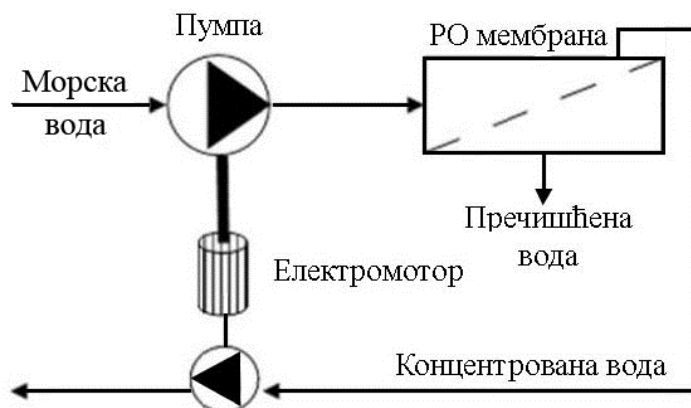
трансмембранског притиска. Напори да се смањи *SEC* подразумевали су повећање протока пречишћене воде, повећање трансмембранског притиска и протока морске воде [41],[42],[43],[44] и/или коришћењем унапређених пропусних својстава мембрана [13],[14],[15],[16]. Претходна истраживања су показала да степен корисности процеса производње пречишћене воде реверзибилном осмосом и нанофилтрацијом може бити побољшан оптимизацијом конфигурације модула (на пример, оптимизацијом висине проточног канала, висине канала пречишћене воде као и порозности материјала мембране [43],[110]). Развој високопропусних мембрана средином 2000-их година са малом пропусношћу соли [13] привукло је велику пажњу имајући у виду њихов потенцијал за смањење енергије система *RO* у производњи пречишћене воде [13],[14],[15],[16].

Важно је напоменути да су претходна истраживања, која су била усмерена на оптимизацији *SEC*, узимала су у разматрање зависност *SEC* у односу на степен корисности процеса за један или више нормализованих протока пречишћене воде. Претходни истраживачи ове тематике представили су минималну вредност *SEC* за један или више протока и за неколико вредности степена корисности процеса [15],[38],[42],[45]. Међутим, минимални *SEC* није идентификован у теоријским истраживањима. Сходно претходно наведеним разлозима, у овом раду посвећена је пажња истраживањима која се односе на проблемима оптимизације трошкова енергије процеса *RO* при коришћењу високо пропусних мембрана, развојем модела термодинамичких процеса одстрањивања соли из морске воде који обухвата параметре трансмембранског притиска, степена корисности процеса, температуре и концентрације растворених материја у морској води, за израчунавање запреминског протока пречишћене воде. Истраживања обухватају анализу примене уређаја за повраћај енергије, трошкова управљања концентрованом водом, аспекте мембранске пропустљивости у оквиру једнофазних конфигурација *RO*.

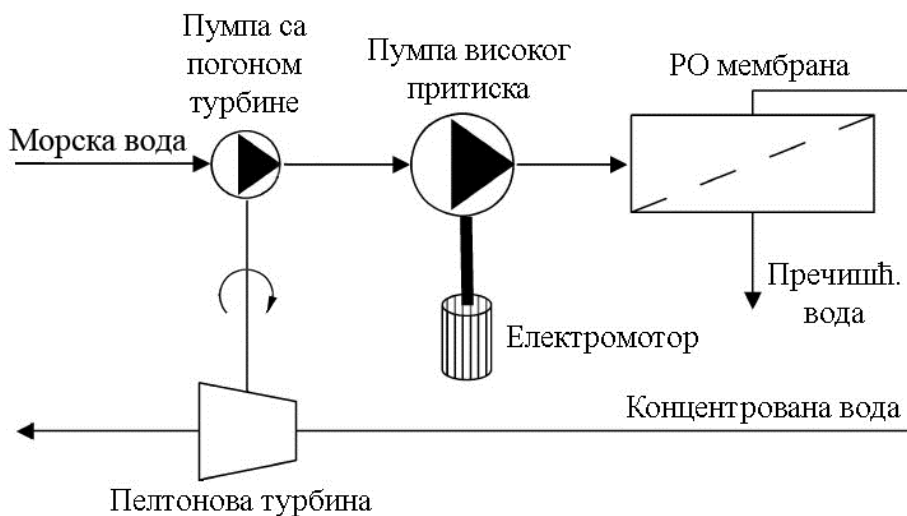
2.3 Модели подсистема реверзибилне осмозе воде за повраћај енергије

При процесу десалинизације путем *RO*, проток морске воде се раздваја на проток пречишћене воде и проток концентроване воде. Концентрована вода је под високим притиском због природе процеса реверзибилне осмозе. Да би се смањила

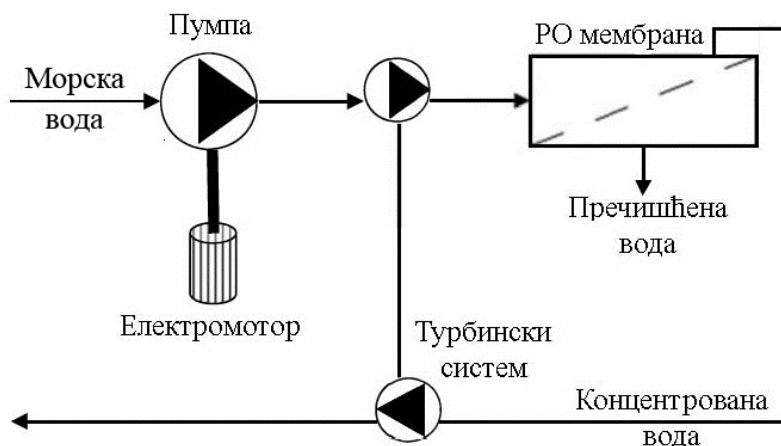
потрошња енергије по јединици запремине пречишћене воде, коришћење енергије високог притиска концентроване воде могуће је реализовати применом различитих уређаја за повраћај енергије (*ERD*). Ефекат примене уређаја за повраћај енергије на *SEC* је првобитно проучаван почетком шездесетих година XX века [38],[39]. *Avlonitis* и сарадници [46] проучавали су, слика 2.8, четири врсте *ERD* (тј. *Pelton* турбину, *Grundfos Pelton* турбину, турбо пуњач и измењивач енергије) и потврдили да је измењивач енергије имао највећи степен корисности (>90%) док је код осталих ефикасност мања од 90% [46]. Данас, *Manth* и сарадници [17] предлажу приступ повраћаја енергије, у којем је пумпа повезана са *Pelton* турбином, или се користи као међуфазна пумпа са сврхом повећања притиска за двофазне системе десалинизације слане воде.



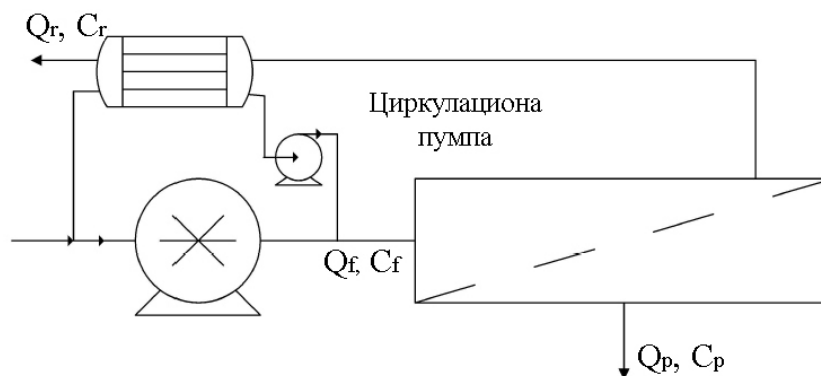
1) Пелтонов систем за повраћај енергије



2) Грундфос -Пелтонов систем за повраћај енергије



3) Систем за повраћај енергије помоћу турбо пуњача



4) Систем измењивача енергије

Слика 2.8. Приказ различитих система за повраћај енергије [46]

2.3.1 Термодинамичка ограничења десалинизационих процеса реверзибилне осмозе воде

Wilf [13], а касније *Spiegler* [47] и *Lachish* [48], предложили су радне режиме процеса реверзибилне осмозе воде засноване на минималној вредности трансмембранског притиска. Трансмембрански притисак приближно је једнак осмотском притиску концентроване воде, уз додатак вредности пада притиска услед струјања воде кроз мембрански модул. Предложеним радним режимима остварене су ниже вредности *SEC*. С тим у вези је дефинисано да је, у одсуству пада притиска у мембранском модулу, потребан минимални трансмембрански притисак када се употребљава високопропусна мембрана је врло близак осмотском

притиску концентроване воде RO , на излазу из мембранског модула [13],[49],[50],[51]. Ове високопропусне мембране омогућују остваривање захтеваних протока пречишћене воде на много нижим трансмембранским притисцима, слика 2.9.б, у поређењу са мембранама претходних технолошких решења, слика 2.9.а, приближавајући се термодинамичкој равнотежи (на излазу модула) при чему осмотски притисак концентроване воде има приближне вредности трансмембранском притиску. Наведено је да ће се услов минималног трансмембранског притиска, за потребу најнижих енергетских захтева, примењивати и у случају када се узме у обзир појава концентрацијске поларизације на површи мембране. Потребан трансмембрански притисак заснован је на осмотском притиску на излазу из мембранског модула [1],[2],[49],[50].

Као што је претходно наведено, трансмембрански притисак Δp представља разлику притиска морске воде и притиска пречишћене воде, тј.:

$$\Delta p = p_f - p_0 \quad (2.3)$$

где су:

p_f - притисак морске воде, [Pa],

p_0 - притисак пречишћене воде, [Pa].



Слика 2.9. Приказ упоређивања трансмембранског притиска и осмотског притиска за (а) претходне технологије мембрана (лево) и (б) савремене мембране RO/NF

Илустрације ради, претходне технологије мембрана са пропустљивошћу у опсегу од $L_p = 0,5 - 0,8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ Pa}$ (трансмембранског притиска у опсегу од 2067 до 4134 kPa), при десалинизацији слане воде, концентрације у интервалу од 1000 до 2000 mg/l укупно растворених супстанци (*TDS*) и степену корисности процеса десалинизационог система у интервалу од 50-75% долази се до резултата да осмотски притисак концентроване воде износи у интервалу од 1034 до 4134 kPa. Коришћењем мембрана високе пропустљивости, процес реверзибилне осмозе би требао бити изводљив у оквиру претходно наведених интервала степена корисности процеса, са вредношћу трансмембранског притиска морске воде заснованом на осмотском притиску концентроване воде на излазној деоници мембранског модула, чиме би се постигла минимална потрошња енергије. Такође, недавна истраживања спроведена од стране *Affordable Desalination Collaboration (ADC)* [52] у вези са десалинизацијом морске воде, приказују процес *RO* при степену корисности процеса од 42,5%, запреминском протоку пречишћене воде по јединици површине мембране $2,83 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$, остварен при трансмембранском притиску од 4654 kPa, који је само 15% већи од осмотског притиска концентроване воде 4027 kPa.

Коришћењем садашњих генерација високо пропустљивих мембрана, остварено је управљање процесом *RO* са широким интервалом степена корисности процеса у околини термодинамичких ограничења. Сходно претходно наведеном, поставља се питање исплативости развоја мембрана још веће пропустљивости. Потрошња енергије процеса *RO* десалинизације зависи од величине протока и притиска морске воде без обзира на остварени степен корисности процеса пречишћене воде. У мери у којој енергетски захтеви посматраног мембранског система, који обезбеђује захтевани проток пречишћене воде са радним режимима у околини термодинамичких ограничења, за одабрани степен корисности процеса, формулисани су независно од величине пропустљивости мембране која се користи у процесу. Може се истаћи да без обзира на изабрану мембрану, процес *RO* може бити оперативан у интервалима термодинамичког ограничења. Међутим, захтевана површина мембране, за задату величину протока пречишћене воде при циљаном степену корисности процеса, добија мање вредности са повећањем пропустљивости мембране. У вези са тим указује се на чињеницу да, након постизања радних

режима десалинизационог процеса у околини термодинамичких ограничења, остварена корист веће пропустљивости мембрана односи се на смањење трошкова израде мембрана неопходних за сам процес (стандардно <10% укупних трошкова производње воде у односу на >30% за трошкове енергије [53]).

2.4 Преглед теоријских и експерименталних истраживања процеса реверзибилне осмозе воде

Поједностављени модели процеса за оптимизацију структуре [54],[55],[56],[57] постројења мембранске десалинизације *RO* воде предложени су у литератури [7],[30],[58],[59],[60]. Раније студије су показале да је за једну од првих генерација мембрана спиралног геометријског облика била погодна тзв. линеарна конфигурација. Са појавом више пропустљивих мембрана није разјашњено да ли је наведена конфигурација мембранских модула оптимална при екстремно ниском притиску процеса *RO* [61]. Постојало је мишљење да се *SEC* може смањити коришћењем великог броја паралелно повезаних *RO* мембранских јединица, како би се одржавала иста вредност трансмембранског притисака [59]. Такође је постојао став да се *SEC* смањује након повећања броја мембранских елемената у кућиштима подсистема *RO* (посудама под притиском) [19].

Истраживањима је представљена, релативно нова конфигурација десалинизације морске воде - двопролазна десалинизација, али која још није детаљно проучена [62],[63],[64]. Као пример наводе се *Noronha* и сарадници [63] који су предложили приступ оптимизације парцијалног степена корисности процеса (односно, за сваки пролаз) у процесу двопролазне десалинизације, без повраћаја енергије за укупни степен корисности процеса, у интервалу од 50% до 70%. Наведена студија је показала да се оптимално решење за специфичну конфигурацију постројења и мембрана, у складу са степеном корисности процеса за сваки пролаз, може добити преко нумеричког алгорита. У овом случају није предвиђено поређење потрошње енергије са једнофазном конфигурацијом *RO*, али је истакнуто да је потрошња енергије већа у двопролазном процесу *RO*. У каснијем истраживању од стране *Cardona* и сарадника [62] *SEC* двопролазног мембранског процеса десалинизације је упоређен са једнофазним процесом *RO*. Ни у једном процесу није коришћен уређај за повраћај енергије. За вредност одстрањивања соли

од 98,3% и степен корисности процеса од 41,2%, закључено је да двопролазни процес поседује потенцијал за уштеду енергије од 13 до 15% при степену корисности процеса која је мања од 50%. У недавно објављеном истраживању [64] двопролазног процеса *NF* десалинизације морске воде, од стране *Long Beach Water Department*, дошло се до закључка да је потребно око 20% мање енергије када се десалинизација одвија са степеном корисности процеса од 42% у односу на једнофазни процес *RO* мембранске десалинизације. У наведеној студији нису коришћени уређаји за повраћај енергије и исто тако није наведен убедљив експериментални податак или теоријско образложење за верификацију супериорности двопролазног процеса *RO*. Осим тога, релативно оскудна поређења из литературе нису обухватила и термодинамичка ограничења за минималну остварену специфичну потрошњу енергије процеса.

Оптимизација трошкова процеса *RO* за производњу пречишћене воде, у складу са инвестиционим трошковима, такође је била у фокусу истраживања, са циљем проналажења начина за смањење укупних специфичних трошкова производње воде [59],[65]. Под инвестиционим трошковима су сматрани трошкови: израде транспортних станица за морску воду, трошкови система припреме воде, пумпе високог притиска, система повраћаја енергије и замене мембрана [65]. Проблем остваривања оптималних трошкова постројења *RO*, зависи од трошкова енергије, трошкова амортизације мембранског постројења, хемијског чишћења и одржавања мембрана као и од трошкова амортизације процесних пумпи у одсуству уређаја за повраћај енергије [59]. Већина постојећих студија прихватила је стандардне радне режиме при којима су трансмембрански притисци постављени да буду знатно већи од минималних потребних притисака, који одговарају најнижим *SEC*. Осим тога, модел процеса није представљен у смислу како би се развила недвосмислена процена о оптимизацији трошкова производње пречишћене воде процесом *RO* у односу на трансмембрански притисак, степен корисности пумпе, трошкове израде мембрана и коришћење уређаја за повраћај енергије.

Табела 2.3. Доприноси и недостаци постојећих истраживања

| Литература | Доприноси | Недостаци |
|-----------------|--|---|
| 1 | 2 | 3 |
| Abbas [66] | Неуронска мрежа модела за предвиђање протока пречишћене воде на основу притиска, температуре и концентрације растворених материја у морској води. Мрежа приказује планирање улаза-излаза са тачношћу интерполационих случајева, али не и за екстраполацију. | Потребни су опсежни експериментални подаци како би се омогућило предвиђање оптимума радних услова. |
| Avlonitis [46] | Смањење специфичне потрошње енергије за 4 различита типа уређаја за повраћај енергије. Закључено је да су измењивачи енергије ефикаснији у поређењу са другим уређајима за повраћај енергије из концентроване воде. | Резултати оптимизације нису приложени. |
| Abderrahim [52] | Развијен је софтверски пакет за <i>Dow/FilmTec BW30-400</i> мембрански модул са циљем прорачуна степена корисности процеса <i>RO</i> воде и одстрањивања соли према задатом протоку и трансмембранском притисаку за различите конфигурације једнофазног десалинизационог система <i>RO</i> . Конфигурација где су мембранске посуде под притиском распоређене паралелно дала је најбоље резултате у смислу степена корисности процеса <i>RO</i> и укупног пада притиска дуж канала са морском водом. | Није приложена оптимизација резултата у односу на специфичну потрошњу енергије. |
| Avlonitis [67] | Развијен је софтверски пакет за предвиђање перформанси мембранских постројења једнофазне реверзибилне осмозе морске воде (<i>SWRO</i>) и закључено је да оптимални степен корисности процеса за <i>Dow Filmtec SW30HR380</i> мембрански модул износи 45%. | Није анализирана двофазна конфигурација и њен утицај на <i>SEC</i> и укупне трошкове десалинизације морске воде. |
| Sharif [64] | Теоријски су проучаване мембранске карактеристике и радни параметри процеса <i>RO</i> при специфичној потрошњи енергије и по истом основу квантификације трошкова мембране и потрошње енергије за процес <i>RO</i> у оквиру термодинамичког ограничења. | Приказана је аритметичка средина осмотског притиска морске воде. Нису проучавани утицаји на дугорочне вредности. Анализирана је само једнофазна конфигурација <i>RO</i> . |

| 1 | 2 | 3 |
|------------------|--|---|
| Li [6] | Аналитички је проучавана оптимизација потрошње енергије путем математичких метода диференцијалне равнотеже масе према Дарсијевој једначини која подразумева 100% одстрањивања соли за једнофазни и двофазни процес <i>RO</i> . Закључено је да ће радни режими система <i>RO</i> у близини термодинамичког ограничења смањити <i>SEC</i> и да је оптималан удео пречишћене воде у једнофазном процесу 50% а да је двофазни процес енергетски ефикаснији. | Претпоставља се да је растворена со хомогено распоређена у сваком сегменту дуж канала протока, а самим тим није узета у обзир концентрацијска поларизација. |
| Mingheng [31] | На основу истог приступа [8], <i>SEC</i> је проширен на вишефазне процесе <i>RO</i> и проучаван је оптимални број фаза у реверзибилној осмози. Као закључак се наводи да ће 3-5 фаза бити оптимално. | Претпоставља се да је концентрација растворених материја равномерно распоређена у сваком попречном сегменту дуж мембран. канала. |
| Fan [38] | Један од првих објављених научних радова који се односи на оптимизацију једнофазних процеса <i>RO</i> помоћу компјутерских симулација. Коришћен је гранични слој протока, који је представљен помоћу емпиријског параметарског модела и обухвата величину степена корисности процеса, радне режиме процеса, Рејнолдсов број и површину мембране. Модел је показао да је оптимизација потрошње енергије у складу са неколико датих протока пречишћене воде. | Не оптимизује се специфична потрошња енергије према протоку пречишћене воде. |
| Fan [39] | Пратећи исти гранични слој протока и концентрацију емпиријског параметризованог модела у [52], оптимизација трофазне десалинизације <i>RO</i> је спроведена са и без уређаја за повраћај енергије и закључено је да распоред модула <i>RO</i> треба детаљније испитати и да уређај за повраћај енергије треба анализирати. | Због различитих радних режима процеса, трошкови замене мембрана нису разматрани. |
| Villafafila [69] | Комбинован је диференцијални приступ одржања масе са једначином протока пречишћене воде и концентрационе поларизације. Представљен је моделом и симулацијом. Закључено је да је коришћењем уређаја измењивача енергије могуће смањити потрошњу енергије до 50%. | Процењен је максимални степен корисности процеса, међутим, напомиње се да минимална потрошња енергије не одговара максималном степену корисности процеса. |

| 1 | 2 | 3 |
|---------------|--|--|
| Raluy [70] | Поређењем развојних циклуса технологија десалинизације: термална десалинизација (вишефазна фракцијска десалинизација и вишеструка дестилација) и реверзибилне осмозе, закључено је да десалинизација на основу процеса <i>RO</i> има знатно мањи утицај на животну средину у поређењу са топлотном десалинизацијом. | Нису разматрани. |
| Khayet [122] | Процес је представљен графом вишепараметарске просторне површи (<i>RSM</i>) за предвиђање коефицијента одстрањивања соли, специфичне једначине протока пречишћене воде и потрошње енергије <i>RO</i> . Оптимални радни режими минималне специфичне потрошње енергије су утврђени коришћењем итеративне градијентне методе. | Модел захтева експерименталне податаке за сваки нови систем, неодговарајући је за екстраполацију и предвиђање карактеристика процеса. |
| Sassi [71] | Експоненцијална функција којом се симулира пад коефицијента пропустљивости воде представљена је нелинеарним програмирањем (<i>MINLP</i>) са циљем смањења укупних годишњих трошкова уз оптимизацију геометријске конфигурације и радних режима система <i>RO</i> . Резултати показују да расподела таложења материја између процесних фаза утиче на оптималн развој и рад процеса <i>RO</i> . | Истраживањем није обухваћено детаљно динамичко моделирање процеса таложења материја у мембрани. Коефицијент преноса масе (користи се за квантификацију концентрационе поларизације) претпостављен је као независан параметар од положаја дуж мембранског модула. |
| Hatfield [40] | Развијен је модел, заснован на емпиријској корелацији просечног коефицијента преноса масе и својствима мембране (пропусност воде и соли) у зависности од радне температуре, квантификоване концентрационе поларизације, система сличном <i>Coalinga</i> пробном постројењу како би се повећао проток пречишћене воде и утврдио оптимални распоред мембранских склопова према условима радне температуре. Закључено је да прва фаза система <i>RO</i> има већу пропустљивост воде у поређењу са другом фазом иако свака фаза има исту мембранску површ. | Није оптимизирана специфична потрошња енергије потребна за рад система, већ само једначина протока пречишћене воде, која не гарантује минималну специфичну потрошњу енергије. |

| 1 | 2 | 3 |
|--------------|--|--|
| Reñate [7] | Приказан је свеобухватни преглед главних иновација и будућих трендова у планирању технологије десалинизације заснованом на процесу реверзибилне осмозе. Приказује се могућност интеграције десалинизације са обновљивим изворима енергије као значајно решење у многим регионима са малим залихама воде за пиће. | Нису разматрани. |
| Khayet [72] | Представљање процеса графом вишепараметарске просторне површи (<i>RSM</i>) и вештачке неуронске мреже (<i>ANN</i>) су коришћени за развој прогностичких модела за симулацију и оптимизацију процеса реверзибилне осмозе (<i>RO</i>) десалинизације на основу краткорочних експерименталних података добијених из пробних постројења. Развијени <i>ANN</i> модел је био валидан током читавог интервала концентрације морске воде демонстрирајући своју способност да превазиђе ограничења модела квадратног полинома добијеног од <i>RSM</i> и за решавање нелинеарних проблема. | Модел захтева припрему експерименталних података за сваки нови систем, међутим непоуздан је за екстраполацију и планирање процеса. |
| Jamal [8] | Развијен је модел заснован на принципу одржања масе узимајући у обзир концентрацијску поларизацију, која је квантификована на слојевитом моделу претпостављајући константни коефицијент преноса масе. Предвиђена је једначина протока пречишћене воде и концентрација соли у пречишћеној води. | Коришћен је коефицијент преноса масе у турбулентним условима. Пад притиска није узет у обзир. |
| Lu [28],[29] | Поставка проблема је формулисана путем модела нелинеарног програмирања (<i>MINLP</i>), са циљем смањења укупних трошкова на годишњем нивоу. Проблем одређивања оптималних радних режима математичког модела решен је уз помоћ софтвера (<i>GAMS</i>). Оптимални интервали хемијског чишћења и замена мембрана предвиђени су за дату динамику таложења материја: профил пропустљивости воде и соли у функцији времена процеса. | Поједностављен је механизам заптивања пора мембране. |

| 1 | 2 | 3 |
|---------------|--|--|
| Ghobeity [5] | Оптимизација потрошње енергије за десалинизацију морске воде процеса <i>RO</i> остварена је коришћењем стандардних метода за оптимизацију. Резултати показују значајне потенцијале уштеде електричне енергије и трошкова производње пречишћене воде. | Поједностављен је ефекат концентрац. поларизације помоћу емпиријског израза $C_{mem} / C_r = \exp(0,7Y)$. Потребно је упоредити са коефицијентом преноса масе. |
| Oh [9] | Приступ смањења потрошње енергије десалинизације морске воде у случају заптивања пора мембране, који је квантификован смањењем расположиве мембранске површине. У зависности од механизма таложења материја, одстрањивање хемијског елемента бора (<i>B</i>) може бити другачије чак и на истом нивоу степена заптивености пора мембране. | Коефицијент преноса масе за израчунавање концентрације преко слојевитог модела био је константан дуж канала протицања. Поред тога, коришћена је аритметичка средина осмотског притиска морске воде. |
| Kaghazchi [7] | Коришћен је квадратни математички модел за израчунавање осмотског притиска у функцији температуре. Други аспекти симулације су исти као код [118] и [119]. Симулиран је степен корисности процеса <i>RO</i> и концентрација растворених материја за десалинизацију помоћу <i>FilmTec SW30HR-380</i> слојевитог мембранског модула за различите вредности протока морске воде, притиске и дужине канала мембрана. | Коришћен је коефицијент преноса масе за процену степена концентрационе поларизације, преко слојевитог модела за различите аксијалне положаје дуж мембране. Симулирани степен корисности процеса <i>RO</i> (<10%) је пренизак, чак и за десалинизацију морске воде. |

Економска оправданост мембранске десалинизације у великој мери зависи од оперативних трошкова (уз трошак енергије као највећи). Дакле, смањење ових трошкова је кључни корак у истраживању процеса *RO*. У складу са тим, садашње високо пропустљиве мембране процеса *RO* су омогућиле обављање процеса десалинизације на много нижим трансмембранским притисцима него што је то раније било оствариво, приближавајући се притом подручју термодинамичког ограничења при чему осмотски притисак концентроване воде достиже трансмембрански притисак. У циљу сагледавања процеса десалинизације морске воде реверзибилном осмозом, неопходно је развити свеобухватан модел процеса који укључује утицаје параметара радних режима процеса, термодинамичких величина стања морске воде, својства мембранског модула, као и утицај уређаја за

повраћај енергије. Моделом процеса треба представити приступ оптимизације једнофазних конфигурација мембранског система према термодинамичким величинама стања морске воде, захтеваном квалитету пречишћене воде, параметрима радних режима и степену корисности процеса *RO*. Будућа истраживања требала би се односити на интеграцију развијеног модела процеса са интелигентним системом контроле радних режима десалинизационог постројења који би били у стању да се аутоматски прилагоде променама термодинамичких величина стања морске воде, ради обезбеђивања највише енергетске ефикасности.

На бази прегледа постојећих модела процеса реверзибилне осмозе воде ни један се не може са сигурношћу применити јер не обухвата све параметре и карактеристике процеса *RO*. Истраживањем је потребно развити модел процеса једнофазне конфигурације мембранског система реверзибилне осмозе воде. Потребно је јасно дефинисати термодинамичка ограничења и према њима извршити израчунавање протока пречишћене воде. Затим, потребно је сагледати поступке оптимизације енергетских захтева једнофазне конфигурације мембранског система реверзибилне осмозе воде укључујући моделе повраћаја енергије концентроване воде. Поступци оптимизације требају да буду изведени према радним режимима и термодинамичким величинама стања морске воде, својствима пропустљивости мембрана, степена корисности пумпе итд. Поред модела процеса специфичне потрошње енергије *RO*, потребно је представити моделе који се односе на трошкове управљања концентрованом водом и моделе специфичних трошкова мембрана. Неопходно је прецизно израчунати удео појединачних трошкова у укупним трошковима према параметрима процеса *RO*. У циљу смањења укупних трошкова потребно је истражити аспекте спрезања односно синхронизације мембранских подсистема реверзибилне осмозе воде са погонским подсистемима, коришћењем енергије фотонапонских соларних колектора а на основу извршених термодинамичких прорачуна.

За верификацију сопственог модела као и за одређивање непознатих параметара неопходно је урадити и сопствена експериментална истраживања. Сходно овим потребама пројектовано је и израђено експериментално лабораторијско постројење реверзибилне осмозе морске воде.

2.5 Термодинамички модел мембранског процеса реверзибилне осмозе воде

Дифузија представља спонтани транспорт материје под утицајем одговарајућег градијента из зоне више у зону ниже концентрације. Као и многи спонтани процеси, дифузија је ентропијски вођен процес у којем се материја која дифундује равномерно распоређује у расположивом простору повећавајући тиме ентропију система. Дифузија је директна последица другог принципа термодинамике, којим је дефинисано да ентропија неког неравнотежног система може само да расте, све док систем не дође у равнотежу. С обзиром да материја дифундује из области веће у област мање концентрације, систем прелази из уређенијег у мање уређен систем, тј. ентропија расте.

Закон одржања масе своди се на облик:

$$\rho_i \left(\frac{\partial C_i}{\partial t} + \vec{v}_i \cdot \nabla C_i \right) = q_i - \nabla \cdot \vec{J}_i \quad (2.4)$$

$i = 1, 2, \dots, n$ (за мулти фазна струјања са n фаза/компонената) где су:

ρ_i - густина,

C_i - концентрација,

v_i - брзина,

q_i - извор/понор материје,

$\nabla \cdot \vec{J}_i$ - градијент дифузног протока,

t - време,

Дифузни проток дефинише се изразом:

$$\vec{J}_i = -\left(D \nabla C_i + D_T \nabla T + D_p \nabla p \right) \quad (2.5)$$

где су:

D - коефицијент дифузије за градијент концентрације,

D_T - коефицијент дифузије за градијент температуре,

D_p - коефицијент дифузије за градијент притиска,

∇C_i - градијент концентрације,

∇T - градијент температуре,

∇p - градијент притиска,

При процесу осмозе не постоји градијент температуре и притиска, тако да се термодифузија и бародифузија могу занемарити. Дифузни проток за стационарно струјање добија облик:

$$\vec{J}_i = -D\nabla c_i \quad (2.6)$$

Аналогно дифузном протоку, Фиковим законом успостављена је корелација између масеног протока растварача и градијента концентрације:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2.7)$$

где је:

J - масени проток растварача по површини мембране, $[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$,

D - коефицијент дифузије, $[\text{m}^2/\text{s}]$,

C - концентрација растворених материја у раствору, $[\text{kg}/\text{m}^3]$,

z - растојање по дебљини мембране, слика 2.10, $[\text{m}]$.

Осмоза представља дифузију молекула растварача кроз полупропустљиву мембрану која пропушта молекуле растварача док истовремено не пропушта молекуле растворене супстанце. Процес осмозе настаје када су концентрације раствора са две стране мембране различите. С обзиром да полупропустљива мембрана пропушта само молекуле растварача, али не и молекуле растворене супстанце, долази до дифузије растварача кроз мембрану тј. молекули растварача пролазе кроз мембрану како би се изједначиле концентрације са обе стране мембране. Молекули растварача се крећу из средине са мањом концентрацијом у средину са већом концентрацијом. Осмоза представља врсту пасивног транспорта. При дифузији молекули растварача пролазе кроз мембрану и тада долази до пораста нивоа течности на једној страни мембране и смањења нивоа течности на другој страни мембране. Пораст нивоа течности на једној страни мембране ствара допунски хидростатички притисак који се супротставља осмози тј. осмотском притиску који делује на мембрану. Када се ова два притиска изједначе успоставља се равнотежа и процес дифузије је завршен. Притисак при коме се успоставља ова равнотежа се назива осмотски притисак. Осмотски притисак је директно пропорционалан концентрацији раствора.

Реверзибилна осмоза је процес при коме се раствор воде са већом концентрацијом соли потискује притиском који има већу вредност од осмотског притиска. Процесом дифузије молекули воде растварача пролазе кроз полупропустљиву мембрану чиме се добија пречишћена вода.

Идеалним течним растворима сматрају се раствори код којих су међумолекуларне интеракције приближно исте између молекула у чистом стању супстанце као и у раствору. Идеалним разблаженим течним растворима сматрају се раствори у којима је велико разблажење растворка (компоненте В) остварено растварачем (компоненте А). Морска вода се може сматрати идеалним разблаженим раствором материја (соли) (компоненте В) у растварачу воде (компонента А).

Закони Хенрија (*Henry*) и Раула (*Raoult*) дефинишу односе концентрација појединих компонената у идеалним разблаженим течним растворима у условима термодинамичке равнотеже.

Хенријев закон [73]:

$$p_{Bi} = H \cdot x_{Bi} \quad (2.8)$$

где су:

p_{Bi} - парцијални притисак растворака (компоненте В) изнад течне фазе раствора [Pa],

H - Хенријева константа, [Pa]

x_{Bi} - молски удео растворка (компоненте В) у раствору

Хенријева константа и углавном се одређује експериментално.

Раулов закон [73]:

$$p_A = x_A \cdot p_A^0 \quad (2.9)$$

p_A - парцијални притисак растварача (компоненте А) изнад течне фазе раствора [Pa],

x_A - молски удео растварача (компоненте А) у раствору

p_A^0 - притисак засићене паре растварача (компоненте А)

За проучавање двофазних система, код којих се парна фаза покоравала законима идеалних гасова, може се примењивати Далтонов закон [73]:

$$p = \sum_{i=1}^n p_i, \quad p_i = y_i p \quad (2.10)$$

тј. укупни притисак парне фазе p једнак је збиру парцијалних притисака компонената, односно, парцијални притисак i -те компоненте p_i у парној фази пропорционалан је њеном молском уделу y_i у парној фази.

Важно је напоменути да се Раулов закон односи на течну фазу и примењује се на течне растворе и идеалне гасове које су са њима у термодинамичкој равнотежи, док се Далтонов закон односи само на гасовиту (парну) идеалну фазу.

Повезивањем Рауловог и Далтоновог закона може се добити корелација између молског удела неке компоненте у течној фази x_i и молског удела исте компоненте у гасовитој фази y_i у условима термодинамичке равнотеже, наравно када се гасовита фаза поковава законима идеалног гаса [73]:

$$y_i = p_{pi} x_i / p \quad (2.11)$$

Закони Хенрија и Раула су гранични закони који егзактно важе за бесконачно сиромашне (разблажене) растворе вишекомпонентних система. Уобичајено је да се идеалним вишекомпонентним системима (растворима) називају они системи код којих Раулов закон важи у свим дијапазонима концентрација.

У идеалним растворима активност неке компоненте увек је једнака молском уделу те компоненте у течној фази ($a_i = x_i$). Код реалних раствора то није случај услед узајамног физичко-хемијског дејства појединих компонената (асоцијација, дисоцијација итд.). Одступање реалних система (раствора) од идеалног раствора изражава се за сваку компоненту преко коефицијента активности (γ_i):

$$\gamma_i = a_i / x_i \quad (2.12)$$

Преко коефицијената активности може се за реалне растворе написати израз, аналоган Рауловом закону [73]:

$$p_i = p_{pi} a_i = p_{pi} x_i \gamma_i = (p_i)_{id} \gamma_i \quad (2.13)$$

где су:

p_i - парцијални притисак i -те компоненте изнад течне фазе у условима термодинамичке равнотеже, [Pa],

p_{pi} - притисак засићене паре чисте i -те компоненте на посматраној температури, равнотежни напон паре i -те компоненте [Pa],

$(p_i)_{id}$ - парцијални притисак i -те компоненте изнад идеалног раствора на посматраним условима, [Pa].

Уколико су познате вредности коефицијената активности могу се лако одредити одступања вредности појединих параметара од одговарајућих вредности у идеалним растворима. Очигледно је да је за све компоненте идеалног раствора $\gamma_i = 1$.

Ако је $\gamma_i > 1$, парцијални притисак i -те компоненте у парној фази већи је од вредности која одговара према Рауловом закону. Одступања реалних раствора од идеалних, у том случају, сматрају се позитивним. Ако је $\gamma_i < 1$, парцијални притисак i -те компоненте у парној фази мањи је од вредности која одговара према Рауловом закону. Одступања реалних раствора од идеалних, у том случају, сматрају се негативним.

За тумачење процеса транспорта материје у вишекомпонентним и вишефазним системима често се користи метод термодинамичке анализе и у многим једначинама хемијске термодинамике уводи се величина хемијског потенцијала. Вредност хемијског потенцијала зависи од притиска, температуре и од енергије узајамног дејства појединих компонената система. Хемијски потенцијал у диференцијалном облику дефинисан је изразом [74]:

$$d\mu_i = RTd \ln(a_i) + v_i dp \quad (2.14)$$

где су:

a_i - активност воде $a_i = \gamma_i \cdot x_i$,

γ_i - коефицијент активности компоненте i ,

x_i - парцијални молски удео компоненте i ,

v_i , моларна запремина компоненте,

p - притисак,

T – температура.

С обзиром да течни раствори имају својства нестишљивости (молска запремина се не мења са променом притиска) интеграљењем израза (2.14) добија се:

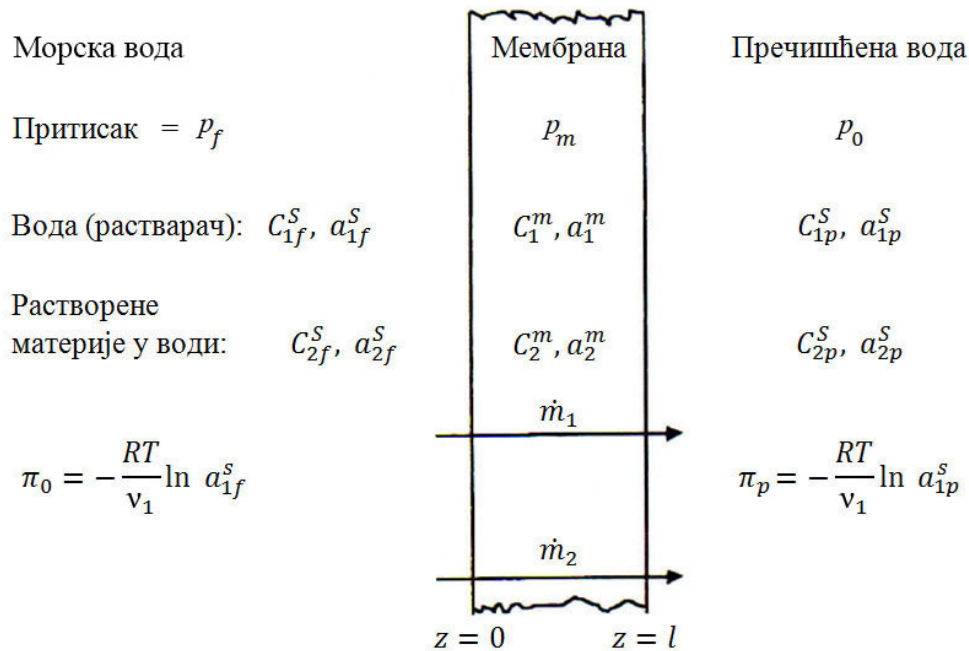
$$\mu_i = \mu_i^o + RT \ln(\gamma_i \cdot x_i) + v_i(p - p_i^o) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.15)$$

где је μ_i^o -хемијски потенцијал компоненте i при притиску на стандардним условима p_i^o .

Код гасова моларна запремина се мења са променом притиска. За идеални гас интеграљењем израза (2.14) добија се [74]:

$$\mu_i = \mu_i^o + RT \ln(\gamma_i \cdot x_i) + RT \ln\left(\frac{p}{p_i^o}\right) \quad (2.16)$$

На слици 2.10 шематски је приказан мембрански процес реверзибилне осмозе воде.



Слика 2.10. Шематски приказ дифузног процеса реверзибилне осмозе воде

Коришћене ознаке имају следеће значење: p – притисак, C – концентрација, a – активност воде, π – осмотски притисак воде, μ – хемијски потенцијал. Коришћени индекси имају следеће значење: 1– вода (растварач), 2– растворене материје у води, s – раствор, m – мембрана, f – морска вода и 0 – пречишћена вода.

Концентрације растварача и растворених материја у пречишћеној води дефинисани су изразима:

$$C_{1p}^S = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad (2.17)$$

$$C_{2p}^S = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \quad (2.18)$$

где су:

m_1 - маса воде у раствору – пречишћеној води, [kg],

m_2 - маса растворених материја у раствору - пречишћеној води, [kg],

C_{1p}^S - концентрација воде (растварача) у пречишћеној води,

C_{2p}^S - концентрација растворених материја у пречишћеној води,

Дељењем израза (2.18) са изразом (2.17) добија се:

$$\frac{C_{2p}^S}{C_{1p}^S} = \frac{m_2}{m_1} \quad (2.19)$$

$$C_{2p}^S \cdot m_1 = C_{1p}^S \cdot m_2$$

Диференцирањем израза (2.19) по времену (t) добија се једначина биланса масеног протока процеса дифузије за полупропусне мембране [75].

$$C_{2p}^S \cdot \dot{m}_1 = C_{1p}^S \cdot \dot{m}_2 \quad (2.20)$$

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = \frac{C_{2p}^S}{C_{1p}^S}$$

где су:

\dot{m}_1 - масени проток воде (растварача) кроз мембрану, [kg/s],

\dot{m}_2 - масени проток растворених материја кроз мембрану, [kg/s].

Степен одстрањивања растворених материја у морској води представља величину којом се описује ефикасност мембранског дифузног процеса уклањања соли [75]:

$$R_f = 1 - \frac{C_{2p}^S}{C_{2f}^S} = 1 - \frac{C_{1p}^S}{C_{2f}^S} \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \quad (2.21)$$

Степен мембранске пропустљивости растворених материја, дефинише се као однос концентрација растворених материја у пречишћеној води и у морској води [75]:

$$SP \cong \frac{C_{2p}^S}{C_{2f}^S} = 1 - R_f \quad (2.22)$$

За растворе ниских концентрација растворених материја може се применити израз:

$$C_{1p}^S \cong \rho_1 = \text{густина воде} \quad (2.23)$$

Трансмембрански притисак омогућује остваривање транспорта растварача (воде) кроз мембрану у процесу дифузије. У циљу остваривања процеса дифузије трансмембрански притисак мора имати већу вредност од осмотског притиска воде. Фиковим законом дефинише се масени проток воде кроз мембрану, који представља производ коефицијента дифузије D_{1m} и градијента концентрације воде у простору мембране:

$$\dot{m}_1 = -D_{1m} \frac{dC_1^m}{dz} \quad (2.24)$$

С обзиром да се морска вода може сматрати идеалним разблаженим раствором хемијски потенцијал изражен преко концентрације воде унутар простора мембране дефинисан је изразом [75]:

$$\mu_1^m = \mu_1^f + RT \ln C_1^m \quad (2.25)$$

Масени проток воде кроз мембрану, који заправо представља масени проток пречишћене воде, може се представити као градијент хемијског потенцијала [75]:

$$\dot{m}_1 = \frac{D_{1m} C_1^m}{RT} \frac{d\mu_1^m}{dz} \cong \frac{D_{1m} C_1^m}{RT} \frac{\Delta\mu_1^m}{l} \quad (2.26)$$

Хемијски потенцијал за сваку појединачну фазу система (фазу морске воде и фазу пречишћене воде), може се представити у функцији термодинамичких величина стања притиска, температуре и активности ових фаза. Разлика хемијског потенцијала морске воде и пречишћене воде $\Delta\mu_1^S$, представља хемијски потенцијал мембране $\Delta\mu_1^m$ и дефинише се следећим изразом:

$$\Delta\mu_1^S = [RT \ln a_{1f}^S + v_1 \cdot p_f] - [RT \ln a_{1p}^S + v_1 \cdot p_o] = v_1 [\Delta p - \Delta\pi] = \Delta\mu_1^m \quad (2.27)$$

где v_1 представља моларну запремину растварача, $\Delta\pi = \pi_o - \pi_p$ представља разлику осмотских притисака морске воде π_o и пречишћене воде π_p . Комбиновањем израза (2.26) и (2.27) добијамо [75]:

$$\dot{m}_1 = \frac{D_{1m} C_1^m V_1 (\Delta p - \Delta \pi)}{lRT} \quad (2.28)$$

Ефективни притисак процеса осмозе воде ($\Delta p - \Delta \pi$) представља разлику трансмембранског притиска и осмотског притиска процеса, дефинише се у функцији разлике концентрација на мембранским граничним површинама (са мембранске стране морске воде и пречишћене воде) [75]:

$$(C_{1f}^m - C_{1p}^m) = \frac{C_1^m V_1 (\Delta p - \Delta \pi)}{RT} \quad (2.29)$$

Фиковим законом дефинише се масени проток растворених материја између морске воде и пречишћене воде, при чему је утицај притиска занемарљив:

$$\dot{m}_2 = -D_{2m} \frac{dC_2^m}{dz} \cong D_{2m} \frac{\Delta C_2^m}{l} = D_{2m} K_2 \left(\frac{C_{2f}^s - C_{2p}^s}{l} \right) \quad (2.30)$$

где K_2 представља коефицијент расподеле растворених материја између раствора и мембране. Користећи дефиницију степена одстрањивања растворених материја у морској води (2.21) и једначину биланса масеног протока (2.20), комбиновањем израза (2.28) и (2.30) добија се [75]:

$$R_f = \left[1 + \frac{D_{2m} K_2 R T C_{1p}^s}{D_{1m} C_1^m V_1 (\Delta p - \Delta \pi)} \right]^{-1} \quad (2.31)$$

Дефинисањем коефицијената пропустљивости мембране A_1, A_2 добијене резултате можемо приказати у следећем облику [75]:

$$A_2 = K_2 D_{2m}, K_2 = \frac{C_2^m}{C_2^s} \quad (2.32)$$

$$A_1 = K_1 D_{1m}, K_1 = \frac{C_1^m}{C_1^s} \cong \frac{C_1^m}{\rho_1} \quad (2.33)$$

где је концентрација растварача представљена као густина растварача ρ_1 . Овај приступ је прихватљив за растворе ниских концентрација соли (морску воду).

Фактор селективности α представља однос мембранске пропустљивости растворених материја и мембранске пропустљивости растварача, дефинисан је изразом:

$$\alpha = \frac{A_2}{A_1} = \alpha_s \alpha_D = \left(\frac{\rho_1 K_2}{C_1^m} \right) \left(\frac{D_{2m}}{D_{1m}} \right) \quad (2.34)$$

где α_s и α_D представљају компоненте растворљивости и дифузивности.

У циљу додатног поједностављења израза масеног протока растварача и масеног протока растворених соли кроз мембрану уводе се следећи изрази:

$$x = \frac{v_1 \Delta P}{RT} \text{ и } \Delta x = \frac{v_1 (\Delta p - \Delta \pi)}{RT} \quad (2.35)$$

Дакле, масени проток растварача и масени проток растворених материја кроз мембрану, дефинисани су изразима:

$$\dot{m}_1 = \frac{\rho_1 A_1 \Delta x}{l} \text{ и } \dot{m}_2 = \frac{A_2 C_{2f}^s}{l} (1 - SP) \quad (2.36)$$

Степен одстрањивања растворених материја у морској води и степен мембранске пропустљивости растворених материја кроз мембрану дефинисани су изразима:

$$R = \frac{\Delta x}{\alpha + \Delta x} \quad (2.37)$$

$$SP = \frac{\alpha}{\alpha + \Delta x} \quad (2.38)$$

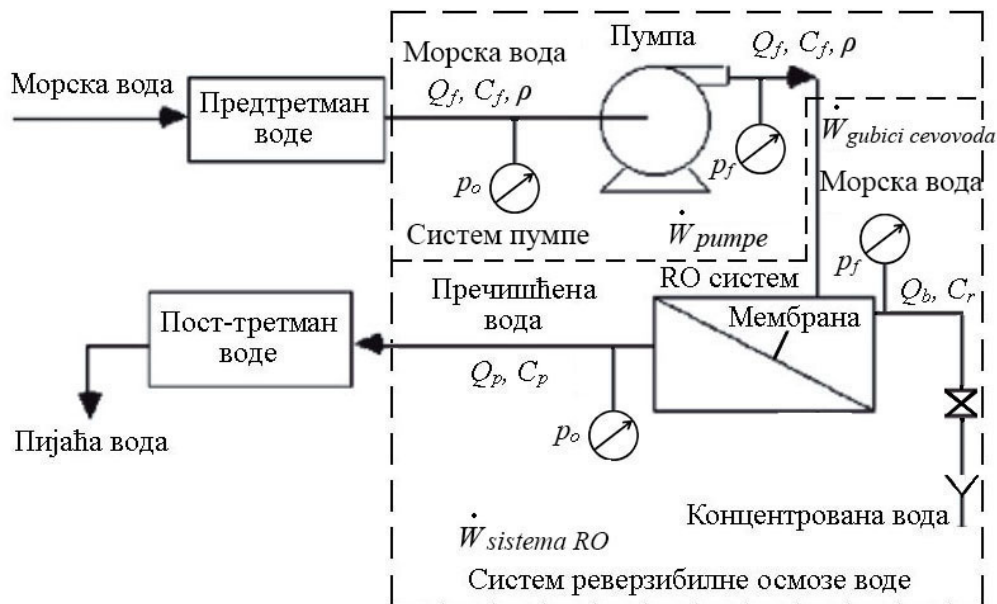
3. ТЕОРИЈСКО ИСТРАЖИВАЊЕ ДЕСАЛИНИЗАЦИОНИХ ПРОЦЕСА РЕВЕРЗИБИЛНЕ ОСМОЗЕ ВОДЕ

3.1 Дефинисање модела процеса једнофазне конфигурације мембранског система реверзибилне осмозе воде

На основу целокупног увида у до сада спроведена теоријска истраживања других аутора, на бази прегледа литературе дате у другом поглављу, може се закључити да је неопходно развити сопствени модел запреминског протока пречишћене воде, који ће омогућити симулацију реалног процеса реверзибилне осмозе воде. Модел процеса представља скуп математичких функција којима се израчунава потрошња енергије процеса реверзибилне осмозе воде и вредност протока пречишћене воде у зависности од концентрације растворених материја у морској води, параметара радних режима процеса, притиска, температуре и степена корисности процеса.

Недавни напредак технологија високопропусних мембрана реверзибилне осмозе воде омогућио је остваривање блиских вредности трансмембранског притиска процеса *RO* са притиском концентроване воде на завршној деоници мембранског модула. Шематски приказ система реверзибилне осмозе воде дат је на слици 3.1. Представљени су механизми којима се смањују инвестициони и енергетски трошкови производње воде у десалинизационим системима. Поменути механизми интегришу: енергетске потребе система, захтеве у погледу потребне површине и пропустљивости мембрана, начине повраћаја енергије високог притиска концентроване воде као и важна термодинамичка теоријска ограничења у погледу проласка воде кроз мембрану *RO*. Оптимизацијом степена корисности процеса *RO* (дефинисан као однос запреминских протока пречишћене воде и морске воде) за остварени трансмембрански притисак, могуће је поставити аналитички израз којим се израчунава запремински проток пречишћене воде (израз 6.1) према теоријски минималним енергетским захтевима. Енергетске потребе

десалинизационих система реверзибилне осмозе воде дефинисане су у виду специфичне потрошње енергије (SEC) која представља потребну количину енергије да систем произведе 1 m^3 пречишћене воде.



Слика 3.1. Шематски приказ система реверзибилне осмозе воде, без повраћаја енергије

Биланс енергије за систем пумпе и систем реверзибилне осмозе воде чије су границе означене испрекиданим линијама на слици 3.1 гласи:

$$\dot{W}_{pumpe} = \dot{W}_{sistema RO} + \dot{W}_{gubici cevovoda} \quad (3.1)$$

где су:

\dot{W}_{pumpe} - остварена хидрауличка снага пумпе, [W],

$\dot{W}_{sistema RO}$ - потребна хидрауличка снага система RO, [W],

$\dot{W}_{gubici cevovoda}$ - губици цевовода на деоници између пумпе и система RO.

Деоница цевовода између система пумпе и система реверзибилне осмозе је веома кратка и најчешће је праволинијског облика, са брзинама струјања $< 1\text{ m/s}$, тако да су губици цевовода занемарљиво мали $\dot{W}_{gubici cevovoda} \approx 0$.

Уводи се апроксимација да је притисак морске воде на улазу у пумпу једнак притиску пречишћене воде $p_{pu} = p_o$. Ова апроксимација важи за једнопролазне системе реверзибилне осмозе воде.

Сходно томе биланс енергије за систем пумпе и систем реверзибилне осмозе гласи:

$$\dot{W}_{pumpe} = \dot{W}_{sistema RO} \quad (3.2)$$

Специфична потрошња енергије система реверзибилне осмозе се дефинише као:

$$SEC = \frac{\dot{W}_{sistema RO}}{Q_p} = \frac{\dot{W}_{pumpe}}{Q_p} \quad (3.3)$$

где су:

Q_p - запремински проток пречишћене воде, [m³/h],

\dot{W}_{pumpe} - остварена хидрауличка снага пумпе, [W], представљена као:

$$\dot{W}_{pumpe} = \Delta p_p \cdot Q_f \quad (3.4)$$

$$\Delta p_p = p_f - p_o = \Delta p \quad (3.5)$$

где су:

Δp_p - разлика притиска морске воде на излазу из пумпе и притиска на улазу у пумпу, [Pa],

p_f - притисак морске воде на улазу у мембрану (једнак притиску морске воде на излазу из пумпе), [Pa],

p_o - притисак морске воде на улазу у пумпу (једнак притиску пречишћене воде), [Pa],

Q_f - запремински проток воде кроз пумпу, [m³/h],

Δp - трансмембрански притисак, [Pa].

Сходно изразу 3.5, разлика притисака морске воде на излазу из пумпе и притиска на улазу у пумпу једнака је трансмембранском притиску Δp . Потребно је напоменути да трансмембрански притисак представља промену притиска у самој мембрани, дефинисану као разлику притиска морске воде и притиска пречишћене воде.

Вредност притисака морске воде на улазу у пумпу и притиска пречишћене воде p_o износи приближно $1 \cdot 10^5$ [Pa] (релативни притисак), који је од 80 до 120 пута мањи од вредности притиска морске воде p_f , при процесу десалинизације.

У поглављу 3.4 је показано да је однос вредности пада притиска услед трења на деоници дуж мембранског модула и трансмембранског притиска занемарљив ($\Delta p_f \ll \Delta p$).

Степен корисности процеса *RO* дефинисан је следећим изразом:

$$Y = \frac{Q_p}{Q_f} (< 1) \quad (3.6)$$

где се након комбиновања израза (3.3), (3.4), (3.5) и (3.6) специфична потрошња енергије система реверзибилне осмозе воде може дефинисати следећим изразом [30]:

$$SEC = \frac{\Delta p}{Y} \quad (3.7)$$

Нормализована специфична потрошња електричне енергије система реверзибилне осмозе воде у зависности од степена корисности склопа пумпе и електромотора приказана је у поглављу 3.4.1.

У литератури је прихваћен приступ којим се проток пречишћене воде одређује из израза [76].

$$Q_p = A_m \cdot L_p (\Delta p - \sigma \cdot \overline{\Delta \pi}) = A_m \cdot L_p (\overline{NDP}) \quad (3.8)$$

где су:

A_m - активна површина мембране, [m^2],

L_p - пропустљивост мембране, [$m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$],

σ - коефицијент рефлексije (представља карактеристику мембране, за мембране значајних технолошких перформанси одстрањивања соли $\sigma = 1$,

Δp - трансмембрански притисак (промена притиска у самој мембрани дефинисана као разлика притиска морске воде и притиска пречишћене воде, [Pa],

$\overline{\Delta \pi}$ - средња аритметичка вредност разлике осмотских притисака између концентроване воде (морске воде која не пролази кроз мембрану) и пречишћене воде дуж мембранског модула, [Pa],

$(\Delta p - \sigma \cdot \overline{\Delta \pi})$ - ефективни притисак процеса реверзибилне осмозе (скраћено \overline{NDP}) се дефинише као разлика трансмембранског притиска и средње

вредности разлике осмотских притисака између концентроване и пречишћене воде мембранског система реверзибилне осмозе.

Шематски приказ мембранског процеса реверзибилне осмозе воде дат је на слици 3.2.



Слика 3.2. Шематски приказ физичких величина мембранског процеса

За већину мембрана реверзибилне осмозе осмотски притисак је линеарно сразмеран концентрацији растворених материја у води, [76].

$$\pi = f_{os} \cdot C \quad (3.9)$$

где су:

f_{os} - коефицијент осмотског притиска, [Pa/(mg/l)],

C - концентрација растворених материја у води, [mg/l].

Просечна промена разлике осмотског притиска $\overline{\Delta\pi}$ у зависности од вредности степена корисности процеса реверзибилне осмозе воде дуж мембранског канала дефинисана је као средња аритметичка и логаритамска вредност [77]:

$$\overline{\Delta\pi} = \frac{f_{os} \cdot C_f}{2} \left(1 + \frac{1}{1-Y} \right) \quad (3.10)$$

$$\overline{\Delta\pi} = f_{os} \cdot C_f \frac{\ln \left[\frac{1}{1-Y} \right]}{Y} \quad (3.11)$$

где је C_f концентрација растворених материја у морској води, [mg/l].

При мањој вредности степена корисности процеса ($Y < 0,4$) средња аритметичка и логаритамска вредност промене осмотског притиска имају приближне вредности [77]. При већој вредности степена корисности процеса

($Y > 0,4$) средња аритметичка вредност промене осмотског притиска има већа одступања од вредности добијених експериментима [77].

Осмотски притисак на улазу и излазу мембранског модула у зависности од концентрације соли пречишћене воде (пермеата) дефинише се као [30]:

$$\Delta\pi_{ulaz} = f_{os} \cdot C_f - \pi_p = \pi_o - \pi_p \quad (3.12)$$

$$\Delta\pi_{izlaz} = f_{os} \cdot C_r - \pi_p = \pi_r - \pi_p \quad (3.13)$$

$$\pi_p = f_{os} \cdot C_p \quad (3.14)$$

где су:

C_r - концентрација растворених материја концентроване воде, [mg/l],

C_p - концентрација растворених материја пречишћене воде, [mg/l],

π_o - осмотски притисак морске воде, [Pa],

π_r - осмотски притисак концентроване воде, [Pa],

π_p - осмотски притисак пречишћене воде, [Pa].

За мембране високих технолошких перформанси одстрањивања соли осмотски притисак пречишћене воде се може занемарити у поређењу са осмотским притиском морске воде и концентроване воде чији је однос дефинисан изразом [30]:

$$C_r = \frac{C_f}{1-Y} \quad (3.15)$$

Комбиновањем израза (3.12), (3.13) и (3.15) разлика осмотског притиска између концентроване воде и пречишћене воде представљена је математичким моделом [35]:

$$\Delta\pi_{izlaz} = \frac{R \cdot \pi_o}{1-Y} \quad (3.16)$$

$$\pi_o = f_{os} \cdot C_f \quad (3.17)$$

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (3.18)$$

где су:

Y - степен корисности процеса,

π_o - осмотски притисак морске воде, [Pa],

R - степен одстрањивања соли из морске воде (степен одсољавања воде)

Изразом (3.16) представљена је узајамна повезаност степена корисности процеса реверзибилне осмозе воде и осмотског притиска. Повећањем степена корисности процеса реверзибилне осмозе воде повећава се осмотски притисак концентроване воде на завршној деоници мембранског модула, што условљава потребу за промену већих вредности ефективног притиска процеса RO .

3.1.1 Термодинамичко ограничење у десалинизационим системима реверзибилне осмозе воде

Реверзибилна осмоза је обрнут, принудан процес од осмозе. Да би се одвијао процес реверзибилне осмозе притисак морске воде мора бити већи од осмотског притиска. С обзиром да су мембрански модули цилиндричног облика, током процеса реверзибилне осмозе морска вода пролази кроз полупропустљиве мембране, почевши од улазних деоница мембранског модула ка завршним деоницама мембранског модула. Мембрански модули су релативно дуги, концентрација соли у мембранском модулу се повећава од улазне ка излазној деоници модула. Термодинамичким ограничењем - „отпором” дефинише се услов да трансмембрански притисак мора бити већи или једнак од осмотског притиска на излазу из мембранског модула. Уколико ова гранична вредност није задовољена на завршним деоницама мембранског модула неће се остварити пролазак воде кроз мембрану, чиме систем реверзибилне осмозе није у потпуности функционалан. Уколико не би било термодинамичког ограничења „отпора” молекули воде би се нагомилавали на страни пречишћене воде и не би се остварио пролазак воде кроз мембрану.

Са циљем целокупног коришћења површине мембране у мембранским модулима при степену корисности процеса Y , потребно је обезбедити трансмембрански притисак Δp [Pa] веће вредности од осмотског притиска $\Delta \pi_{izlaz}$ [Pa] на излазу из мембранског модула.

Сходно овим условима дефинише се израз термодинамичког ограничења „отпора” [35]:

$$\Delta p \geq \Delta \pi_{izlaz} = \frac{R \cdot \pi_o}{1 - Y} \quad (3.19)$$

Овај израз је нарочито важан у практичној примени када се десалинизациони мембрански систем са високим степеном корисности процеса

реверзибилне осмозе воде користи на ниским притисцима. Овим изразом могуће је одредити минимални потребан трансмембрански притисак Δp , при коме је искоришћена целокупна површина мембране, што је од кључног значаја за формирање енергетски ефикасног десалинизационог система реверзибилне осмозе воде.

3.1.2 Дефинисање протока пречишћене воде у околини термодинамичких граничних вредности

Ефективни притисак $\overline{NDP} = \Delta p - \sigma \cdot \overline{\Delta\pi}$ [Pa] за процесе реверзибилне осмозе у околини термодинамичког ограничења, користећи изразе (3.10) и (3.11) за средњу аритметичку и логаритамску вредност разлике осмотског притиска $\overline{\Delta\pi}$ уз претпоставку да је одстрањивање соли 100%, може се представити следећим изразима [30]:

$$\overline{NDP} = \frac{\pi_0}{1-Y} - \frac{\pi_0}{2} \left[1 + \frac{1}{1-Y} \right] \quad (3.20)$$

$$\overline{NDP} = \frac{\pi_0}{1-Y} - \pi_0 \frac{\ln \left[\frac{1}{1-Y} \right]}{Y} \quad (3.21)$$

Наведени изрази представљају разумне апроксимације за израчунавање укупног ефективног притиска десалинизационог система реверзибилне осмозе воде за термодинамичку граничну вредност дефинисану изразом (3.19). Потребно је нагласити да су процеси реверзибилне осмозе за термодинамичке граничне вредности једино могући уколико се користе високопропусне мембране. Ова теорија се потврђује диференцирањем масе соли кроз мембрану примењујући израз за средњу логаритамску разлику осмотског притиска. Следећи израз представља укупни ефективни притисак \overline{NDP} :

$$\overline{NDP} = \Delta p - \sigma \cdot \overline{\Delta\pi} = \frac{Q_p}{AL_p} = \frac{\Delta p}{1 + \frac{\pi_0}{\Delta p} \frac{1}{Y} \ln \frac{1 - (\pi_0 / \Delta p)}{1 - Y - (\pi_0 / \Delta p)}} \quad (3.22)$$

где Y представља степен корисности процеса, Δp трансмембрански притисак.

Из израза (3.22) јасно се уочава да је процес реверзибилне осмозе могуће остварити за термодинамичку граничну вредност $\Delta p = \pi_0 / (1 - Y)$ уколико се користе високо пропусне мембране већих површина.

3.2 Оптимизација енергетских захтева модела процеса једнофазне конфигурације мембранског система реверзибилне осмозе воде без повраћаја енергије високог притиска концентроване воде

Основним моделом једнофазне конфигурације мембранског система процеса реверзибилне осмозе воде, успостављена је повезаност између специфичне потрошње енергије SEC и степена корисности процеса [48]. Специфична потрошња енергије десалинизационог система реверзибилне осмозе воде може се представити комбиновањем израза (3.3) до (3.5) и (3.19) који поприма следећи облик:

$$SEC \geq \frac{R \cdot \pi_o}{Y \cdot (1 - Y)} \quad (3.23)$$

Погодно је SEC нормализовати за осмотски притисак морске воде π_0 :

$$SEC_{tr, norm} = \frac{SEC_{tr}}{\pi_0} = \frac{R}{Y \cdot (1 - Y)} \quad (3.24)$$

Промена математичке функције $SEC_{tr, norm}$ нормализоване специфичне потрошње енергије десалинизационог система реверзибилне осмозе приказан је на слици 3.3. Минимална вредност функције $SEC_{tr, norm}$ одређена је изразом:

$$\frac{d(SEC_{tr, norm})}{d(Y)} = 0 \quad (3.25)$$

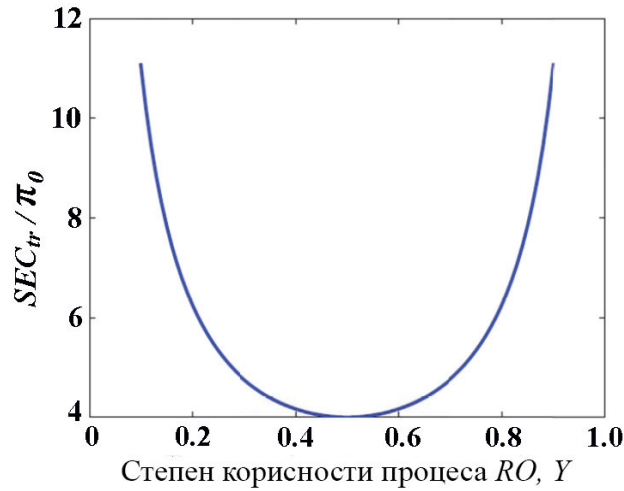
$$R = Const$$

$$\frac{dSEC_{tr, norm}}{dY} = R \frac{-[Y(1 - Y)]'}{[Y(1 - Y)]^2} = 0$$

$$[Y(1 - Y)]' = (Y - Y^2)' = 1 - 2Y = 0, \Rightarrow Y = \frac{1}{2}$$

и постигнута је за вредност степена корисности процеса $Y = 0,5$ (50%). За мембране високог степена одсољавања воде $R \approx 1$, минимална нормализована специфична потрошња енергије износи $(SEC_{tr, norm})_{min} = 4$. Дакле, минимум енергетских потреба десалинизационих система реверзибилне осмозе воде може се постићи уколико систем ради са степеном корисности процеса износи 50% при чему

трансмембрански притисак има вредност $4\pi_0$ (четворострука вредност осмотског притиска морске воде).



Слика 3.3. Промена математичке функције $SEC_{tr, norm}$ нормализоване специфичне потрошње енергије у зависности од степена корисности процеса једнофазног десалинizacionог система реверзибилне осмозе воде [30]

Теоријску вредност специфичне потрошње енергије једнофазног десалинizacionог система реверзибилне осмозе воде могуће је илустровати следећим практичним примером. За морску воду са концентрацијом растворених материја од 35000 mg/l и осмотски притисак морске воде $25 \cdot 10^5$ Pa, мембранску пропустљивост (за тржишно расположиве мембране) $L_p = 10^{-11} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$, теоријска вредност минималне потрошње енергије износи $4\pi_0 = 2,8 \text{ kWh/m}^3$. Вредност протока пречишћене воде добијена из израза (3.8) за једнофазне десалинizacionе системе реверзибилне осмозе воде при претходно наведеним радним режимима износи [30]:

$$\begin{aligned} (\text{Пречишћена вода})_{\text{запремински проток}} &= \frac{Q_p}{A_m} = L_p \cdot \left((\Delta p)_{opt} - \ln\left(\frac{1}{1 - Y_{opt}}\right) \cdot \frac{R \cdot \pi_0}{Y_{opt}} \right) \\ &= 0,6137 \cdot \pi_0 \cdot L_p = 17,68 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \end{aligned} \quad (3.26)$$

где је $(\Delta p)_{opt} = 2R\pi_0$ [Pa].

Проток пречишћене воде за радне режиме при минималној специфичној потрошњи енергије одређује се из израза (3.8) у зависности од расположиве површине мембране. При енергетски оптималним радним условима,

трансмембрански притисак и проток радног флуида морске воде представљају улазне променљиве процеса, стога излазне променљиве - проток концентроване и пречишћене воде, су константне за мембрански систем реверзибилне осмозе познатих карактеристика A_m и L_p .

3.2.1 Утицај трошкова управљања протоком концентроване воде на термодинамичка ограничења и минималне енергетске потребе десалинизационог система реверзибилне осмозе воде

Управљање насталим протоком концентроване воде је веома значајано и директно утиче на укупне трошкове производње пречишћене воде у десалинизационим системима реверзибилне осмозе воде. Настала концентрована вода из процеса реверзибилне осмозе обрађује се даљим технолошким поступцима (кристализације, процесима нултог пражњења течности и др.). Специфични енергетски трошкови управљања протоком концентроване воде су директно пропорционални са величином протока концентроване воде. Сходно томе специфични трошкови управљања протоком концентроване воде по јединици запремине пречишћене воде, нормализоване у погледу осмотског притиска морске воде приказани су следећим математичким изразом [30]:

$$SBC_{norm} = \frac{b \cdot Q_b}{\pi_0 \cdot Q_p} = \frac{b}{\pi_0} \cdot \frac{1-Y}{Y} \quad (3.27)$$

где су параметром b представљени трошкови управљања протоком концентроване воде изражени у виду енергетски еквивалентне јединице по запремини концентроване воде, $[\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{m}^3]$, Q_b - представља проток концентроване воде, Y - степен корисности процеса, π_0 - осмотски притисак морске воде, $[\text{Pa}]$.

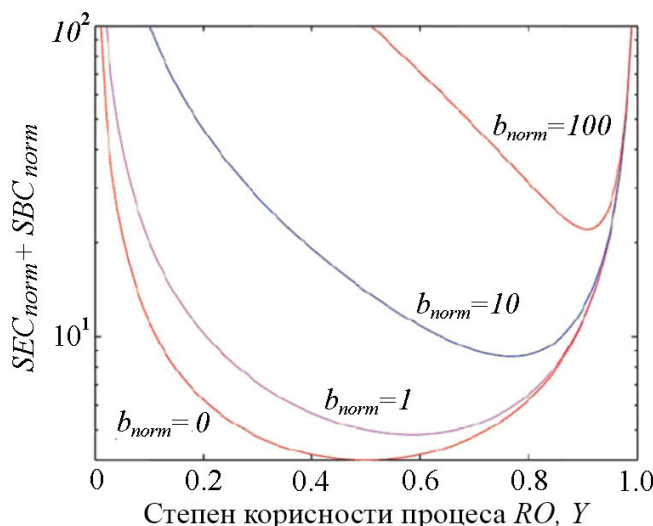
Израз (3.27) се може представити у погоднијем бездимензионалном облику када се параметар b замени изразом $b_{norm} = b/\pi_0$, где је π_0 осмотски притисак морске воде за концентрацију растворених материја у интервалу од 1000 до 35000 mg/l, $b = b_A \beta / \varepsilon$ где су параметром b_A изражени трошкови управљања протоком концентроване воде са јединицом $[\$/\text{m}^3]$, у интервалу од 0 до 0,20 $[\$/\text{m}^3]$, параметар ε представља цену електричне енергије у интервалу од 0,05 до 0,15 $[\$/\text{kWh}]$ и где је параметром β представљен енергетски конверзиони фактор $3,6 \cdot 10^6 [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{kWh}]$.

Након уврштавања предходно наведених вредности, добија се радно подручје параметра $b_{norm} = 1 \div 100$.

Сабирањем израза (3.24) нормализоване специфичне потрошње енергије и израза (3.27) специфичних трошкова управљања протоком концентроване воде изражених преко еквивалентних енергетских јединица добија се [30]:

$$SEC_{norm} + SBC_{norm} \geq \frac{1}{Y(1-Y)} + b_{norm} \cdot \frac{(1-Y)}{Y} \quad (3.28)$$

Знак једнакости између леве и десне стране израза (3.28) односи се на радне режиме при којима је трансмембрански притисак једнак осмотском притиску концентроване воде на завршној деоници мембранског модула, слика 3.4, где се степен корисности процеса при оптималним енергетским потребама повећава са повећањем цене управљања концентрованом водом.



Слика 3.4. Промене збирне математичке функције нормализоване специфичне потрошње енергије и нормализованих трошкова управљања концентрованом водом у зависности од степена корисности процеса једнофазног модела десалинizacionог система реверзибилне осмозе воде [30]

Другачије речено, повећањем трошкова управљања концентрованом водом за познате трошкове мембране дат је подстицај коришћења већег степена корисности процеса. Оптимална вредност степена корисности процеса добија се диференцирањем израза (3.28) по Y :

$$\frac{d}{dY} \left(\frac{1}{Y(1-Y)} + b_{norm} \cdot \frac{(1-Y)}{Y} \right) = 0 \quad (3.29)$$

$$Y_{opt} = \frac{\sqrt{1 + b_{norm}}}{1 + \sqrt{1 + b_{norm}}} \quad (3.30)$$

Из израза (3.28) произилази да се оптимална вредност степена корисности процеса за унапред задату мембранску површину повећава са повећањем трошкова управљања протоком концентроване воде, са друге стране смањује се до вредности $Y_{opt} = 0,5$ за случај када је параметар $b_{norm} = 0$.

3.3 Оптимизација модела процеса једнофазне конфигурације мембранског система реверзибилне осмозе воде за режиме рада изнад термодинамичког ограничења

Режими рада при којима се остварује минимална потрошња енергије унапред дефинисаног десалинizacionог постројења једнофазне реверзибилне осмозе воде, за задату концентрацију соли морске воде су константни. Међутим, захтевани капацитет производње пречишћене воде или коришћење расположивих капацитета предтретмана морске воде често захтева примену радних режима које одступају од оптималних вредности. Стога, за енергетски оптималне режиме рада изнад термодинамичких ограничења, потребно је одредити степен корисности процеса.

Сходно томе истраживање се одвија са циљем одређивања минималне специфичне потрошње енергије за унапред задате вредности протока морске воде и протока пречишћене воде сходно термодинамичком ограничењу дефинисаном изразом (3.19).

3.3.1 Оптимизација модела процеса једнофазне конфигурације мембранског система реверзибилне осмозе воде у зависности од радног режима протока пречишћене воде

За унапред дефинисано постројење реверзибилне осмозе воде када захтевани капацитет пречишћене воде није могуће остварити при радним режимима оптималне енергетске потрошње система, захтевани проток пречишћене воде биће остварен одступањем од оптималне вредности степена корисности процеса.

У овом случају погодно је дефинисати израз нормализованог протока пречишћене воде [30]:

$$Q_{p,norm} = \frac{Q_p}{A_m \cdot L_p \cdot \pi_0} = \frac{\Delta p - \overline{\Delta \pi}}{\pi_0} = \frac{\Delta p}{\pi_0} - \frac{\overline{\Delta \pi}}{\pi_0} \quad (3.31)$$

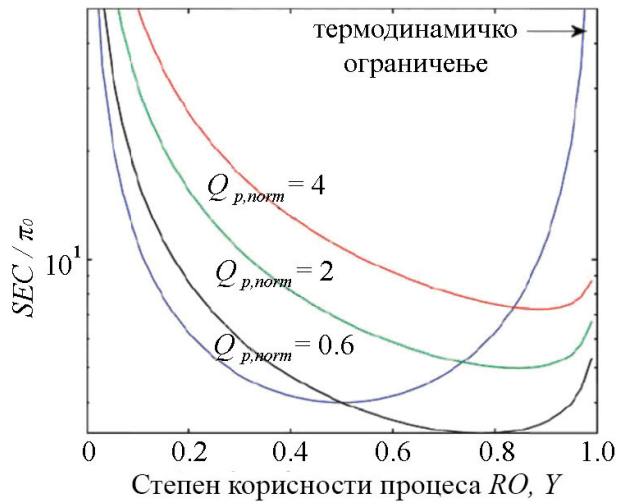
где први чинилац приказан са десне стране једнакости израза (3.31) представља $Y \cdot SEC_{norm}$ док се други чинилац може изразити из израза (3.11).

Стога функција SEC_{norm} добија облик [30]:

$$SEC_{norm} = \frac{SEC}{\pi_0} = \frac{Q_{p,norm}}{Y} + \frac{\ln\left(\frac{1}{1-Y}\right)}{Y^2} \quad (3.32)$$

где је SEC_{norm} функција степена корисности процеса и нормализованог протока пречишћене воде.

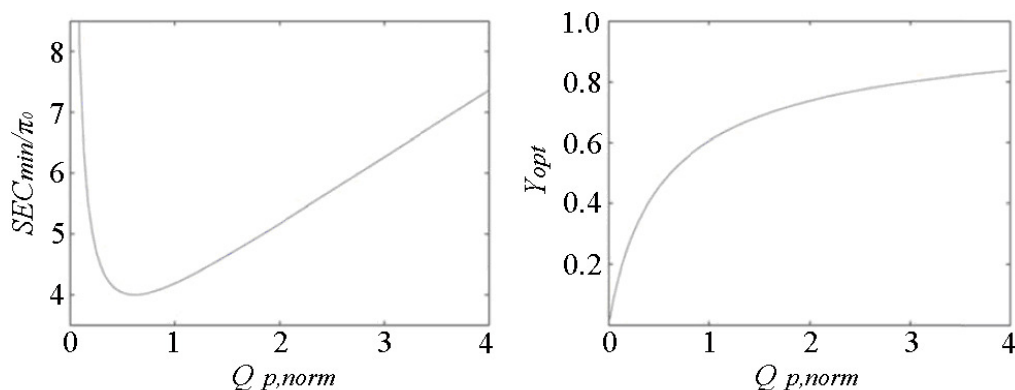
Сликом 3.5 приказана су одступања функције SEC_{norm} за веће степене корисности процеса $Y > 0,5$ од функције минималних енергетских захтева $(SEC_{norm})_{min}$.



Слика 3.5. Промена нормализоване специфичне потрошње енергије у зависности од степена корисности процеса за различите нормализоване протоке пречишћене воде једнофазног модела десалинизационог система реверзибилне осмозе [30]

Важно је напоменути да режими рада који су представљени испод криве термодинамичког ограничења практично нису оствариви. Најмање оствариве вредности нормализоване специфичне потрошње енергије десалинизационих система RO , SEC_{norm} (које одговарају тачкама пресека са кривом термодинамичког ограничења) за сваку појединачну вредност $Q_{p,norm}$ представљене су графиком на

слици 3.6.а. Промена $Q_{p,norm}$ у зависности од оптималног степена корисности процеса приказана је на слици 3.6.б.



Слика 3.6. а - Промена функције нормализоване минималне специфичне потрошње енергије у зависности од нормализованих протока пречишћене воде;
 б - Промена функције оптималног степена корисности процеса RO у зависности од нормализованих протока пречишћене воде [30]

Додатни трошкови управљања протоком концентроване воде за познату вредност параметра b_{norm} , померају оптимални степен корисности процеса ка већим вредностима чиме се истовремено повећава нормализована специфична потрошња енергије десалинizacionих система реверзибилне осмозе воде, што је представљено на слици 3.7.

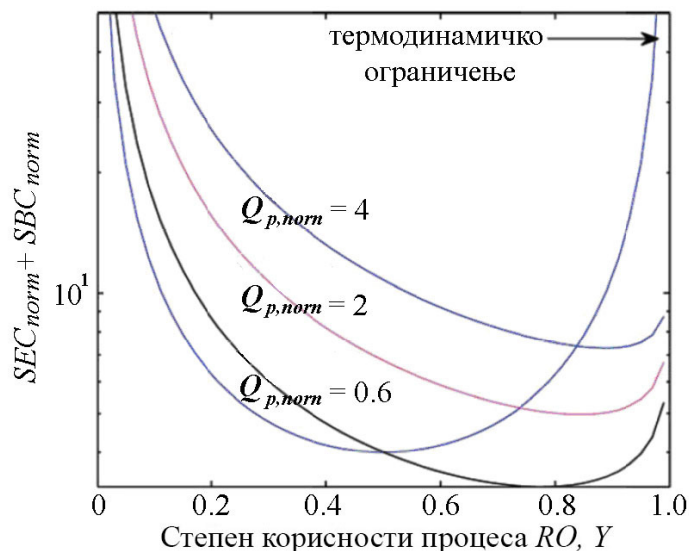
Додатни трошкови везани за управљање концентрованом водом могу се укључити у облику нормализованих трошкова изражених преко еквивалентних јединица, изразом (3.27), сабирањем са изразом (3.32) нормализоване специфичне потрошње енергије система [30]:

$$SEC_{norm} + SBC_{norm} = \frac{Q_{p,norm}}{Y} + \frac{\ln\left(\frac{1}{1-Y}\right)}{Y^2} + b_{norm} \cdot \frac{1-Y}{Y} \quad (3.33)$$

где је b_{norm} параметар трошкова одлагања концентроване воде.

Потребно је нагласити да радни режими десалинizacionих система реверзибилне осмозе воде за функцију $SEC_{norm} + SBC_{norm}$ нису оствариви у подручју испод криве термодинамичког ограничења приказане на слици 3.7. Минималне вредности функције $SEC_{norm} + SBC_{norm}$ налазе се у тачкама пресека са кривом термодинамичког ограничења. Такође реалне вредности трошкова система

реверзибилне осмозе воде се остварују у областима изнад криве термодинамичког ограничења.



Слика 3.7. Промена збирне математичке функције нормализоване специфичне потрошње енергије и трошкова управљања протоком концентроване воде у зависности од степена корисности процеса за различите нормализоване протоке пречишћене воде и вредност параметара $b_{norm} = 1$ [30]

3.3.2 Оптимизација модела процеса једнофазне конфигурације мембранског система реверзибилне осмозе воде у зависности од радног режима протока морске воде

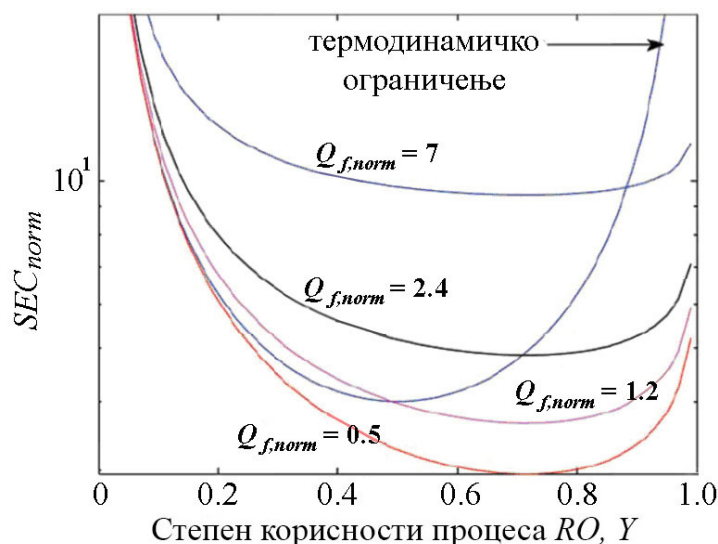
Проток морске воде као параметар радног режима десалинizacionог система реверзибилне осмозе воде у директној је зависности од расположивих капацитета допремања воде. Због тога објективна оптимизација система RO своди се на одређивање оптималног степена корисности процеса према захтеваном запреминском протоку пречишћене воде са циљем остваривања минималних енергетских потреба система. За уобичајене радне режиме проток пречишћене воде може бити изражен као $Q_p / A_m L_p = \Delta p - \overline{\Delta \pi}$, користећи израз $Q_p = Q_f \cdot Y$ могуће је представити нормализовану вредност протока морске воде у облику [30]:

$$Q_{f, norm} = \frac{Q_f}{A_m \cdot L_p \cdot \pi_0} = \frac{\Delta p - \overline{\Delta \pi}}{Y \cdot \pi_0} = \frac{\Delta p}{Y \pi_0} - \frac{\overline{\Delta \pi}}{Y \pi_0} \quad (3.34)$$

Први чинилац са десне стране једнакости израза (3.34) представља SEC_{norm} сходно изразу (3.7), изразу (3.11) и односу $Q_{f,norm} = Q_{p,norm} / Y$ може бити изражен као [30]:

$$SEC_{norm} = \frac{SEC}{\pi_0} = Q_{f,norm} + \frac{\ln\left(\frac{1}{1-Y}\right)}{Y^2} \quad (3.35)$$

График функције нормализоване специфичне потрошње енергије система реверзибилне осмозе воде у зависности од нормализованих вредности протока морске воде приказан је на слици 3.8. Радни режими испод криве термодинамичког ограничења нису оствариви. Минималне вредности нормализоване специфичне потрошње енергије система SEC_{norm} могуће је остварити у тачкама пресека са кривом термодинамичког ограничења. Такође реалне вредности нормализоване специфичне потрошње енергије система реверзибилне осмозе воде се остварују у областима изнад криве термодинамичког ограничења. Спектар минималних вредности SEC_{norm} у зависности од нормализованог протока морске воде $Q_{f,norm}$ приказан је на слици 3.9.а. Промена оптималног степена корисности процеса у зависности од нормализованих вредности протока морске воде приказана је на слици 3.9.б.



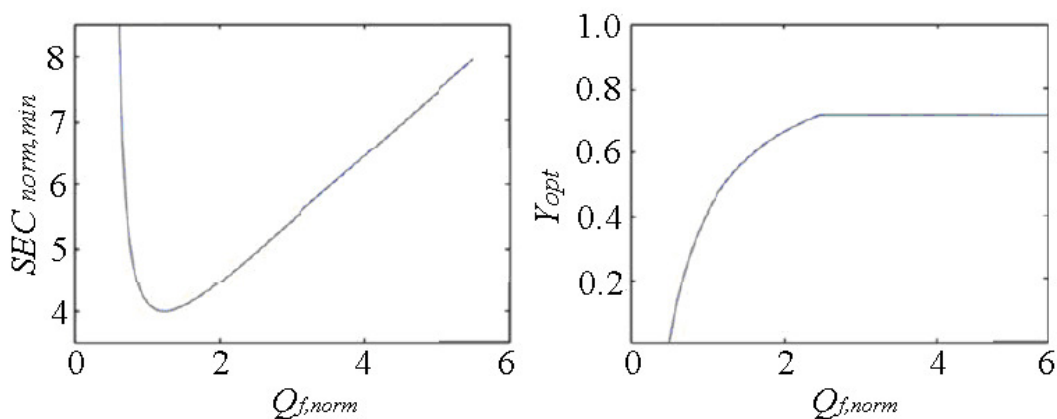
Слика 3.8. Промена нормализоване специфичне потрошње енергије у зависности од степена корисности процеса за различите нормализоване протоке морске воде једнофазног модела десалинизационог система реверзибилне осмозе [30]

Овај теоријски приступ се може илустровати на примеру десалинизационог система реверзибилне осмозе воде са радним режимом нормализоване вредности протока морске воде $Q_{f, norm} > 2,4$ где се решавањем диференцијалне једначине $\partial(SEC_{norm})/\partial Y = 0$ добија оптимална вредност степена корисности процеса од $Y = 71,53\%$ независно од термодинамичког ограничења.

Важно је напоменути да се криве различитих вредности $Q_{f, norm}$ приказане на слици 3.8 могу тумачити и као криве различитих вредности мембранске пропустљивости L_p за непроменљиве вредности Q_f , A_m и π_0 , према изразу (3.32), одакле се може закључити да са повећањем вредности L_p (вредност $Q_{f, norm}$ опада) специфична потрошња енергије система опада, све до већих вредности степена корисности процеса када наступа ефекат условљен термодинамичким ограничењем.

Оптималне вредности радног режима протока морске воде, узимајући у обзир трошкове управљања концентрованом водом, могу се израчунати из једначине збира нормализоване специфичне потрошње енергије система, израз (3.32), и трошкова управљања концентрованом водом, израз (3.27) [30].

$$SEC_{norm} + SBC_{norm} = Q_{f, norm} + \frac{\ln\left(\frac{1}{1-Y}\right)}{Y^2} + b_{norm} \cdot \frac{1-Y}{Y} \quad (3.36)$$



Слика 3.9. а - Промена нормализоване минималне специфичне потрошње енергије у зависности од нормализованих протока морске воде
 б - Промена оптималног степена корисности процеса RO у зависности од нормализованих протока морске воде [30]

Оптимална вредност степена корисности процеса (за минималну вредност специфичне потрошње енергије и трошкова управљања концентрованом водом) добија се решавањем диференцијалне једначине:

$$\frac{\partial}{\partial Y}(SEC_{norm} + SBC_{norm}) = 0 \quad (3.37)$$

чије је решење:

$$Y = \frac{\sqrt{2 \cdot (1 + b_{norm})}}{1 + \sqrt{2 \cdot (1 + b_{norm})}} \quad (3.38)$$

За десалинизационе системе реверзибилне осмозе воде у којима је вредност параметара трошкова одлагања концентроване воде занемарљива $b_{norm} = 0$ оптимална вредност степена корисности процеса износи $Y_{opt} = 71,53\%$. Међутим за системе у којима је вредност параметра b_{norm} значајна, оптимална вредност степена корисности процеса достиже веће вредности. Такође треба нагласити да режими рада у којима је функција $SEC_{norm} + SBC_{norm}$ приказана испод криве термодинамичког ограничења, нису оствариви.

3.3.3 Утицај одабира модела средње вредности разлике осмотског притиска морске воде и пречишћене воде дуж мембранског канала на специфичну потрошњу енергије модела процеса једнофазне конфигурације мембранског система реверзибилне осмозе воде

Начин одабира модела средње вредности разлике осмотског притиска морске воде пречишћене воде има квалитативан утицај на одређивање оптималних режима рада, иако до сада приказан приступ у овом раду остаје независан од метода одабира средњих вредности. С обзиром да пречишћена вода садржи изузетно малу концентрацију соли, осмотски притисак пречишћене воде је незнатан у односу на осмотски притисак морске воде и концентроване воде, сходно томе се може занемарити ($\pi_r \approx 0$).

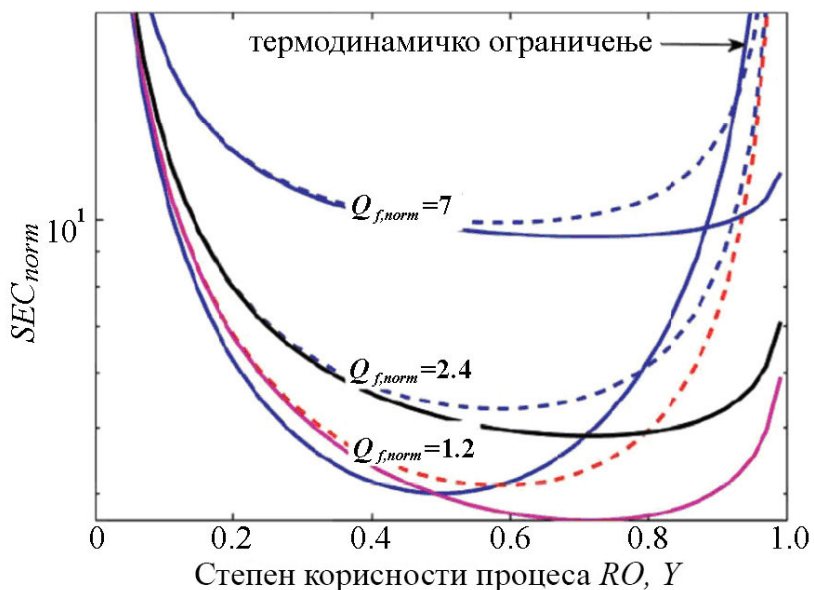
Када се средња аритметичка вредност осмотског притиска:

$$\overline{\Delta\pi} = \frac{1}{2}(f_{os} \cdot C_f + f_{os} \cdot C_r) \quad (3.39)$$

користи уместо средње логаритамске вредности, израз (3.10), функција $SEC_{tr,norm}$ остаје непромењена за термодинамичке граничне услове. Међутим коришћење

средње аритметичке вредности осмотског притиска дуж мембранског канала доводи до померања од оптималних услова степена корисности процеса у зависности од вредности нормализованих протока морске воде, што је приказано на слици 3.10. Овим примером је показано да при мањој вредности степена корисности процеса $Y < 0,4$ средња логаритамска и аритметичка вредност осмотског притиска дуж мембранског модула теже истим вредностима. При већим вредностима степена корисности процеса коришћење средње логаритамске вредности осмотског притиска дуж мембранског модула резултира мањим вредностима $(SEC_{norm})_{min}$ у односу на средње аритметичке вредности осмотског притиска дуж мембранског модула које предвиђају веће вредности трансмембранског притиска и веће вредности протока пречишћене воде. Истраживањима других аутора [77] је потврђено да средња аритметичка вредност разлике осмотског притиска дуж мембранског модула има већа одступања од резултата добијених експериментима.

Резултати добијени за средње аритметичке вредности осмотског притиска представљени су испрекиданим линијама, док су средње логаритамске вредности осмотског притиска представљене пуним линијама.



Слика 3.10. Промена нормализоване специфичне потрошње енергије у зависности од степена корисности процеса за различите нормализоване протоке морске воде једнофазног модела десалинизационог система реверзибилне осмозе воде без повраћаја енергије [30]

3.4 Удео пада притиска услед трења дуж деонице мембранског модула у трансмембранском притиску процеса једнофазне конфигурације мембранског система реверзибилне осмозе воде

Пад притиска дуж мембранског модула система реверзибилне осмозе је веома мали у поређењу са притиском морске воде. Утицај пада притиска воде услед трења на деоници дуж мембранског модула Δp_f на вредност протока пречишћене воде Q_p који важи за услове ламинарног режима струјања, дат је изразом [54],[78]:

$$Q_p = A_m \cdot L_p \cdot \overline{NDP} = A_m \cdot L_p (\Delta p - \overline{\Delta \pi} - \frac{\Delta p_f}{2}) \quad (3.40)$$

Трансмембрански притисак Δp је дат изразом [30]:

$$\Delta p = \overline{NDP} + \frac{\Delta p_f}{2} + \overline{\Delta \pi} \quad (3.41)$$

Пад притиска услед трења на деоници дуж мембранског модула користећи израз за просечну вредност ефективног притиска $\overline{NDP} = \frac{Q_p}{A_m \cdot L_p}$ може се представити као [79]:

$$\Delta p_f = \left(\frac{1}{2} \rho \cdot \bar{u}^{-2} \right) \cdot \left(\frac{24}{R_e} - \frac{648}{35} \cdot \frac{R_{ew}}{R_e} \right) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot R_{ew}}{R_e} \cdot \frac{x}{h} \right) \cdot \left(\frac{x}{h} \right) \quad (3.42)$$

где су:

ρ - густина воде на улазу, [kg/m³],

x - аксијална дужина мембранског модула, [m],

h - половина висине мембранског канала, [m],

\bar{u} - средња вредност аксијалне брзине [m/s] дата изразом [79]:

$$\bar{u} = \frac{\overline{Q_f}}{2 \cdot h \cdot W} = \frac{1}{2 \cdot h \cdot W} \cdot \left(\frac{Q_f + Q_b}{2} \right) = \frac{Q_p}{4 \cdot h \cdot W} \cdot \left(\frac{2}{Y} - 1 \right) \quad (3.43)$$

где су:

W - ширина мембранског модула, [m],

Y - степен корисности процеса.

Рејнолдсов број морске воде дефинисан је изразом [79]:

$$R_e = \frac{4 \cdot h \cdot \bar{u} \cdot \rho}{\mu} \quad (3.44)$$

где је:

μ - вискозитет морске воде.

Рејнолдсов број пречишћене воде дефинисан је изразом [79]:

$$R_{ew} = \frac{h \cdot v_w \cdot \rho}{\mu} \quad (3.45)$$

где је v_w брзина флуида пречишћене воде, [m/s].

Из израза (3.42) може се закључити да је:

$$\Delta p_f < \left(\frac{1}{2} \rho \cdot \bar{u}^{-2} \right) \cdot \left(\frac{24}{R_e} \right) \cdot \left(\frac{x}{h} \right) \quad (3.46)$$

Претходни израз се може написати у следећем облику коришћењем израза (3.43) и израза (3.44) [30]:

$$\frac{\Delta p_f}{NDP} < \frac{3 \cdot \mu \cdot x^2 \cdot L_p \cdot \left(\frac{2}{Y} - 1 \right)}{2 \cdot h^3} \quad (3.47)$$

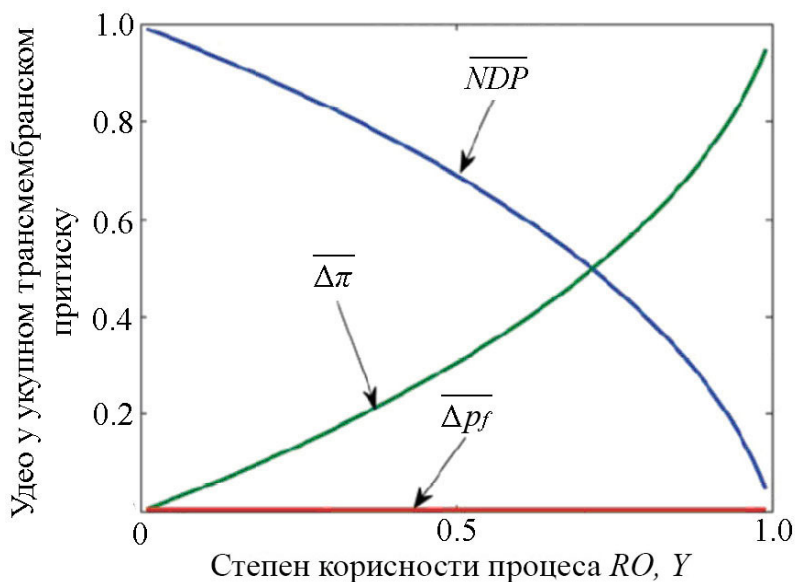
Однос пада притиска услед трења дуж мембранског модула и трансмембранског притиска може се представити у следећем математичком облику [30]:

$$\frac{\Delta p_f}{\Delta p} < \frac{\Delta p_f}{NDP} < \frac{3 \cdot \mu \cdot x^2 \cdot L_p \cdot \left(\frac{2}{Y} - 1 \right)}{2 \cdot h^3} \quad (3.48)$$

Уколико се примене реални параметри мембрана доступних на тржишту: $h \approx 0,001 - 0,01$ m, $\mu \approx 0,001 - 0,005$ Pa·s, $L_p \approx 10^{-11} - 10^{-10}$ m/(s·Pa) и $x \approx 0,1 - 1$ m, за реалне вредности степена корисности процеса реверзибилне осмозе воде $Y \approx 0,3 - 0,95$, десна страна израза добија вредности у интервалу: $10^{-10} - 10^{-2}$. Овим се закључује да је утицај пада притиска услед трења на деоници дуж мембранског модула на одређивање оптималних режима рада је занемарљив.

Сходно изразу (3.48), удео пада притиска услед трења на деоници дуж мембранског модула, удео средње логаритамске вредности разлике осмотског притиска дуж мембранског модула и удео ефективног притиска процеса

реверзибилне осмозе на вредност трансмембранског притиска представљени су графиком на слици 3.11.



Слика 3.11. Функције удела \overline{NDP} , $\Delta\pi$ и Δp_f на вредност трансмембранског притиска при радним режимима за термодинамичке граничне услове [30]

Графиком су приказани удели претходно наведених притисака, за мембрански систем дефинисан параметрима $h \approx 0,001 \text{ m}$, $\mu = 0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $L_p = 10^{-9} \text{ m}/(\text{s}\cdot\text{Pa})$ и $x = 1 \text{ m}$.

Анализом кривих приказаних на слици 3.11 закључује се да је утицај пада притиска услед трења на деоници дуж мембранског модула занемарљив (<1% од укупног трансмембранског притиска). Крива средње логаритамске вредности разлике осмотског притиска дуж мембранског модула показује да удео у укупном трансмембранском притиску расте са повећањем степена корисности процеса. Крива ефективног притиска процеса реверзибилне осмозе показује да удео у трансмембранском притиску опада са повећањем степена корисности процеса. Потребно је нагласити да се повећањем вредности ефективног притиска процеса реверзибилне осмозе (услед смањења пропустљивости мембране), удео средње логаритамске вредности разлике осмотских притисака дуж мембранског модула у трансмембранском притиску смањује. Смањивањем \overline{NDP} смањује се економска оправданост развоја мембрана веће пропустљивости, јер утицај средње

логаритамске вредности разлике осмотских притисака предузима доминантан утицај у укупним енергетским трошковима десалинизационог система реверзибилне осмозе воде. Са друге стране радни режим са високим ефективним притиском \overline{NDP} је оправдан уколико се користе високо пропусне мембране.

3.4.1 Утицај степена корисности склопа пумпе и електромотора на специфичну потрошњу електричне енергије процеса реверзибилне осмозе воде

Степен корисности пумпе може бити обухваћен у датом приступу анализе оптималне SEC , за једнофазни процес RO . Наиме, нормализована специфична потрошња енергије при термодинамичким граничним условима, обухватајући степен корисности склопа пумпе и електромотора $SEC_{tr, norm}(\eta_{P-EM})$, може се изразити као [30]:

$$SEC_{tr, norm}(\eta_{P-EM}) = \frac{SEC_{tr}(\eta_{P-EM} = 1)}{\pi_0 \eta_{P-EM}} = \frac{1}{Y(1-Y)\eta_{P-EM}} \quad (3.49)$$

где η_{P-EM} представља степен корисности склопа пумпе и електромотора која узима вредности у интервалу $(0 \div 1)$.

За овај случај, оптимални степен корисности процеса пречишћене воде остаје $Y_{opt} = 50\%$, а одговарајући нормализовани минимални SEC $4/\eta_{P-EM}$.

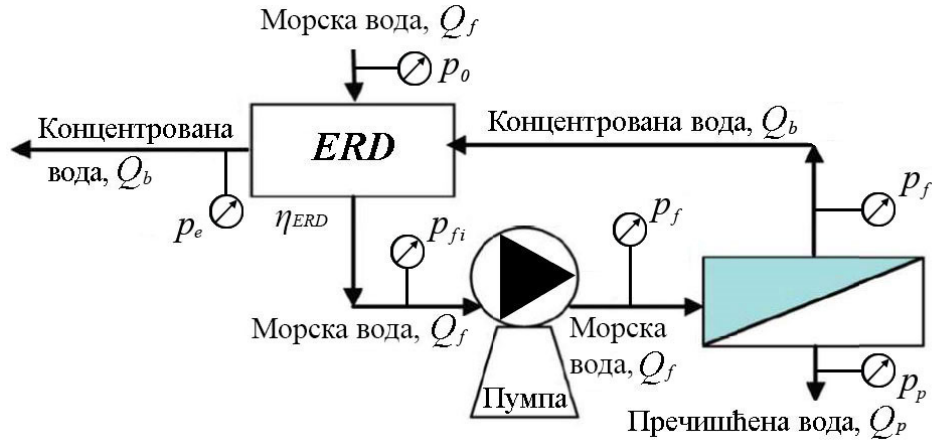
3.4.2 Утицај уређаја за повраћај енергије на специфичну потрошњу енергије процеса реверзибилне осмозе воде

У циљу смањења потребне енергије за десалинизацију RO , део енергије може бити поново коришћен на основу притиска концентроване воде, употребом различитих техничких решења уређаја за повраћај енергије [78]. Шематски приказ повраћаја енергије приказан је на слици 3.12 за поједностављени модел процеса RO . p_e и p_p појединачно представљају притисак концентроване на излазу из ERD и притисак пречишћене воде, при чему су, сходно апроксимацији, једнаки са притиском морске воде $p_o = p_e = p_p$.

Остварена снага пумпе морске воде, у присуству ERD , представљена је изразом:

$$\dot{W}_{pump} = \Delta p \cdot (Q_f - \eta_{ERD} Q_b) \quad (3.50)$$

где је $\Delta p Q_b$ максимална снага која се може повратити из концентроване воде, $\Delta p = p_f - p_p$, Q_f је проток морске воде, Q_b је проток концентроване воде, а η_{ERD} је степен корисности уређаја за повраћај енергије који представља способност *ERD* да поврати енергију високог притиска из концентроване воде.



Слика 3.12. Поједностављени систем *RO* са повраћајем енергије (*ERD*)

Специфична потрошња енергије за десалинизацију *RO*, у присуству *ERD*, $SEC^{ERD}(Y, \Delta P, \eta_{ERD})$, представљена је следећим изразом:

$$SEC^{ERD}(Y, \Delta P, \eta_{ERD}) = \frac{\Delta p(Q_f - \eta_{ERD}Q_b)}{Q_p} = \frac{\Delta p(1 - \eta_{ERD}(1 - Y))}{Y} \quad (3.51)$$

Термодинамичко ограничење за једнофазни процес *RO*, у коме се користи *ERD*, може се добити заменом израза (3.19) у израз (3.51).

Сходно томе, нормализована специфична потрошња енергије за ову конфигурацију, приказана је изразом:

$$SEC_{tr, norm}^{ERD} = \frac{SEC_{tr}^{ERD}}{\pi_o} = \frac{(1 - \eta_{ERD}(1 - Y))}{Y(1 - Y)} \quad (3.52)$$

Где π_o [Pa] представља осмотски притисак морске воде, Y представља степен корисности процеса *RO*. Минимална нормализована вредност специфичне потрошње енергије у системима реверзибилне осмозе коришћењем *ERD* добија се диференцирањем израза (3.52) по Y :

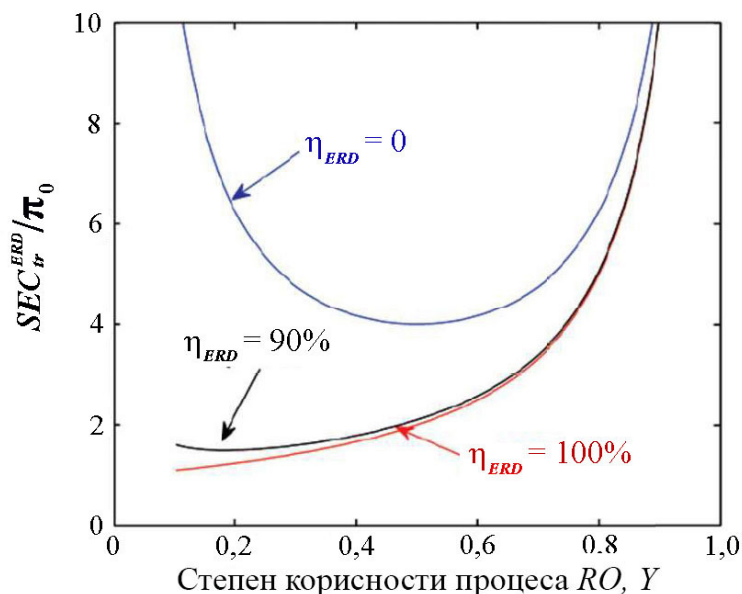
$$\left(\frac{\partial(SEC_{tr, norm}^{ERD})}{\partial Y}\right) = 0 \quad (3.53)$$

$$Y_{opt} = \frac{\sqrt{1-\eta_{ERD}}}{1+\sqrt{1-\eta_{ERD}}} \quad (3.54)$$

Минимална нормализована вредност специфичне потрошње енергије у десалинизационим системима који користе ERD одређена је изразом:

$$(SEC_{tr, norm}^{ERD})_{min} = (1 + \sqrt{1 - \eta_{ERD}})^2 \quad (3.55)$$

Повећањем степена корисности ERD , оптимална вредност степена корисности процеса Y_{opt} се смањује, слика 3.13, сугеришући да са повећаним степеном корисности ERD и нижој вредности степена корисности процеса остварује се минимална вредност SEC . У процесима десалинизације RO већи допринос повраћаја енергије постиже се када систем ради на нижој вредности степена корисности процеса. Поређењем са варијантом једнофазног система RO без ERD уређаја, слика 3.13 потврђује се да присуство ERD утиче на вредност оптималног степена корисности процеса десалинизационог система која добија ниже вредности од 50% у циљу постизања минимума SEC .



Слика 3.13. Нормализована специфична потрошња енергије у зависности од степена корисности процеса мембранског система, коришћењем ERD у једнофазном процесу реверзибилне осмозе [30]

Може се закључити да широка примена мембранских модула RO при нижим вредностима трансмембранског притиска, захваљујући високој пропустљивости мембране, омогућава да се вредности трансмембранског притиска морске воде

приближе вредностима осмотског притиска концентроване воде на завршној деоници мембранског модула. Дакле, могућа је оптимизирати специфичну потрошњу енергије у зависности од степена корисности процеса *RO*, у складу са термодинамичким ограничењима. У овом поглављу, представљен је приступ оптимизације процеса одстрањивања соли из морске воде коришћењем високопропусних мембрана према различитим сценаријима процеса *RO*. Садашњи резултати показују да је могућа оптимизација десалинизационих процеса *RO* са циљем остваривања минималне специфичне потрошње енергије, узимајући у обзир ефекте осмотског притиска обухваћеним моделом термодинамичког ограничења. Утицај уређаја за повраћај енергије, пропустљивости мембрана, управљање трошковима протока концентроване воде, степен корисности пумпе и пад притиска услед трења дуж мембранског модула обухваћени су овим приступом, као што је и приказано на дијаграмима. Свеобухватно гледано, с обзиром да су укупни трошкови процеса већи од трошкова енергије, оперативна тачка за постизање минималних трошкова система сугерише примену радних режима са већом вредношћу степена корисности процеса.

4. ОПТИМИЗАЦИЈА ПРОЦЕСА РЕВЕРЗИБИЛНЕ ОСМОЗЕ ВОДЕ

4.1 Квалитет и значај постојећих мембрана

Мембрански процес *RO* је најзаступљенија технологија за производњу пијаће воде. Тренутна генерација мембрана је високе пропусне моћи и омогућава десалинизацију на ниским притисцима, при чему је трансмембрански притисак морске воде приближно једнак осмотском притиску концентроване воде на завршној деоници мембранског модула [13]. Технички је изводљиво остварити радне режиме процеса *RO* за термодинамичку граничну вредност [30]. Код претходних генерација нископропусних мембрана трансмембрански притисак морао је имати значајно веће вредности од осмотског притиска концентроване воде на завршној деоници мембранског модула мембранског модула, како би се остварио захтевани проток пречишћене воде. Садашње генерације високопропустљивих мембрана омогућавају еквивалентну или већу производњу пречишћене воде на нижим вредностима трансмембранског притиска. Величина осмотског притиска концентроване воде утиче на укупни степен корисности процеса [80].

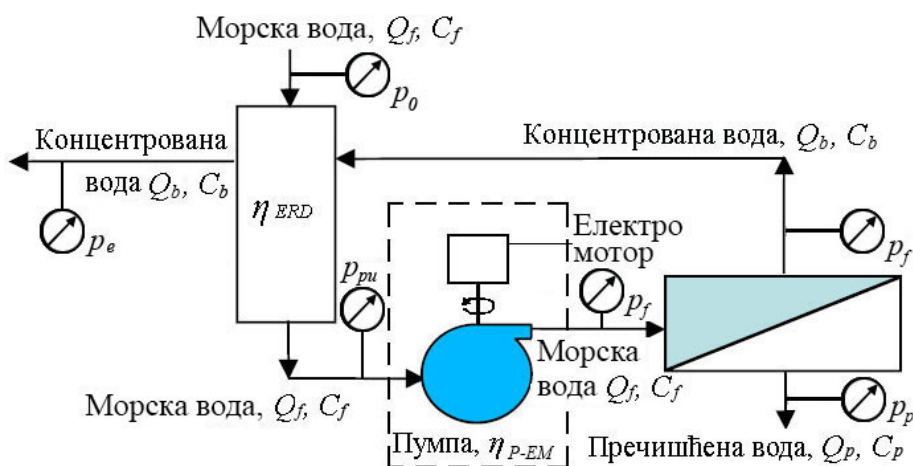
Применом савремене генерације високо пропусних мембрана *RO*, могуће је управљати процесом *RO* у широком интервалу степена корисности процеса у околини термодинамичких граничних вредности, као што је описано у претходном поглављу, што отвара питање економске исплативости развоја мембрана са још већим својствима пропустљивости од садашњих [80]. Процес десалинизације *RO* на нижим притисцима остварује смањену потрошњу енергије за захтевани степен корисности процеса. Енергетски трошкови система директно зависе од вредности протока и притиска морске воде [8],[30]. Дакле, у мери у којој разматрани систем високо пропустљивих мембрана може да обезбеди захтевани проток пречишћене воде за дати проток морске воде, трошкови енергије ће бити независни од типа мембране која се користи у процесу. Претпостављено је да се, без обзира на

одабрану мембрану, процес RO може одвијати у околини термодинамичких граничних вредности. Међутим, потребна површина мембране, према дефинисаном протоку морске воде и траженом степену корисности процеса, смањиће се са повећањем пропустљивости мембране. Када се процес RO одвија при радним режимима у околини термодинамичких граничних вредности, допринос високопропустљивих мембрана огледа се у смањењу укупних трошкова израде мембрана (који приближно износе $<10\%$ од укупних трошкова производње воде). Поређења ради, енергетски трошкови процеса RO имају удео $>30\%$ у укупним трошковима производње пречишћене воде [53].

Придајући велики значај десалинизационом процесу RO у системима за производњу пијаће воде, у оквиру овог рада анализираће се корисност унапређења карактеристика пропустљивости мембране у енергетским и инвестиционим трошковима израде мембрана.

4.2 Моделирање процеса реверзибилне осмозе и резултати

У циљу илустровања релативних енергетских трошкова и потребне површине мембрана разматран је пример једнофазне десалинизације RO , слика 4.1. Претходне студије [80] су показале да, у циљу постизања производности пречишћене воде дуж целог мембранског модула, трансмембрански притисак $\Delta p = p_f - p_o$, који представља разлику притиска морске воде и притиска пречишћене воде треба имати једнаку или већу вредност од осмотског притиска концентроване воде на завршној деоници мембранског модула, што је представљено изразом (3.19)



Слика 4.1. Приказ система RO са уређајем за повраћај енергије (ERD)

За радне режиме процеса RO при термодинамичким граничним вредностима трансмембранског притиска, (тј. $\Delta p = \Delta \pi_{izlaz}$) осмотски притисак концентроване воде на завршној деоници мембранског модула, поседује исту вредност као и осмотски притисак на површини мембране. Наведени исказ је у складу са теоријом концентроване поларизације мембранског модула. Модел концентрационе поларизације у мембранском модулу представљен је изразом [81]:

$$CP = \frac{C_m}{C_b} = e^{\left(\frac{Q_p}{k}\right)} \quad (4.1)$$

где су C_m и C_b концентрације растворених материја на површини мембране и у концентрованој води на излазу из мембране, Q_p представља проток пречишћене воде а k је коефицијент пролажења морске воде кроз мембрану. Вредност параметра концентроване поларизације $C_p = 1$, остварује се при термодинамичкој граничној вредности трансмембранског притиска на излазу мембранског модула, при чему је $C_m = C_b$ и остварени проток пречишћене воде $Q_p = 0$.

4.2.1 Специфична потрошња електричне енергије система RO при термодинамичким граничним вредностима

Као што је недавно објављено [80], специфична потрошња енергије, нормализована у складу са осмотским притиском морске воде ($SEC_{norm} = SEC / \pi_o$), је једнака или већа од нормализоване потрошње енергије (SEC_{tr}^{norm}) при термодинамичким граничним вредностима [30],

$$SEC_{tr}^{norm} = \frac{SEC_{tr}}{\pi_o} = \frac{(1 - \eta_{ERD})(1 - Y)R}{\eta_{P-EM} Y(1 - Y)} \quad (4.2)$$

где су:

η_{P-EM} - степен корисности склопа пумпе и електромотора,

η_{ERD} - ефикасност уређаја за повраћај енергије (ERD),

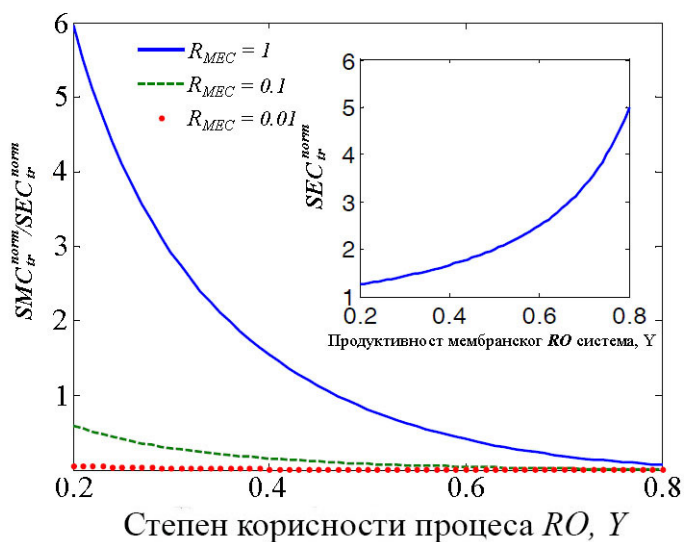
R - степен одстрањивања соли,

Y - степен корисности процеса,

π_o - осмотски притисак морске воде, [Pa].

За радне режиме при термодинамичким граничним вредностима где је $SEC_{norm} = SEC_{tr}^{norm}$, израз (4.2), SEC_{tr}^{norm} има пораст са повећањем степена корисности

процеса као што је приказано графиком (у горњем десном углу) на слици 4.2, за захтевани степен одстрањивања соли од 99% и идеални степен корисности склопа пумпе и електромотора ERD (тј, $\eta_{P-EM} = \eta_{ERD} = 1$), крива нормализоване специфичне потрошње енергије добија стрмији пораст, када вредност степена корисности процеса превазилази 60%. Параметри који утичу на снагу пумпе су: вредност разлике притиска кроз пуму (која је једнака трансмембранском притиску), степен корисности пумпе и ERD , вредност протока морске воде за задату вредност степена корисности процеса. Захтевана снага пумпе не зависи од величине пропустљивости мембране. Такође, нормализована потрошња енергије, SEC_{tr}^{norm} , је независна од пропустљивости мембране када се процес одвија при термодинамичким граничним вредностима, израз (4.2). Другим речима, ако је пропустљивост мембране таква да омогућава остваривање захтеваног степена корисности процеса, тако да се осмотски притисак концентроване воде на завршној деоници мембранског модула приближава трансмембранском притиску морске воде, коришћење више пропустљиве мембране не би смањило нормализовану специфичну потрошње енергије процеса реверзибилне осмозе, док истовремено има директан утицај на смањење укупних мембранских трошкова.



Слика 4.2. Однос функција (SMC_{tr}^{norm}) и (SEC_{tr}^{norm}) у процесу RO при термодинамичким граничним вредностима. График у горњем десном углу приказује нормализовану SEC_{tr}^{norm} при термодинамичким граничним вредностима [35]

4.2.2 Специфични трошкови мембране за процес RO при термодинамичким граничним вредностима

У циљу процене трошкова израде мембрана које се користе за производњу пречишћене воде (амортизовани трошкови мембране сведени на запремину пречишћене воде називају се „специфични трошкови мембране“) за дати процес десалинизације, значајно је упоредити трошкове израде мембрана и енергетске трошкове користећи идентичне јединице [$\text{Pa}\cdot\text{m}^3$]. Ова конверзија се може постићи [30] за познату цену енергије, на пример, $\varepsilon[\$/\text{kWh}]$ и фактора конверзије $\beta[\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{kWh}]$.

Долази се до закључка да за једнофазни процес RO , специфични трошкови мембране приказани у облику енергетских јединица (SMC) представљени су изразом [35]:

$$SMC = \frac{m \cdot A_m}{Q_p} = \frac{m}{Q_p} \left[\frac{Q_p}{L_p (\Delta p - \sigma \overline{\Delta \pi})} \right] \quad (4.3)$$

где је m амортизована цена мембране у еквивалентним јединицама енергије по јединици површине мембране, $m = m_A \beta / \varepsilon$, у којој је, ради илустрације, m у јединицама [$\text{Pa}\cdot\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$], m_A је амортизована јединична цена мембране [$\$/(\text{m}^2\text{h})$], Q_p је проток пречишћене воде [m^3/h], Δp је трансмембрански притисак [Pa], L_p - пропустљивост мембране [$\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$], σ - коефицијент рефлексије мембране, $\overline{\Delta \pi}$ - средња логаритамска вредност разлике осмотског притиска концентроване воде и пречишћене воде [Pa].

Специфични трошкови мембране за десалинизацију RO при термодинамичкој граничној вредности трансмембранског притиска ($\Delta p = \Delta \pi_{izlaz}$), нормализовани су у односу на осмотски притисак морске воде SMC_{tr} / π_o представљени су изразом [35]:

$$SMC_{tr}^{norm} = \frac{m}{RL_p \pi_o^2 \left[\frac{1}{1-Y} - \frac{1}{Y} \ln \left(\frac{1}{1-Y} \right) \right]} \quad (4.4)$$

који је изведен из израза (4.3) користећи логаритамску средњу вредност за осмотски притисак ($\overline{\Delta \pi} = \pi_o R \ln(1/(1-Y))/Y$). За радне режиме трансмембранског

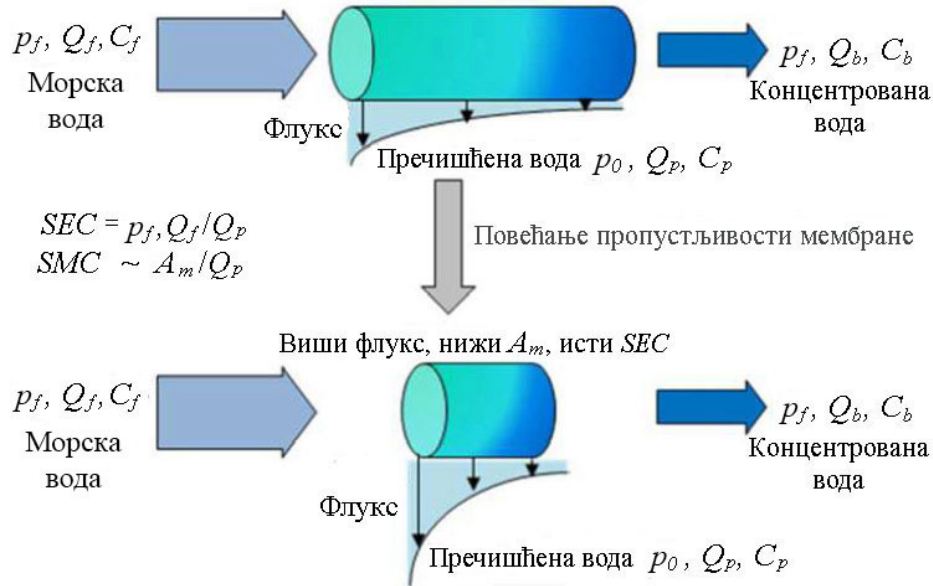
притиска при термодинамичким граничним вредностима Δp , $\Delta p = \pi_o R / (1 - Y)$, може се закључити да је SMC сходно изразу (4.3), обрнуто пропорционалан π_o и стога је $SMC_{tr}^{norm} \rightarrow (1 / \pi_o^2)$. Израз (4.4) указује на то да, за исти степен корисности процеса Y , нормализовани специфични трошкови мембране (SMC_{tr}^{norm}) ће се смањивати са повећањем пропустљивости мембране, степена одстрањивања соли и осмотског притиска морске воде. Употребом високопропустљивих мембрана смањиће се захтевана мембранска површина, као и потребан број мембранских посуда под притиском. Закључује се да ће трошкови хемијског чишћења и замене мембрана самим тим бити смањени. Међутим, радни режими који омогућавају већи проток пречишћене воде, могу довести до већег степена таложења материја и задржаности мембране, што са друге стране доводи до смањења степена корисности процеса [35].

Напомиње се да потребна површина мембрана (A_M), а самим тим и цена мембрана, за производњу пречишћене воде, зависи од просечне вредности ефективног притиска процеса RO , $\overline{NDP} (= \Delta p - \sigma \overline{\Delta \pi})$ при чему је $A_M = Q_p / \overline{NDP}$. Последица ове зависности може се илустровати на примеру десалинизације при степену корисности процеса од 50%. Као пример наводи се десалинизација морске воде при осмотском притиску морске воде од 2533 kPa (~35000 mg/l TDS) при степену корисности процеса од 50%, довешће до осмотског притиска концентроване воде на завршној деоници мембранског модула од 5066 kPa. Дакле, просечан ефективни притисак процеса RO , $\overline{NDP} = (\Delta p - \sigma \overline{\Delta \pi})$ за проток пречишћене воде биће 1554 kPa (при претпоставци да је $\sigma = 1$).

Поређења ради, десалинизацијом морске воде концентрације од 3500 mg/l TDS (осмотски притисак од 253,3 kPa) при степену корисности процеса од 50% оствариће осмотски притисак на излазу из мембранског модула од 506,6 kPa и вредност ефективног притиска процеса реверзибилне осмозе \overline{NDP} од 155,4 kPa.

За исти степен корисности процеса добијена је виша вредност \overline{NDP} за виши осмотски притисак морске воде, при радним режимима за термодинамичке граничне вредности, где је потребна мања површина мембране за десалинизацију морске воде у односу на десалинизацију воде мање концентрације растворених материја при истом степену корисности процеса. Претходно наведено може

изгледати контрадикторно, али то представља последицу радних режима при термодинамичким граничним вредностима.



Слика 4.3. Приказ ефекта пропустљивости мембране на SEC и SMC за процес RO при термодинамичким граничним вредностима

4.2.3 Однос специфичних трошкова мембране и специфичне потрошње електричне енергије процеса RO при термодинамичким граничним вредностима

Специфични трошкови мембране у односу на специфичну потрошњу енергије, при термодинамичким граничним вредностима добијају се дељењем израза (4.2) изразом (4.4) [35]:

$$MER = \frac{SMC_{tr}^{norm}}{SEC_{tr}^{norm}} = \frac{R_{MEC} \eta_{P-EM} Y(1-Y)}{\left[\left(\frac{1}{1-Y} - \frac{1}{Y} \ln \left(\frac{1}{1-Y} \right) \right) (1 - \eta_{ERD}(1-Y)) \right]} \quad (4.5)$$

у којој R_{MEC} представља бездимензиони фактор трошкова [35]:

$$R_{MEC} = \frac{\beta m_A}{\epsilon L_p (R \pi_0)^2} \quad (4.6)$$

Израз (4.5) указује да, за дати степен корисности процеса, вредност MER расте са порастом R_{MEC} . Збирни фактор R_{MEC} представља утицај осмотског

притиска морске воде π_0 , захтеваног нивоа одстрањивања соли R и цене електричне енергије на релативни удео трошкова мембране израженог у облику трошкова енергије у укупним трошковима за производњу воде. Посебно треба нагласити да је бездимензиони фактор R_{MEC} обрнуто пропорционалан квадрату осмотског притиска морске воде π_0 , због чињенице да су трошкови енергије и трошкови мембрана респективно пропорционални, израз (4.2), и обрнуто пропорционални, израз (4.3), осмотском притиску морске воде. Као последица овог бездимензионог фактора, удео трошкова енергије у укупним трошковима за производњу пречишћене воде драстично ће се повећати како се повећава осмотски притисак морске воде. Квантитативни однос трошкова мембране и енергетских трошкова може се представити интервалом вредности фактора R_{MEC} . За потребе ове анализе узета је цена мембране по јединици површине [m^2], за савремене мембране RO ниског притиска ($L_p = 0,39 - 2,2 \cdot 10^{-11} m^3/m^2 \cdot s \cdot Pa$) је у опсегу од 10 до 20 $\$/m^2$ (тако $m_A = 0,6 - 1,3 \cdot 10^{-7} \$/m^2 \cdot s$), под претпоставком да је животни век мембране пет година, а цена електричне енергије у распону од 0,05 до 0,2 $\$/kWh$. Са побољшањима мембранске технологије будући трошкови мембране биће вероватно нижи у поређењу са садашњим ценама. Посматрани опсег концентрације растворених материја у води је 1000 – 45000 mg/l TDS (еквивалент осмотског притиска вредности 72,4 до 3257 kPa). За наведене вредности параметара, R_{MEC} је у опсегу од 0,001 до 1. На пример, за морску воду $\sim 35000 mg/l$ TDS и за воду нижих вредности концентрације растворених материја 1000 mg/l TDS , R_{MEC} биће у опсегу од 0,01 до 1.

Функција (MER) односа нормализованих специфичних трошкова мембрана и нормализоване специфичне потрошње енергије (изражених преко еквивалентних јединица) у зависности од степена корисности процеса, приказана је на слици 4.2, за различите вредности бездимензионог броја R_{MEC} , у случају идеалних вредности степена корисности склопа пумпе и електромотора и ERD ($\eta_{P-EM} = \eta_{ERD} = 1$). Као што се очекивало, однос трошкова мембрана и специфичне потрошње енергије се смањују са повећањем степена корисности процеса и смањењем R_{MEC} . Ради илустрације, за вредност $R_{MEC} = 0,04$ (постигнут десалинизацијом 35000 mg/l TDS

морске воде коришћењем мембране *Dow FilmTec SW30XLE-400i*, $L_p = 0,39 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$), однос специфичних трошкова мембране (SMC_{tr}) и специфичне потрошње енергије (SEC_{tr}), за степен корисности процеса од 30 до 50%, је у опсегу од 4 до 15%. За десалинизацију морске воде, проценат трошкова енергије је уобичајено у интервалу од 40% до 58% од укупних трошкова за производњу воде [53]. За претходно наведене вредности, удео специфичних трошкова мембране у укупним трошковима производње пречишћене воде, која се може представити као производ горе наведена два фактора, износи од 1,6% до 7,5% од укупних трошкова производње пречишћене воде, која је унутар опсега трошкова мембране приказане у литератури. Ово сугерише да максимална корист која се може очекивати од побољшања пропустљивости мембране представља смањење укупних трошкова производње воде за приближно исти проценат. Наводи се, на пример, да ће удвостручавање пропустљивости мембране смањити специфичне трошкове мембране, израз (4.5), на половину почетне вредности, и на тај начин ће смањити укупне трошкове производње воде за од 0,6% до 3%. Такође је установљено да инвестициони трошкови израде мембранских посуда под притиском директно зависе од површине мембране (мање површине мембрана захтевају мањи број мембранских посуда под притиском). За претходно наведени удео трошкова мембрана у укупним трошковима производње воде, обухватањем трошкова мембранских посуда под притиском који се амортизују током 30 година; имало би за последицу имало смањење укупних трошкова производње воде за од 0,7% до 3,5% [82],[83]. Сходно томе, упркос наведеном скромном проценту уштеде у производњи воде, приметне уштеде у укупним трошковима производње пречишћене воде су оствариве код великих постројења *RO*. Примена претходно наведених уштеда, зависиће од тога да ли је могуће остварити радне режиме процеса *RO* при већим вредностима пролазности воде кроз мембрану, избегавајући биозапрљаност и таложење материја на мембранским површинама. Ово подразумева да ће код система са нижим вредностима степена корисности процеса, употреба високопропустљивих мембрана биће погодна за смањење укупних трошкова производње пречишћене воде, с обзиром да су специфични трошкови мембране већи од специфичне потрошње енергије. Показано је да трошкови мембране представљају важан удео у укупним трошковима процеса десалинизације

вода ниже концентрације растворених материја [53] при умереном степену корисности процеса ($\leq 60\%$). Међутим, при десалинизацији вода нижих концентрација растворених материја, трошкови процеса припреме морске воде и управљање трошковима протока концентроване воде повећавају се са смањењем степена корисности процеса, тако да се смањује економски подстицај радних режима са ниским степеном корисности процеса. Са друге стране, повећањем степена корисности процеса, SEC се повећава док се SMC смањује, чиме се иницира смањен економски подстицај за развој више пропустљивих мембрана за радне режиме са високим степеном корисности процеса. Наведена тврдња заснива се на претпоставци идеалних степена корисности пумпе и ERD . Важно је рећи да за десалинизациона постројења која користе склоп пумпе и електромотора и ERD реалних вредности степена корисности ($\eta_{P-EM} < 1$ и $\eta_{ERD} < 1$) смањиће вредност MER , израз (4.5), где се може закључити да је модел валидан и применљив за реалне вредности степена корисности пумпе и ERD .

Развој мембрана RO ниског притиска (високе пропустљивости) се брзо развијао 90-их година прошлог века. Претходне технолошке генерације мембрана високог притиска су биле ниже пропустљивости, захтевана вредност трансмембранског притиска била је много виша од осмотског притиска концентроване воде на завршној деоници мембранског модула за захтевани степен корисности процеса, тако да процес при термодинамичким граничним вредностима није био остварив. Садашње генерације мембрана RO су са довољним нивоом пропустљивости, да омогућавају радне режиме у околини термодинамичких граничних вредности уз истовремено обезбеђивање захтеваног протока пречишћене воде [114].

4.3 Закључци и препоруке за будуће потребе истраживања

Анализа односа специфичних трошкова мембрана и специфичне потрошње енергије процеса RO , извршена је са сврхом процене интервала степена корисности процеса током којег ће унапређење својстава пропустљивости мембране бити значајно за смањење укупних трошкова производње пречишћене воде. Садашње генерације високо пропустљивих мембрана, омогућавају радне режиме процеса десалинизације у околини термодинамичких граничних вредности. Стога, као што

је приказала анализа, с обзиром на специфичне трошкове мембрана и специфичне потрошње енергије, од користи је будући развој мембрана са већом пропустљивошћу при мањем степену корисности процеса RO за морску воду са мањим концентрацијама растворених материја. Међутим, при ниском степену корисности процеса треба узети у обзир додатне трошкове, везане за процесе припреме морске воде и трошкове управљања концентрованом водом. Са друге стране, за десалинизацију морске воде RO , специфична потрошња енергије је много већа од специфичних трошкова мембране (поређењем са еквивалентним енергетским јединицама), тако да постоји мали економски подстицај за развој пропустљивијих мембрана, у циљу смањења укупних трошкова десалинизације морске воде. Однос специфичних трошкова мембране према специфичној потрошњи енергије зависи од степена корисности процеса и бездимензионог фактора трошкова (R_{MEC}) који обухвата утицај концентрације растворених материја у морској води, пропустљивости мембране, степена одстрањивања соли и трошкова електричне енергије и површине мембране. Ово теоријско истраживање указује да будућа значајна побољшања пропустљивости мембране, имаће мањи утицај на значајно смањење укупних трошкова десалинизације RO . Будућа смањења трошкова производње пречишћене воде RO могу настати из различитих других побољшања процеса, али се не ограничавају на: развој мембрана које поседују смањен ефекат таложења материја (ефекта запушења) [84],[85],[86],[87], применом ефективнијих процеса припреме морске воде, применом ефективнијих процеса управљања концентрованом водом, оптимизацијом конфигурације процеса, применом аутоматизованих контролних алгоритама процеса и интеграцијом са обновљивим изворима енергије.

У циљу верификације сопственог модела запреминског протока пречишћене воде (6,1) као и за одређивање параметара у моделу потребно је осмислити и урадити сопствена експериментална истраживања. Сходно овим потребама пројектовано је и израђено експериментално лабораторијско постројење за процес реверзибилне осмозе воде.

5. ПОСТАВКЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА МОДЕЛА ПРОЦЕСА ОДСТРАЊИВАЊА СОЛИ ИЗ МОРСКЕ ВОДЕ

Експериментална испитивања вршена су са циљем утврђивања специфичне енергетске потрошње десализационог постројења *RO* и модела запреминског протока пречишћене воде. У експериментима су варирани параметри радних режима морске воде: притисак, температура, концентрација растворених материја и степен корисности процеса. Коришћене су мембране различитих својстава пропустљивости и степена одстрањивања растворених материја.

Експериментално истраживање изведено је применом новог мембранског нанокомпозитног материјала произвођача *NanoH₂O* са циљем смањења специфичне енергетске потрошње процеса реверзибилне осмозе морске воде, као и смањења оперативних трошкова.

Измерена је потрошња енергије у експериментима процеса *RO* коришћењем високопроточних мембрана, као и мембрана са високим степеном одстрањивања соли.

Коришћене су мембране високе пропустљивости које захтевају мање геометријске величине постројења *RO*, тестирана је лабораторијска инсталација које садржи мањи број мембранских модула при производњи исте количине воде. Исто тако, изводљивост примене високопроточних мембрана „*NanoH₂O*” за морску воду са високом концентрацијом растворених материја, тестирана је за мембранске модуле типа *ES* и за мембранске модуле типа *R*.

Анализа енергетских трошкова и захтева у погледу површине мембрана приказана је на послетку овог поглавља. У циљу анализе економске исплативости примене високопроточних „*NanoH₂O*” мембрана, извршено је поређење инвестиционих и текућих трошкова са комерцијално доступним мембранама стандарних карактеристика пропустљивости.

5.1 Експериментална инсталација процеса *RO* за десалинизацију морске воде

Експериментална испитивања вршена су у оквиру научно-истраживачког института компаније *Doosan Hydro Technology*, Тампа, Флорида, у Сједињеним Америчким Државама. У циљу одређивања модела запреминског протока пречишћене воде у процесу реверзибилне осмозе, израђена је експериментална инсталација, у којој су коришћена три различита типа „*NanoH₂O*” мембрана. Експериментална инсталација састоји се од три одвојена подсистема. Сваки подсистем садржи две паралелне мембранске посуде под притиском, са могућности смештаја до 8 мембранских елемената. Експериментална инсталација реверзибилне осмозе морске воде је пројектована тако да независно опслужује три подсистема који могу да садрже три различита типа мембранских елемената и/или три различита снабдевања морском водом. Сваки подсистем садржи опрему за мерење радних параметара процеса. Током свих експерименталних испитивања измерене су следеће величине: трансмембрански притисак, концентрација растворених материја у морској води, температура морске воде, концентрација соли у пречишћеној води, запремински проток пречишћене воде, степен корисности процеса и потрошња електричне енергије. Дијаграм цевовода и инструмената (*P&ID*) за једну комору експерименталне инсталације реверзибилне осмозе морске воде је приказан на слици 5.1. Подсистем бр. 1 је опремљен са 5 мембранских елемената типа *QFX SW 75 ES* по једној мембранској посуди под притиском, тј. са укупно 10 мембранских елемената у подсистему. Подсистем бр. 2 је опремљен са 7 мембранских елемената типа *QFX SW 75 ES* по једној мембранској посуди под притиском са укупно 14 мембранских елемената у подсистему.

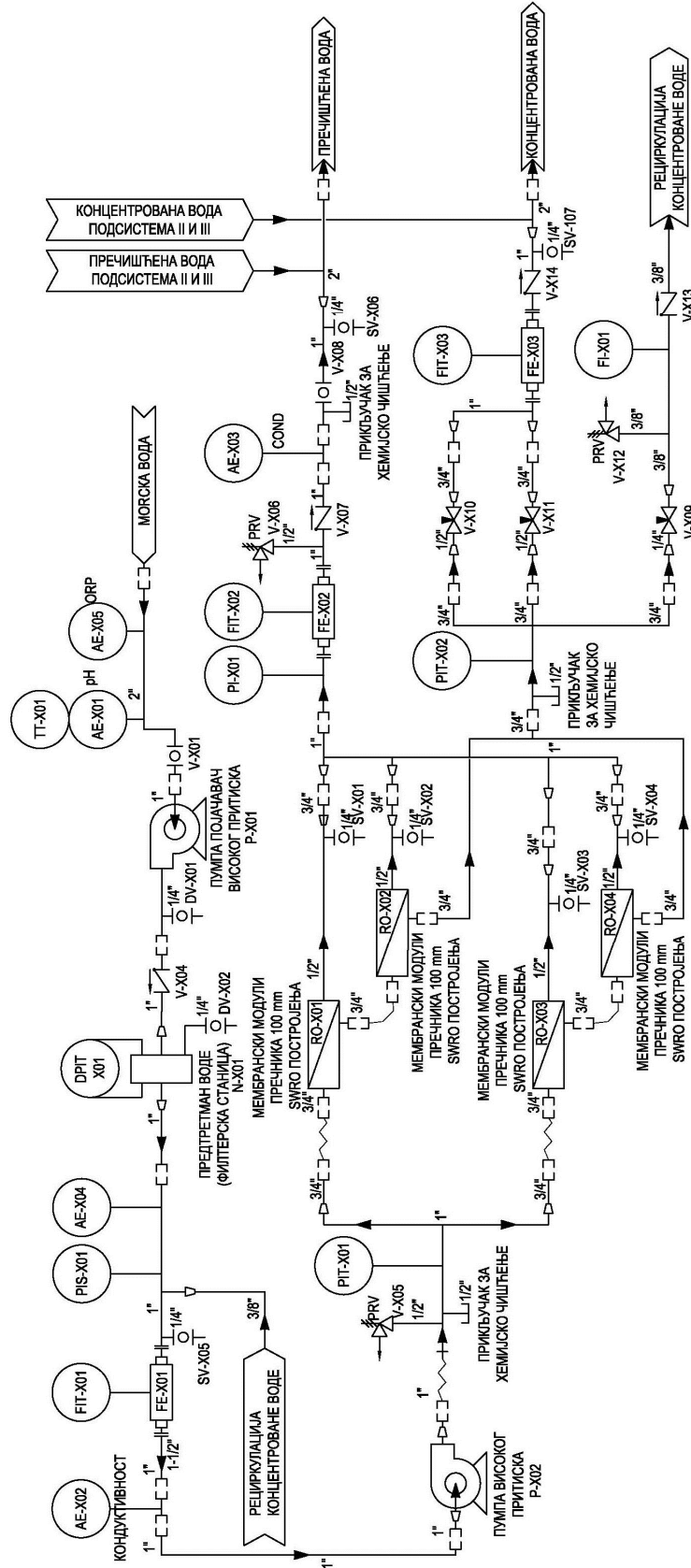
Подсистем бр. 3 је опремљен са 7 мембранских елемената типа *QFX SW 75 R* по једној мембранској посуди под притиском, са укупно 14 мембранских елемената у подсистему. Касније су спроведена експериментална истраживања коришћењем мембрана побољшаних карактеристика типа *QFX SW 75 ES* при чему је 14 мембранских елемената смештено у подсистем бр. 1, док су претходно коришћене *ES* мембране уклоњене, у циљу реализације новог експеримента. Преостали простор у мембранској посуди под притиском је испуњен дистанцерима.

Управљање процесом *RO* остварено је помоћу програмабилног логичког контролера (*PLC*). Написан је посебан програм за све оперативне кораке процеса *RO* (укључивање, искључивање пумпи, контролу притиска пумпи, дефинисани су аларми за случај прекорачења било којег параметра процеса). Алгоритам контролног процеса приказан је на слици 5.2.

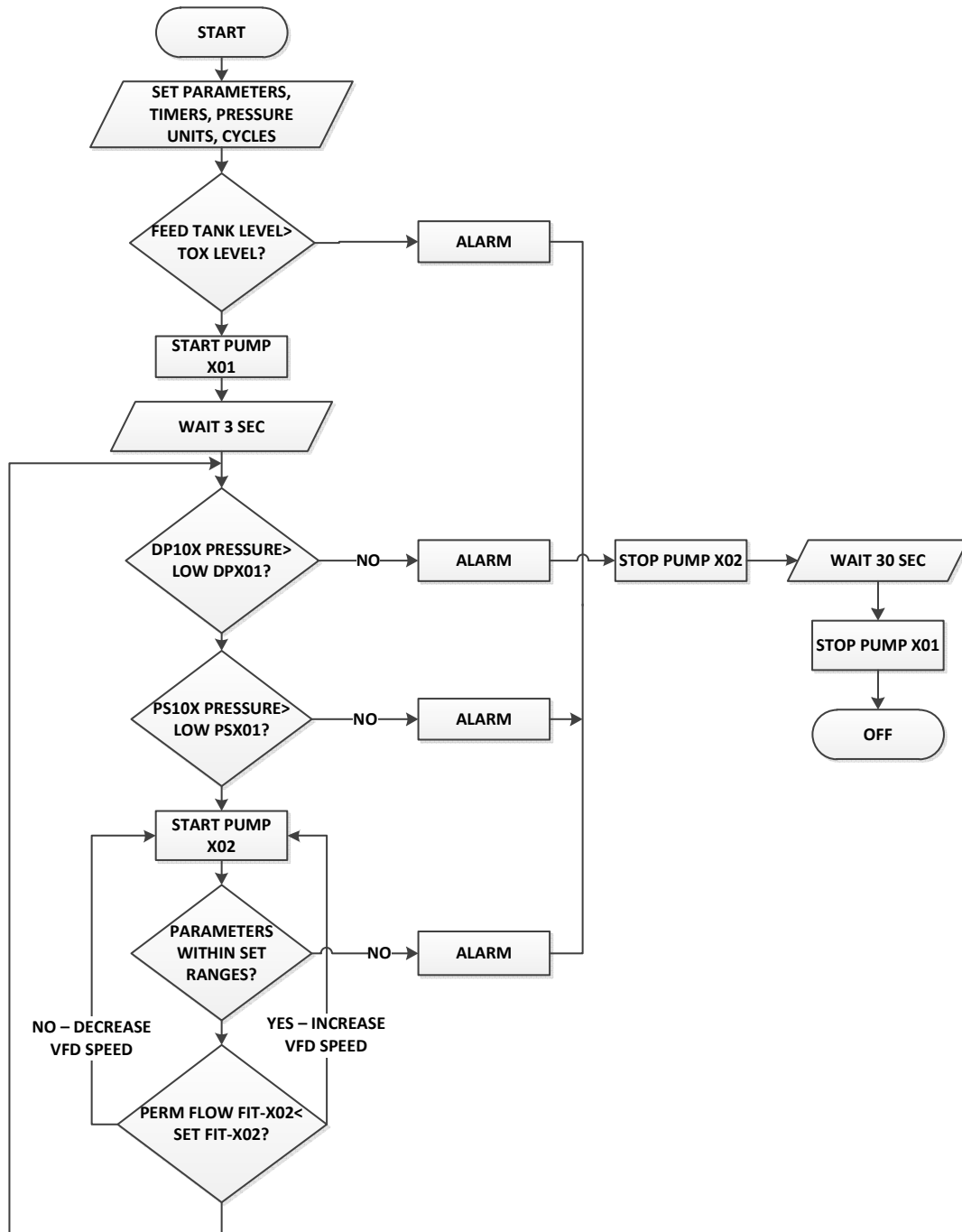
Морска вода допремана је у систем реверзибилне осмозе након предтретмана мембранског микрофилтрирања. При задатом запреминском протоку притисак у систему подешаван је мануелно. Ово је постигнуто подешавањем радних режима помоћне пумпе и пумпе високог притиска у радном режиму са ручним управљањем. Заобилазни цевовод концентроване воде и вентили рецикулације концентроване воде били су потпуно затворени, док је вентил контроле протока концентроване воде био потпуно отворен. Пумпе су тада укључене и подешени су радни режими у циљу остваривања жељеног протока. Вентил контроле протока концентроване воде је тада постепено затваран све док није постигнут жељени трансмембрански притисак и проток пречишћене воде.

Коришћена је следећа опрема:

- Филтерска станица предтретмана воде: *Filter housing FSI, X100C*,
- Пумпа система предтретмана воде: *MAG 75 l/min, 2·10⁵ Pa, Iwaki, MX-251-CV*,
- *SWRO* мембранске посуде: *Codeline, 40E100-4*,
- Пумпа високог притиска: *64 l/min, 90·10⁵ Pa, Danfoss, PP5.1-10.2-254TC*,
- Сензор за читавање *pH* вредности воде: *Hach, DPD1P1*,
- Сензор за читавање концентрације растворених соли у води: *Hach, D3727E2T*,
- Сензор за читавање разлике притиска: *Deltabar PMD70, Rosemount*,
- Мерач протока: *Rosemount: 8750*,
- Мерач протока: *Rosemount 8732*,
- Сигурносни прекидач притиска: *Endress & Houser, Ceraphant, PMP71*,
- Трансмитер сензора притиска: *Rosemont, PMP71*,
- *PLC*: *Allen Bradley, Rexel*,
- Вентили: *Asahi, Swagelok*.



Слика 5.1. Технолошка шема (P&ID) експерименталног постројења за десалинизацију морске воде SWRO



Слика 5.2. Алгоритам контролног процеса подсистема реверзibilне осмозе морске воде

Експериментална инсталација реверзibilне осмозе морске воде конструисана је у циљу остваривања захтеваних интервала радних режима процеса, компактних је димензија, са могућности смештаја у бродском контејнеру,

слика 5.3. Сваки од наведених подсистема реверзибилне осмозе морске воде може да функционише независно од осталих.



Слика 5.3. CAD 3D модел експерименталне инсталације за реверзибилну осмозу морске воде (лево) и израђена експериментална инсталација за реверзибилну осмозу морске воде (десно)

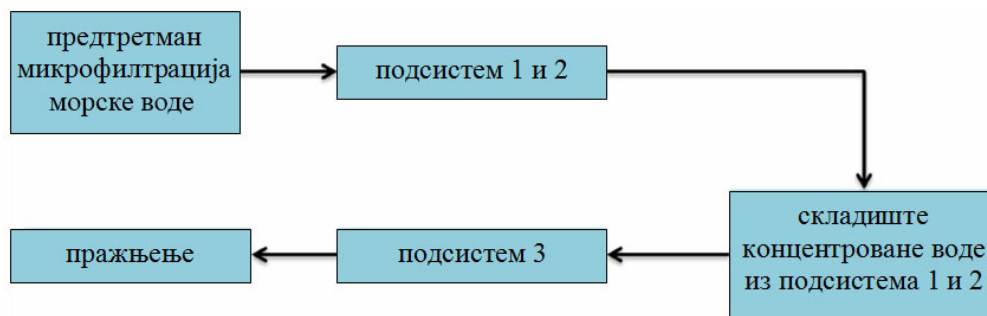
5.1.1 Процес чишћења мембрана хемијским растворима

У циљу експерименталног испитивања карактеристика постојаности „ $NanoH_2O$ ” мембрана, периодично коришћен хемијски процес чишћења мембрана (скраћено *CIP*). *CIP* процес укључује операције испирања мембранских модула пречишћеном водом, испирање мембранских модула базичним раствором високе *pH* вредности ($NaOH$ *pH* 10,5 - 11,5). Затим се у наредним корацима *CIP* процеса обавља испирање мембранских модула пречишћеном водом, испирање раствором киселине вредности *pH* 3 и након тога испирање пречишћеном водом [115],[116].

5.1.2 Десалинизација морске воде високе концентрације растворених соли

Концентрација растворених материја у морској води обично износи у интервалу од 25 до 30 g/l [117]. Како би експериментом биле симулиране веће вредности концентрације растворених соли, што је случај у морској води на подручју Блиског истока (концентрације у опсегу од 40 до 45 g/l), постојеће концентроване воде добијене из оба подсистема коришћене су као морска вода на улазу у трећи подсистем.

Ниво концентрације морске воде трећег подсистема подешаван је променом степена корисности процеса прва два подсистема. Шема процеса је приказана на слици 5.4.

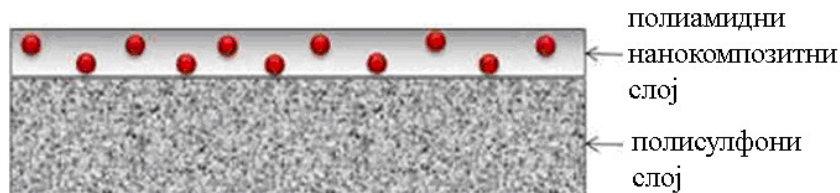


Слика 5.4. Шематски приказ експерименталног десалинizacionог постројења и симулирање процеса *RO* са морском водом веће концентрације растворених соли

5.2 „*NanoH₂O*” мембранска технологија

Специфична потрошња енергије и инвестициони трошкови су од превасходног значаја за изградњу и коришћење система реверзибилне осмозе морске воде [118],[119]. Смањење специфичне потрошње енергије у системима реверзибилне осмозе морске воде остварује се применом пумпи са већим степеном корисности, употребом високопропусних мембрана и уређаја за повраћај енергије.

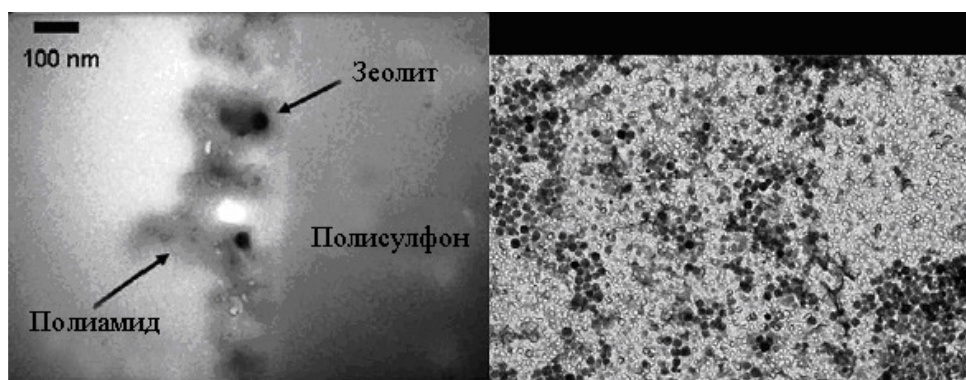
Поред наведених побољшања ефикасности система, огроман напредак је учињен у области хемијског састава материјала мембрана. Велики напредак је учињен транзицијом асиметричних целулозних ацетатних мембрана до филм танких композитних полиамидних мембрана [88],[120],[121]. Недавно су забележена побољшања материјала мембрана коришћењем наночестица у активном слоју, које формирају танак нанокомпозитни слој (*TFN*), слика 5.5 [89]. Тиме је остварено повећање протока пречишћене воде при радном притиску, уз смањење специфичне потрошње енергије и захтеваних габаритних димензија постројења реверзибилне осмозе морске воде уз истовремено задржавање захтеваних капацитета.



Слика 5.5. Попречни пресек *TFN* мембране [89]

Истраживачка група на Универзитету у Калифорнији у Лос Анђелесу (*UCLA*) коју води *Erik Hoek* развила је *TFN* мембрану са наночестицама зеолита у активном слоју, слика 5.6 [89]. Ови нови материјали мембрана омогућавају двоструко веће протоке пречишћене воде од оних које омогућавају комерцијално доступне мембране.

Компанија је лиценцирала *TFN* технологију са *UCLA* и започела рад као „*NanoH₂O*”. Ова компанија је променила *TFN* технологију уклањањем наночестица зеолита из мембранског материјала и уграђивањем инертног наноматеријала чије карактеристике нису саопштене. Компанија тврди да њихове мембране омогућавају пораст пропустљивости (проласка воде кроз мембрану) за 50-100%. Поред тога, претпоставља се да *NanoH₂O* мембране могу да смање специфичну потрошњу енергије процеса реверзибилне осмозе морске воде до 20%. Ове уштеде у специфичној потрошњи енергије процеса реверзибилне осмозе морске воде, довеле би до смањења оперативних трошкова процеса десалинизације морске воде. Коришћењем *NanoH₂O* мембранских модула могуће је смањење габаритних димензија постројења реверзибилне осмозе морске воде до 40% [90].



Слика 5.6. Микроприказ попречног пресека *TFN* мембране (лево) Микроприказ површине мембране који показује распоред наночестица (десно) [90]

На тржишту су пласирана три различита типа *NanoH₂O* мембрана: *ES*, *R* и *SR*. Ипак, само типови *ES* и *R* се производе као елементи номиналног пречника 100 mm. *ES* тип представља високопропусну мембрану која по тврдњама произвођача смањује специфичну потрошњу енергије и до 20%, док *R* тип представља мембрану са високим степеном одстрањивања соли и релативно високим протоком пречишћене воде. У поређењу са *R* типом мембрана, *SR* тип мембране има високи степен одстрањивања соли, али са релативно смањеним

протоком пречишћене воде. Карактеристике тестираних типова мембрана су дате у табели 5.1. Два типа *ES* мембрана су посебно означени у поменутој табели. Услед технолошких побољшања остварен је бољи степен одстрањивања соли.

Табела 5.1. Оперативне карактеристике *NanoH₂O* мембрана коришћених у експерименталном истраживању

| Ознака мембранског модула | Запремински проток преч. воде м ³ /дан | Стабилизовано одстрањивање соли % | Активна површина мембрана м ² | Дебљина слоја разграничавајућег слоја мембране (μm) | Стабилизовано одстрањивање Бора (%) |
|---|---|-----------------------------------|--|---|-------------------------------------|
| <i>QFX SW 75 ES</i> | 9,6 | 99,75 | 7,0 | 28 | 89 |
| <i>QFX SW 75 ES</i> (Побољшаних карактеристика) | 9,6 | 99,80 | 7,0 | 28 | 89 |
| <i>QFX SW 75 R</i> | 6,3 | 99,85 | 7,0 | 28 | 93 |

5.3 Специфична потрошња енергије процеса *RO* за различите типове мембрана

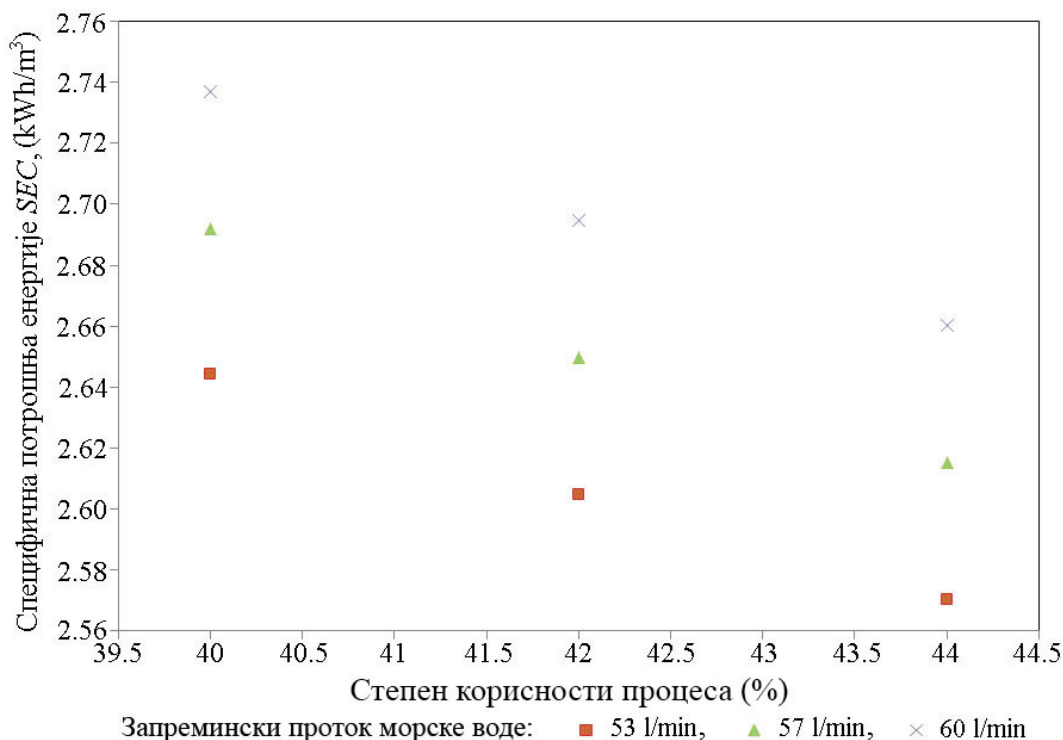
Радни режими процеса реверзибилне осмозе морске воде који садрже *NanoH₂O* мембранске модуле, одређени су коришћењем софтвера (*Q+* за симулацију процеса и оствареног квалитета пречишћене воде). За експериментално истраживање коришћена је морска вода са концентрацијом растворених материја у опсегу од 25000 до 45000 mg/l *TDS*).

У циљу поређења резултата сопствених теоријских и експерименталних истраживања процеса реверзибилне осмозе морске воде са резултатима других аутора и спецификацијама комерцијално доступних мембранских модула, коришћене су јединице: запреминског протока по јединици површине мембране [l/m²h], специфичне потрошње енергије [kWh/m³/10⁵mg/l], и концентрације растворених материја у води [mg/l].

5.3.1 Мембрански модул *QFX SW 75 ES* (10 елемената)

У експерименталном постројењу постављено је 10 мембранских елемената типа *QFX SW 75 ES*. Варирањем степена корисности процеса одређена је специфична потрошња енергије за различите вредности протока морске воде.

Радни режими при којима није постигнут захтевани квалитет пречишћене воде, нису разматрани. Експериментални резултати су потврдили да је остварена најмања вредност специфичне потрошње енергије за сва три протока морске воде (53 l/min, 57 l/min, 60 l/min) и при степену корисности процеса од 44%, слика 5.7.

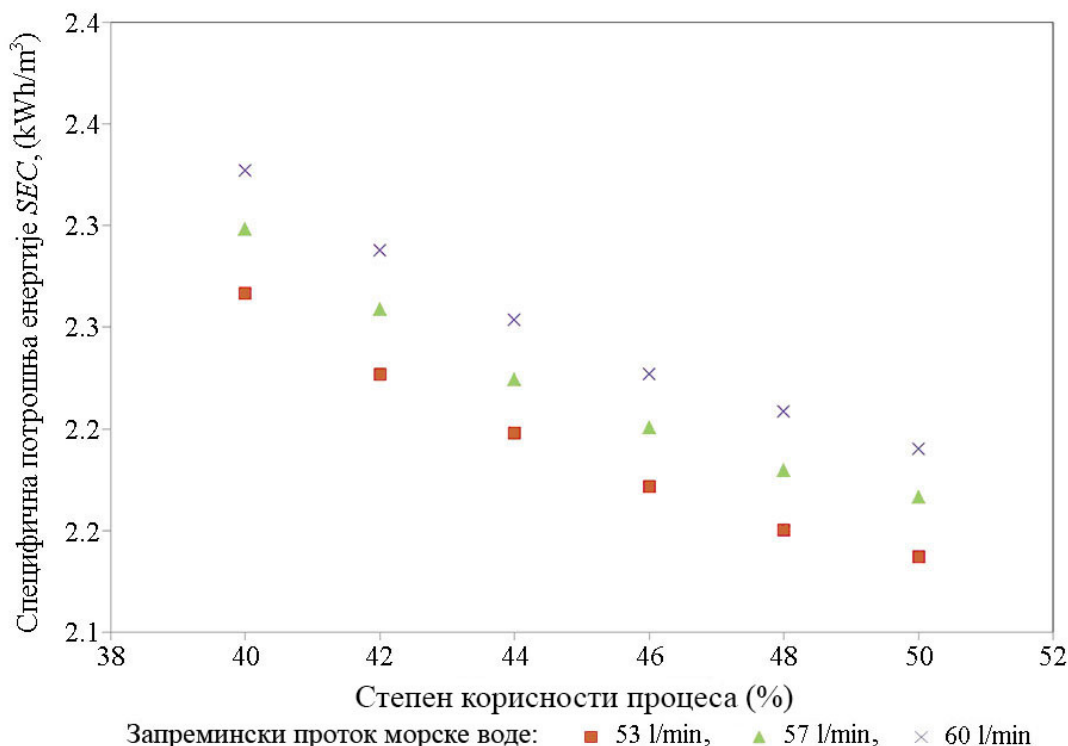


Слика 5.7. Специфична потрошња енергије за мембранске модуле *QFX SW 75 ES* за различите радне режиге процеса *RO*

5.3.1.1 Мембрански модул *QFX SW 75 ES* (14 елемената)

Радни режими процеса *RO* за високопропусне мембране *QFX SW 75 ES* одређене су коришћењем претходно наведеног софтвера. Експеримент је обухватио широк спектар протока морске воде и степена корисности процеса. Ипак, степен корисности процеса изнад 50% није коришћен ради избегавања прекорачења протока препоручених од стране произвођача мембране, ради смањења ефекта таложења материја у мембрани и запушења мембране. Експериментом је утврђено да је најмања специфична потрошња енергије остварена за сва три протока морске воде (53 l/min, 57 l/min, 60 l/min) и при степену корисности процеса од приближно 50%. Како би обезбедили бољу чистоћу површине мембране и њено стабилније

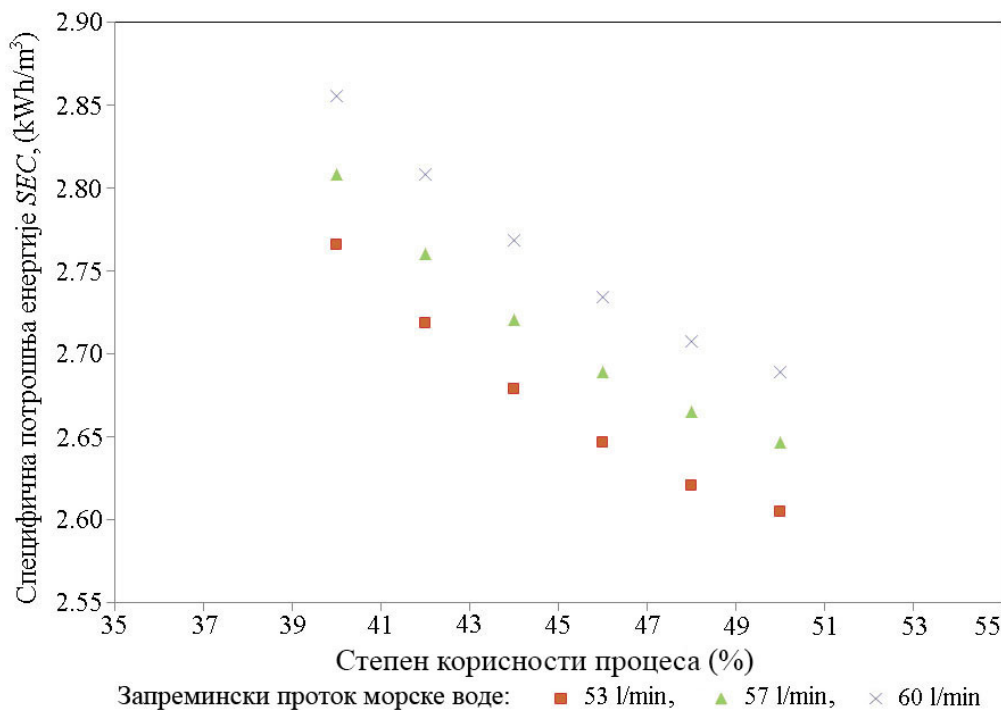
функционисање, оптимални радни режими су остварени при протоку од 53 до 57 l/min и степену корисности процеса од приближно 46 до 50%, слика 5.8.



Слика 5.8. Специфична потрошња енергије за 14 мембранских модула QFX SW 75 ES за различите радне режимо процеса RO [78]

5.3.1.2 Мембрански модул QFX SW 75 R (14 елемената)

Радни режими процеса RO за мембране QFX SW 75 R са високим степеном одстрањивања соли одређени су коришћењем претходно наведеног софтвера. Експерименти су спроведени до вредности степена корисности процеса од 50% у циљу избегавања прекорачења протока препоручених од стране произвођача мембране и смањења ефекта таложења неорганских материја у мембрани. Експериментом је утврђено да је минимална специфична потрошња енергије остварена при протоку од 53 до 60 l/min и степену корисности процеса од приближно 50%. Како би обезбедили бољу чистоћу површине мембране и њено стабилно функционисање, оптимални радни режими процеса RO остварени су при протоку од 57 l/min и степену корисности процеса у интервалу од 46 до 50%, слика 5.9.



Слика 5.9. Специфична потрошња енергије за 10 мембранских модула *QFX SW 75 R* за различите радне режиме процеса *RO*

5.4 Резултати експерименталног испитивања

5.4.1 Експериментално испитивање *ES* мембранских модула

Као што је претходно наглашено, коришћењем *ES* мембранских модула, експериментално испитивање специфичне потрошње енергије и запреминског протока пречишћене воде процеса *RO* се састоји из два одвојена протокола.

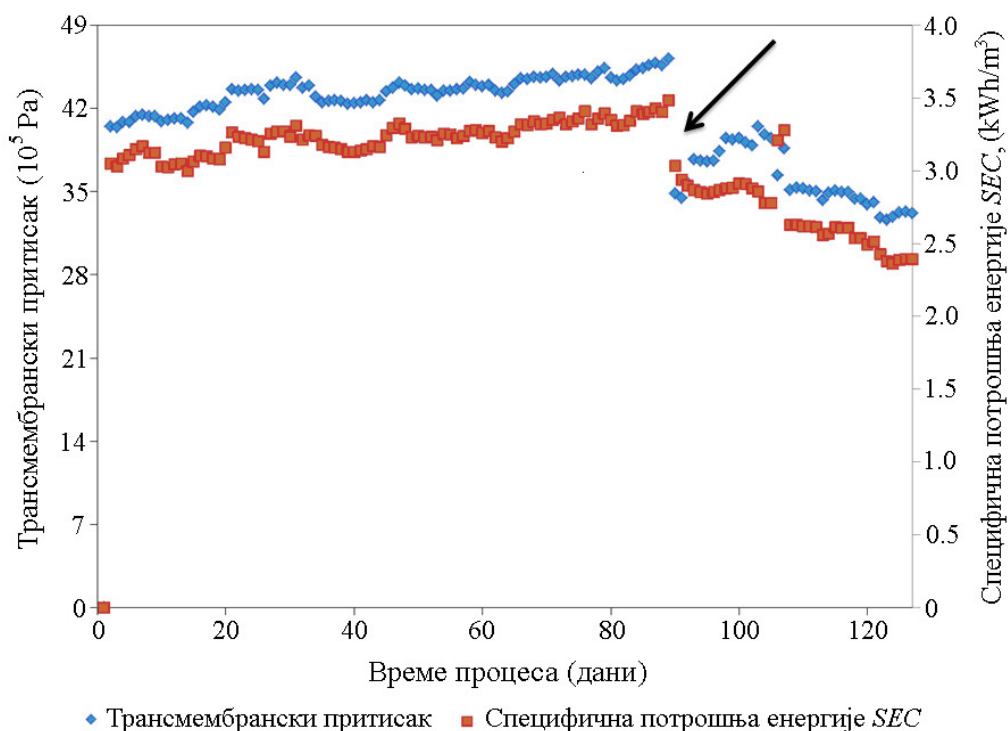
Први протокол експерименталног испитивања заснива се на коришћењу мањег броја мембранских модула по једној мембранској посуди под притиском (10 елемената по подсистему) док други протокол експерименталног испитивања подразумева типичну конструкцију *RO* подсистема уклањања (14 елемената по подсистему). Прва фаза експерименталног испитивања реализована је коришћењем оригиналних *ES* елемената чији степен уклањања соли из морске воде износи 99,75%. Недавно су пласирани *NanoH₂O* мембрански модули са унапређеним степеном уклањања соли из морске воде од 99,8%. Ови елементи су набављени и тестирани под уобичајеним *TDS* концентрацијама морске воде као и за морску воду веће *TDS* концентрације, која је добијена процесом описаним у претходном делу.

Након завршеног испитивања 10 мембранских елемената *QFX SW ES*, три елемента су издвојена из експерименталног постројења *RO* и сачувана за анализу аутопсијом.

5.4.1.1 Експериментално испитивање *ES* мембранских модула (10 елемената)

Подсистем бр. 1 система за реверзибилну осмозу морске воде био је опремљен са 5 мембранских елемената *QFX SW 75 ES* по једној мембранској посуди под притиском у циљу анализе рада ових мембрана, при вишем протоку пречишћене воде са истовременим мањим бројем мембранских елемената. Ова конфигурација је постављена како би били анализирани инвестициони трошкови процеса *RO* коришћењем мањег броја мембрана уз истовремено задржавање планираних капацитета пречишћене воде.

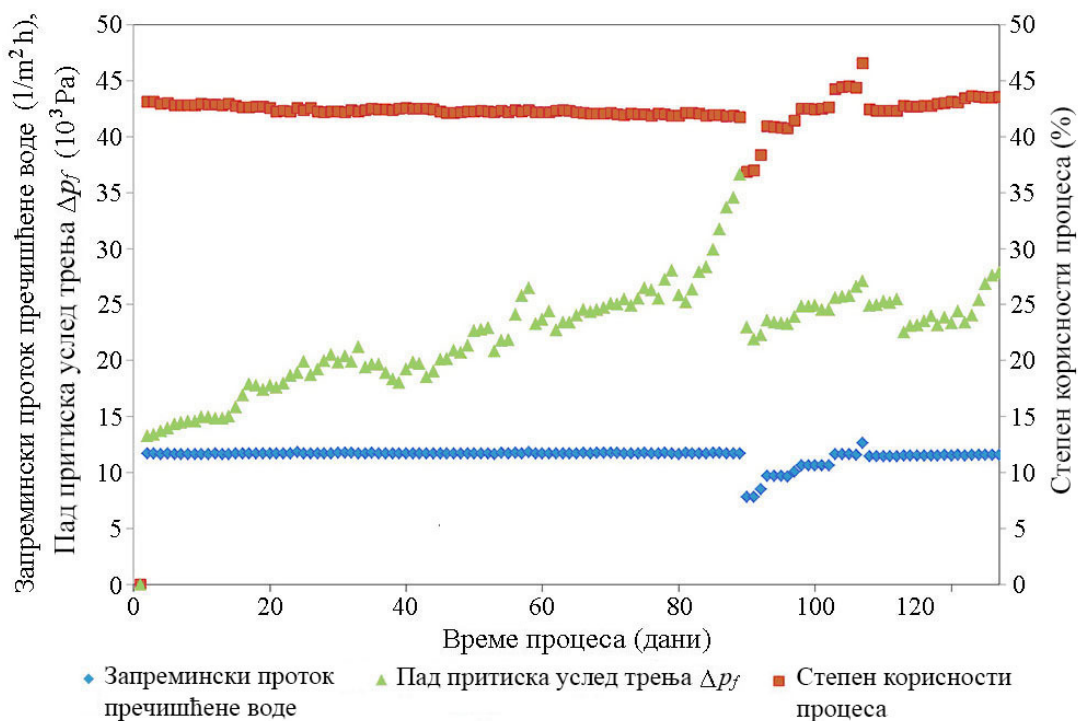
Посматрани су радни параметри система *RO* у циљу испитивања перформанси и стабилности система. Трансмембрански притисак и потрошња енергије су благо порасли током рада, слика 5.10.



Слика 5.10. Специфична потрошња енергије система *RO* који садржи 10 мембранских модула типа *QFX SW 75 ES* у току оперативног времена према промени трансмембранског притиска морске воде [78]

Дисконтинуитет је примећен током 90. дана рада (означен стрелицом), а због потребе за поновним покретањем система након дугог периода мировања. Након њега, систем је покренут са нижим протоком, након чега је стабилизован и припремљен за додатна испитивања. Поред тога, уочено је да специфична потрошња енергије у систему свеукупно показује опадајући тренд. Исто тако је уочено да је *TDS* параметар морске воде значајно опао у односу на претходни период, што је последица географске локације узорака морске воде и почетка сезоне киша у посматраној географској области.

Као што показују подаци на слици 5.11, рад са стабилним протоком је одржан током испитивања. Уочено је да се степен корисности процеса незнатно смањује током рада. Поред тога, вредности пада притиска услед трења мембранских модула система *RO* имали су тенденцију раста. Ово су индикатори запрљаности мембранског система. Уочен је експоненцијални пораст као индикатор биозапрљаности.



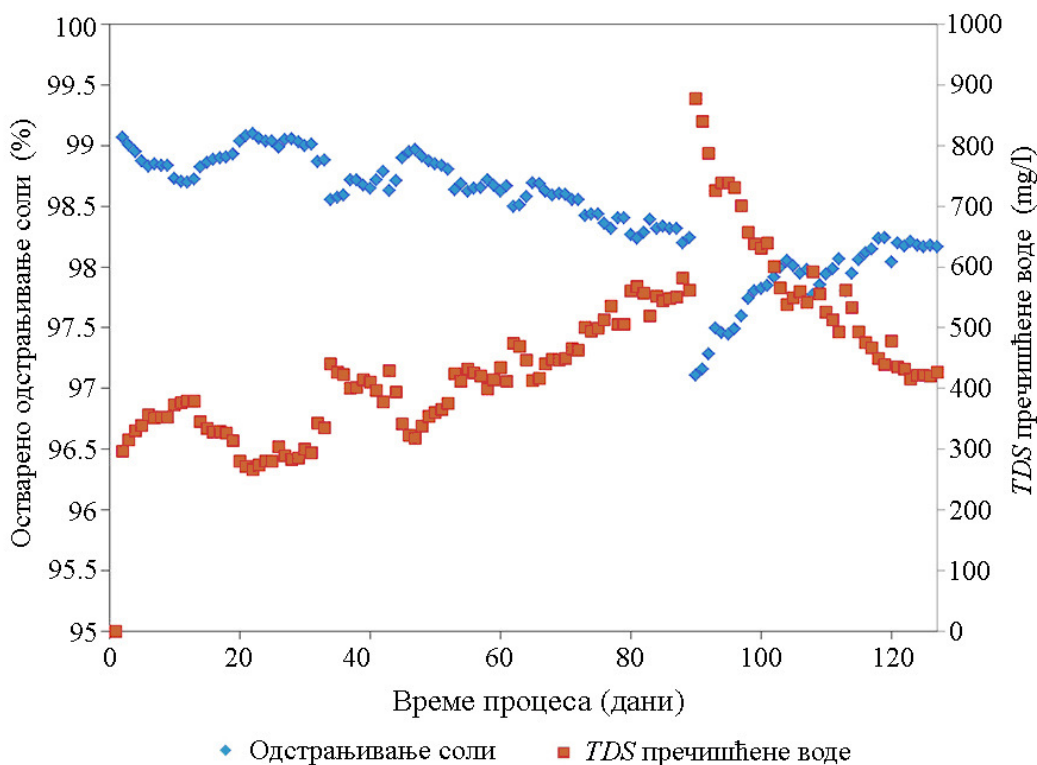
Слика 5.11. Запремински проток пречишћене воде, степен корисности процеса и пад притиска услед трења система *RO* који садржи 10 мембранских модула типа *QFX SW 75 ES*

Током рада посматран је ниво концентрација растворених материја у морској води и степен одстрањивања соли процесом *RO*. Подаци указују на

свеукупни опадајући тренд степена одстрањивања соли у подсистему бр. 1 уз истовремени пораст концентрације растворених материја у пречишћеној води, слика 5.12. Смањење перформанси процеса одстрањивања соли може да укаже на параметре који се односе на квалитет материјала мембране. Са друге стране, разлог може стајати у концентрационој поларизацији проузрокованој биофилмом, која се манифестује повећањем концентрације растворених материја уз саму површ мембране и смањење турбулентног струјања воде непосредно уз површ мембране.

5.4.1.2 Експериментално испитивање *ES* мембранских модула (14 елемената)

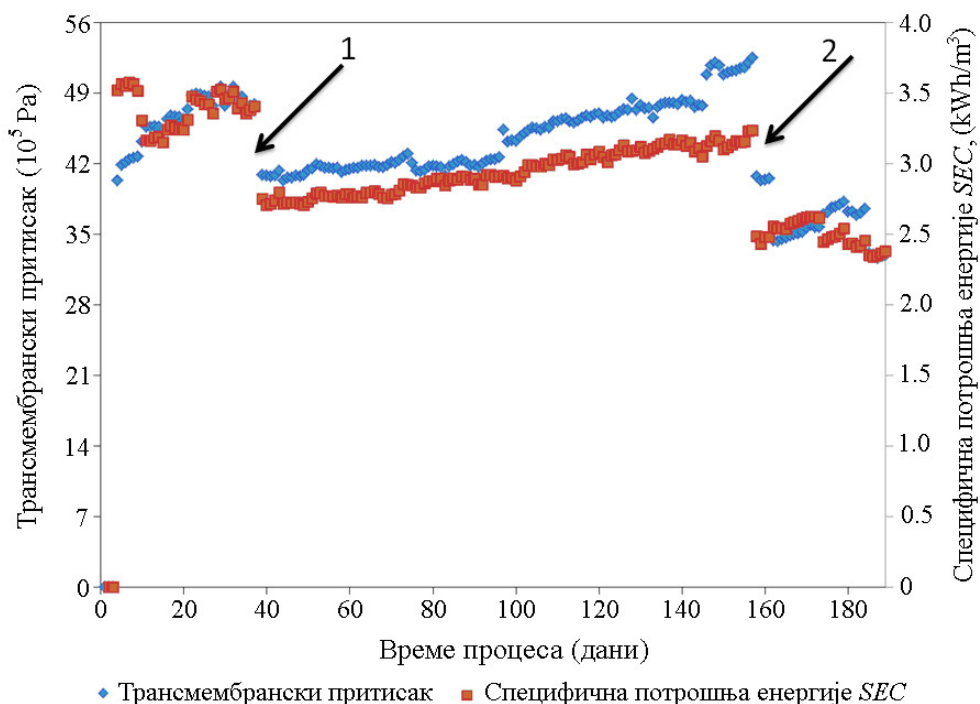
QFX SW 75 ES су високопроточни мембрански елементи. Карактеристика овог мембранског материјала је повећана пропустљивост воде, при чему се смањују потребе за количином мембранских посуда под притиском у систему. Експериментално испитивање је изведено у складу са претходно објашњеним поступцима.



Слика 5.12. Степен одстрањивања соли из морске воде, концентрације растворених соли у пречишћеној води у систему *RO* који садржи 10 мембранских модула типа *QFX SW 75 ES*

Поред тога, употребом овог мембранског материјала могуће је постићи захтевани проток пречишћене воде при нижем трансмембранском притиску, што води ка смањењу специфичне потрошње енергије у систему. Ова претпоставка је проверена постављањем 14 елемената *QFX SW 75 ES* у подсистем бр. 2 ради експерименталног испитивања.

Трансмембрански притисак и потрошња енергије су током рада незнатно порасли, слика 5.13. Дисконтинуитет је примећен током 37. дана рада (означен стрелицом бр. 1), услед замене *DOW Filmtec* мембрана *NanoH₂O* мембранама. Сви подаци до 37. дана се односе на рад са *DOW Filmtec* мембранама. Пад трансмембранског притиска и специфичне потрошње енергије посматран је од почетка оперативног рада *NanoH₂O* мембрана. Међутим, трансмембрански притисак је растао и изнад нивоа највишег трансмембранског притиска током оперативног рада са *DOW Filmtec* мембранама, док је специфична потрошња енергије имала тренд смањивања. Други дисконтинуитет на слици 5.13 (означен стрелицом бр. 2) је уочен након 157. дана рада, што је последица поновног покретања система после дужег периода мировања.

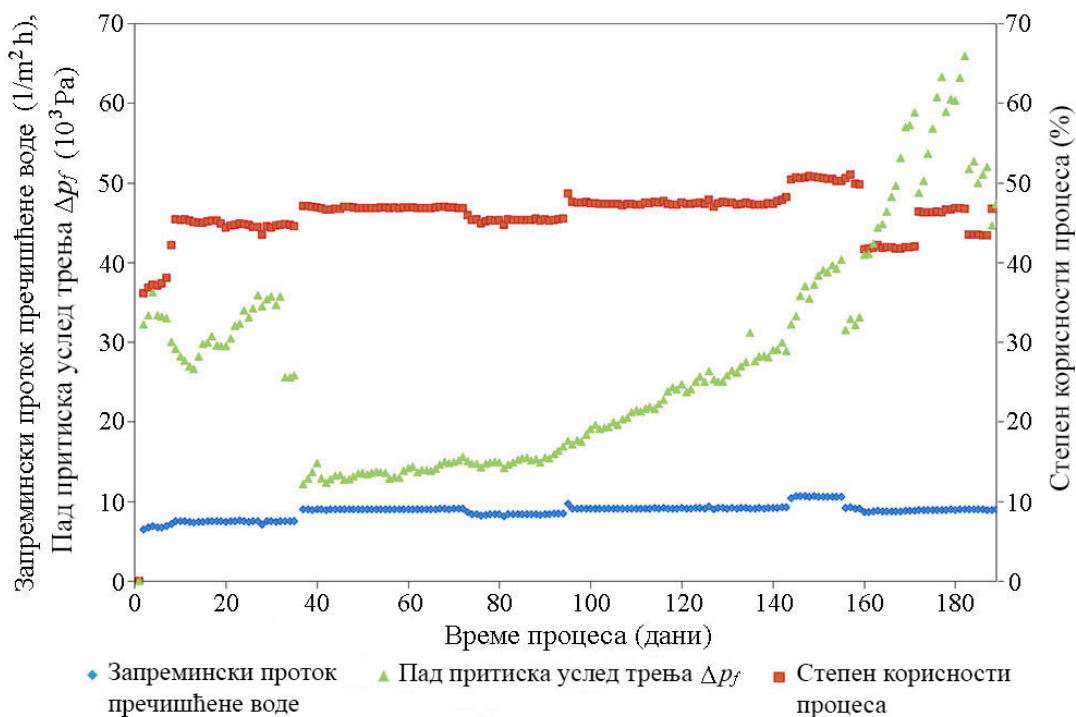


Слика 5.13. Специфична потрошња енергије система који садржи 14 мембранских модула типа *DOW Filmtec* до 37. дана и мембранског модула типа *QFX SW 75 ES* за временски период после 37. дана према промени трансмембранског притиска

Након тога систем је поново покренут у циљу производње концентроване воде, за наредна експериментална испитивања. Као и при испитивању 10 *ES* мембранских модула, примећено је да је остварена мања вредност специфичне потрошње енергије 158. дана рада, услед пада концентрације *TDS* у морској води.

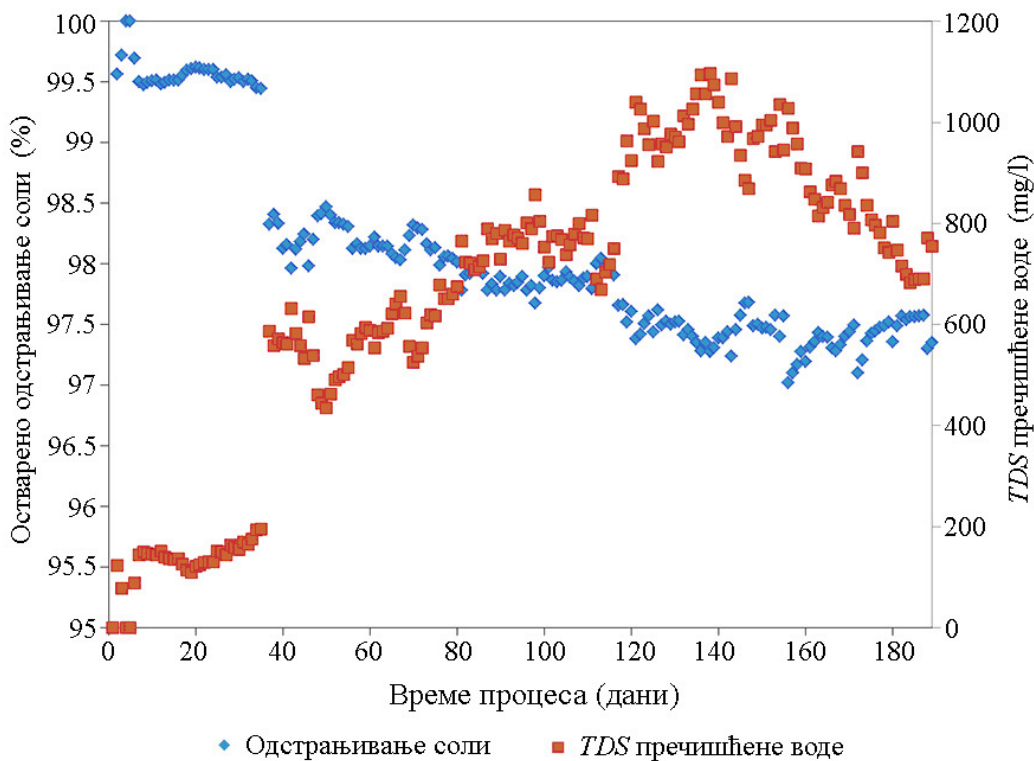
На основу графика, приказаних на слици 5.14, радни режими са стабилним протоком пречишћене воде одржавани су током испитивања 14 *QFX SW 75 ES* модула, после 37. дана. Током рада је уочено да је вредност степена корисности процеса *RO* била веома стабилна. Ипак, вредност пада притиска услед трења је порасла експоненцијално, што представља типичан индикатор биозапрљаности.

Степен одстрањивања соли и концентрација растворених материја у пречишћеној води у подсистему бр. 2 су приказани на слици 5.15. Подаци показују пораст концентрације растворених материја у пречишћеној води при замени *DOW Filmtec* мембрана *NanoH₂O* мембранама. Ово указује да високопроточне *NanoH₂O* мембране дозвољавају знатан пролазак соли кроз мембрану, што значајно смањује степен одстрањивања соли система *RO*.



Слика 5.14. Запремински проток пречишћене воде, степен корисности процеса и пад притиска услед трења система *RO* који садржи 14 мембранских елемената типа *QFX SW 75 ES*

Поред тога, уочен је општи тренд пада степена одстрањивања соли. Овај тренд у подацима се прилично подудара са повећањем вредности пада притиска услед трења у систему, што указује на ефекат концентрационе поларизације проузроковане слојем биофилма на површини мембране.



Слика 5.15. Степен одстрањивања соли из морске воде, концентрације соли у пречишћеној води система *RO* који садржи 14 мембранских модула типа *QFX SW 75 ES*

5.4.2 Експериментално испитивање *ES* мембранских елемената са побољшаним карактеристикама одстрањивања соли

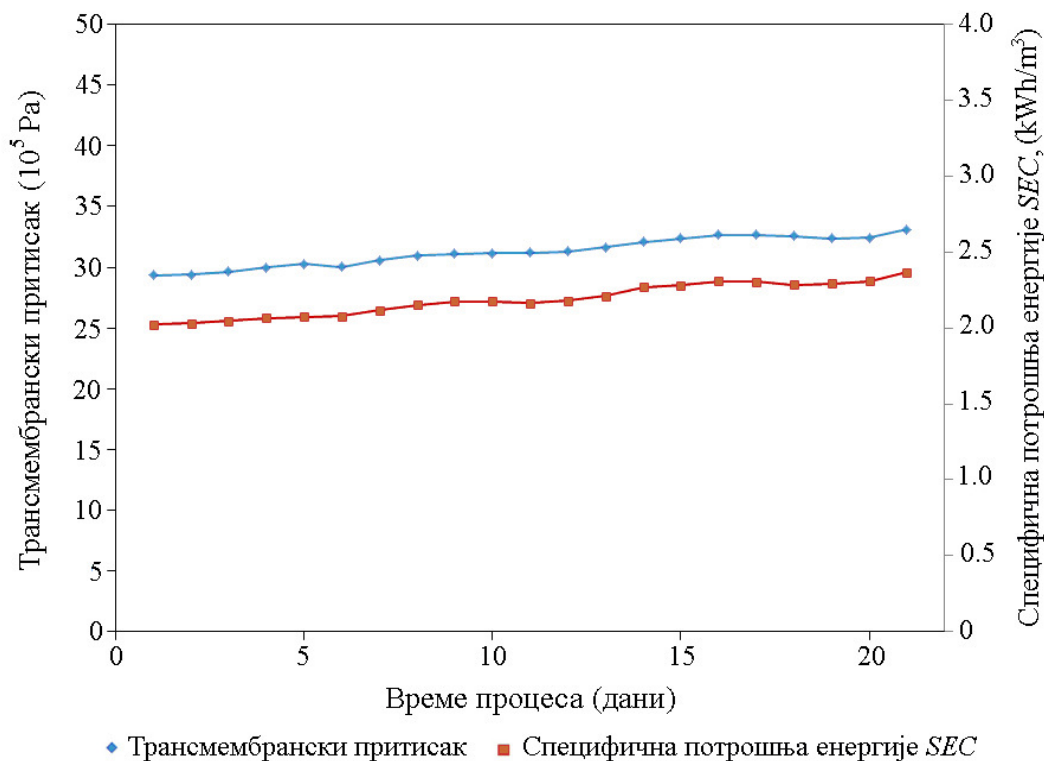
QFX SW 75 ES су високопроточни мембрански елементи. Карактеристика овог мембранског материјала је побољшано одстрањивање соли (повећање са 99,75% на 99,8%) [107].

Вредност трансмембранског притиска воде, потребног за остваривање задатог протока пречишћене воде ових високопроточних мембрана је мања у поређењу са стандардним комерцијалним мембранама. Како би упоредили карактеристике нових *ES* мембрана са већим степеном одстрањивања соли са карактеристикама претходних типова мембрана, у експерименталну инсталацију

реверзибилне осмозе воде постављено је и испитано 14 *ES* мембранских елемената. Такође су истражене карактеристике оствареног степена одстрањивања соли при радним условима ниске и високе концентрације *TDS* у морској води.

5.4.2.1 Експериментално испитивање *ES* мембранских елемената са побољшаним карактеристикама одстрањивања соли коришћењем морске воде ниске концентрације растворених соли

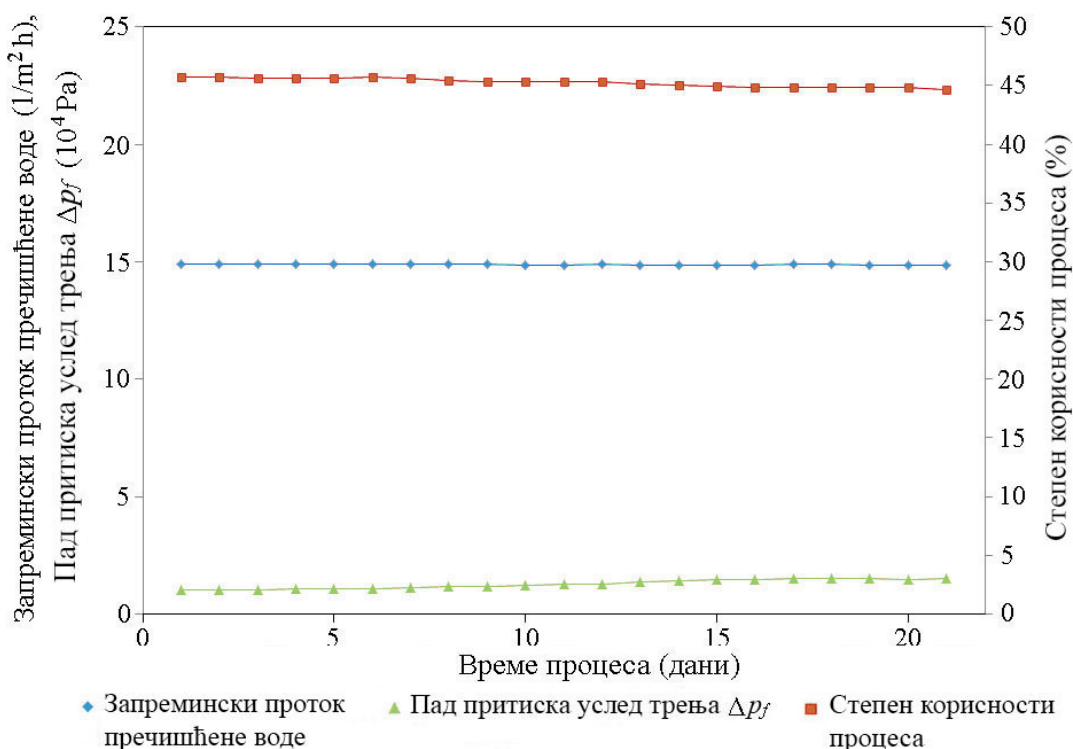
Након завршетка испитивања 10 мембранских елемената *QFX SW 75 ES* са ниским степеном одстрањивања соли (5 елемената по једној мембранској посуди под притиском) у подсистему бр. 1 система за реверзибилну осмозу морске воде, испитивани елементи су уклоњени из овог подсистема, након чега је у њега постављено 14 мембранских елемената типа *QFX SW 75 ES* са високим степеном одстрањивања соли (7 елемената по једном суду под притиском). За потребе испитивања процеса при мањим концентрацијама растворених материја, *TDS* концентрација у морској води износила је приближно 25000 mg/l.



Слика 5.16. Специфична потрошња енергије система *RO* који садржи 14 мембранских модула побољшаних карактеристика одстрањивања соли типа *QFX SW 75 ES*

Као и код претходног експерименталног испитивања, радни параметри система су праћени како би се анализирале перформансе и стабилност система. Трансмембрански притисак и специфична потрошња енергије постепено су повећавани током рада, слика 5.16.

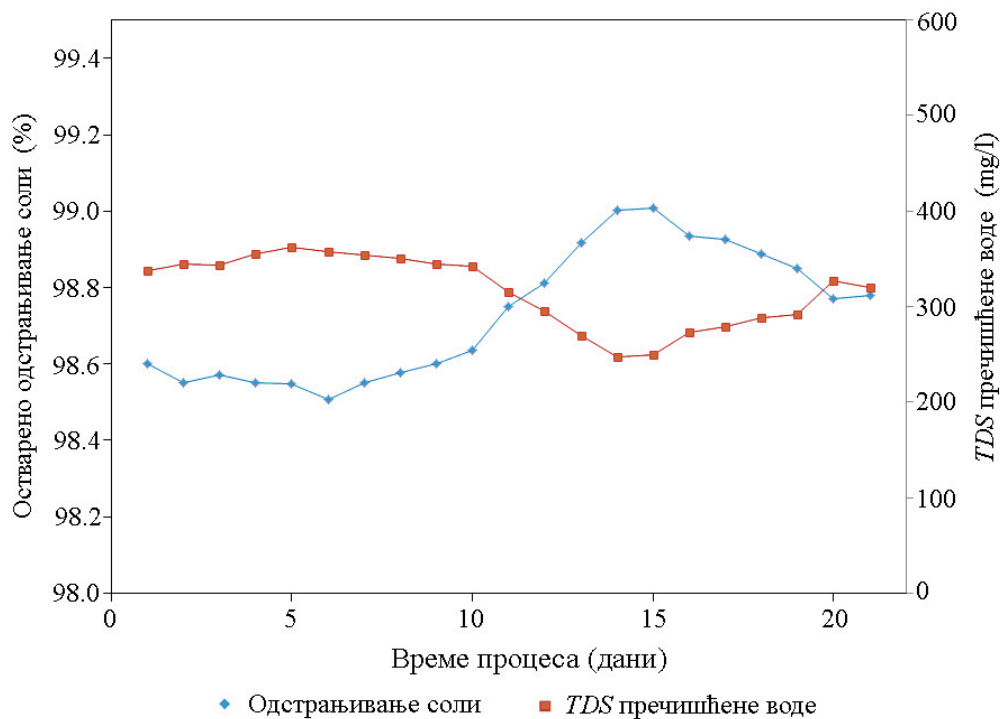
Постепено повећање трансмембранског притиска морске воде и специфичне потрошње енергије узроковано је почетком таложења материја на површини мембране и смањењем пропустљивости мембране. Температура морске воде је имала тренд опадања током овог експерименталног испитивања, што је анализирано у наставку. Из сазнања претходног испитивања, узрочник смањења својстава пропустљивости мембране је биолошког карактера. Поред тога, због природе географске локације узетих узорака морске воде ниских вредности растворених материја, отежано је поређење параметара процеса *RO* на другим географским локацијама. У циљу остваривања прецизнијих поређења, потрошња енергије система била је нормализована према концентрацији *TDS* морске воде.



Слика 5.17. Запремински проток пречишћене воде, степен корисности процеса и пад притиска услед трења система *RO* који садржи 14 мембранских модула типа *QFX SW 75 ES*

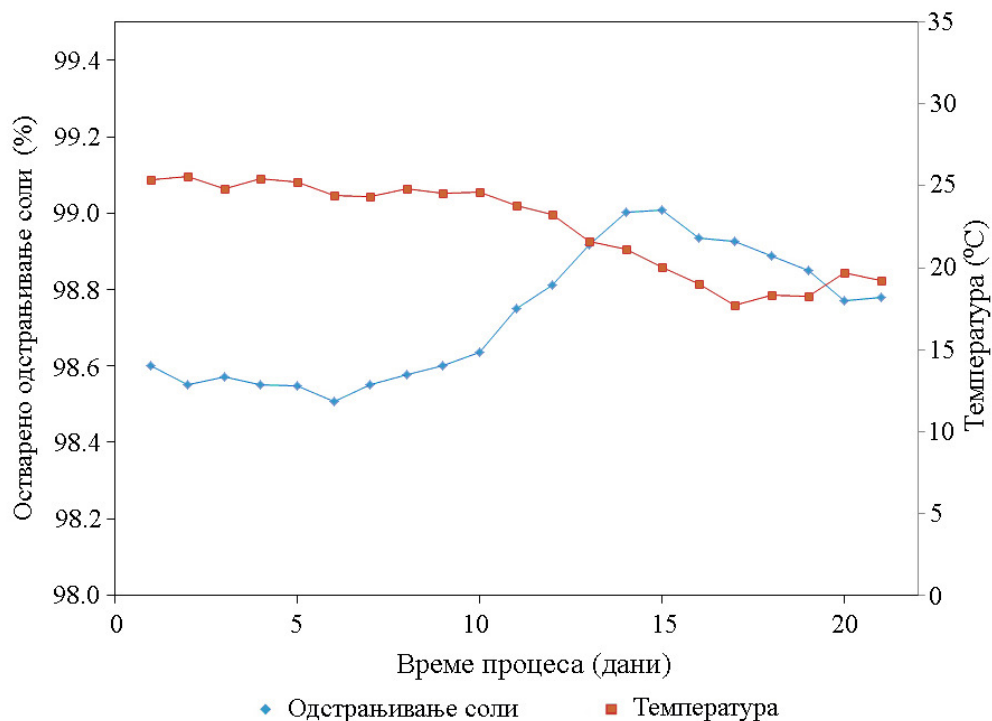
Као што је приказано графиком на слици 5.17, приликом испитивања је одржан стабилан запремински проток пречишћене воде. Из графика је очигледно да се током рада смањује степен корисности процеса, док вредност пада притиска услед трења кроз систем има тенденцију раста. То су показатељи почетка смањења пропустљивости мембранских модула, као и смањења температуре морске воде.

Током рада праћене су концентрације растворених материја у пречишћеној води и степен одстрањивања соли подсистема *RO*. Подаци указују на релативно константан степен одстрањивања соли и релативно константну концентрацију растворених материја у пречишћеној води произведеној у систему до десетог дана рада, слика 5.18. Након тога, одстрањивање соли је значајно повећано, док је концентрација *TDS* пречишћене воде значајно смањена. Чак и са повећањем одстрањивања соли, квалитет пречишћене воде је испод очекиваног услед великог пролаза соли кроз *NanoH₂O* мембранске модуле.



Слика 5.18. Степен одстрањивања соли из морске воде, концентрације соли у пречишћеној води система *RO* који садржи 14 мембранских модула типа *QFX SW 75 ES* са морском водом ниске концентрације соли

Смањењем температуре морске воде, степен одстрањивања соли је повећан (самим тим смањена је концентрација *TDS* пречишћене воде, што је приказано графиком на слици 5.19).



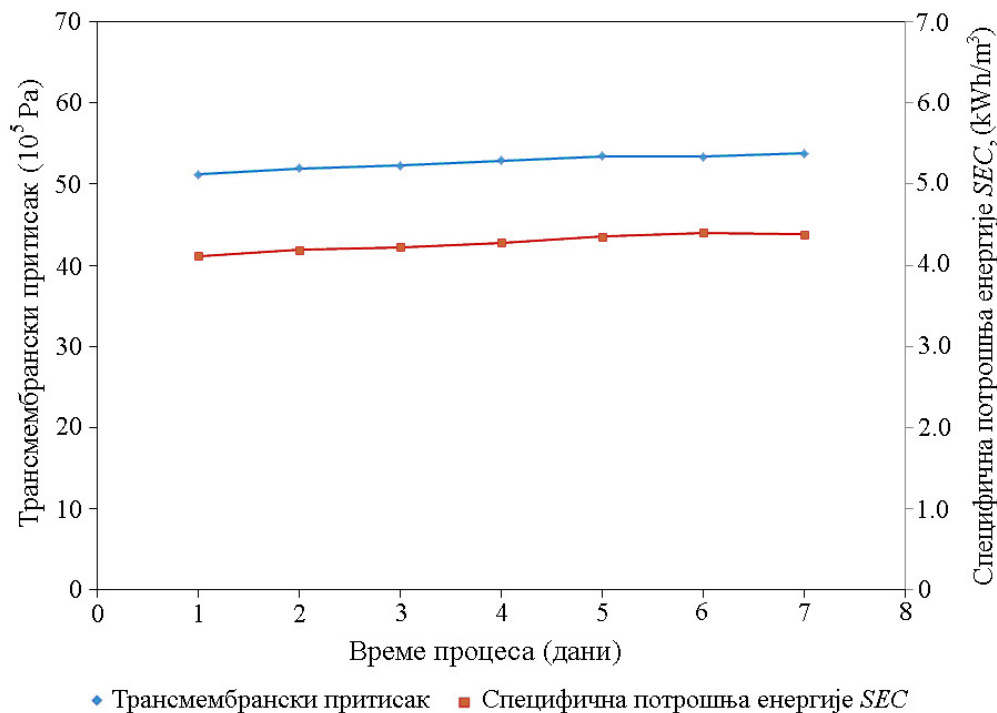
Слика 5.19. Степен одстрањивања соли из морске воде, температура морске воде у систему *RO* који садржи 14 мембранских модула типа *QFX SW 75 ES*

Смањење температуре морске воде смањује пролазност соли мембране *RO*, чиме се одстрањивање соли повећава. Пропустљивост мембранских модула је такође смањена, тако да се специфична потрошња енергије повећава са смањењем температуре морске воде.

5.4.2.2 Експериментално испитивање *ES* мембранских елемената са побољшаним карактеристикама одстрањивања соли коришћењем морске воде високе концентрације растворених соли

По завршетку испитивања степена одстрањивања соли 14 мембранских елемената типа *QFX SW 75 R* (7 елемената по мембранској посуди под притиском) у подсистему бр. 3 система *SWRO*, мембрански елементи су уклоњени и премештени у подсистем бр. 1 за производњу концентроване воде високе вредности *TDS* неопходне за експериментално испитивање. Подсистем бр. 3 је накнадно покренут са 14 мембранских елемената (већег) степена одстрањивања соли *QFX SW 75 ES* (7 елемената по мембранској посуди под притиском). Концентрација соли у морској води била је приближно 44000 mg/l и добијена је процедуром описаном у претходном одељку.

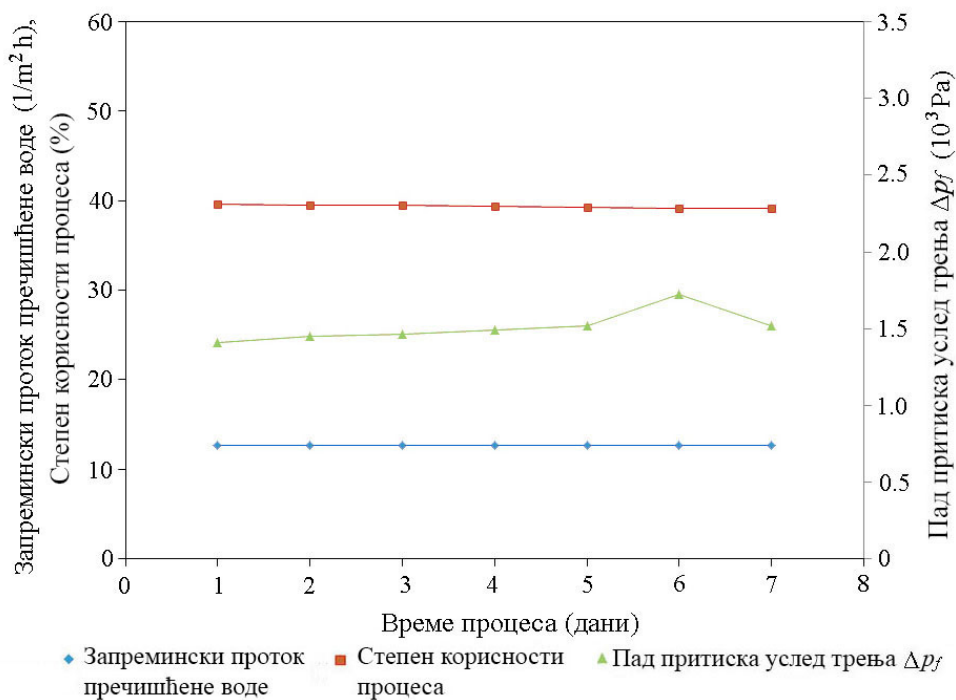
Трансмембрански притисак и специфична потрошња енергије постепено су повећавани током испитивања, слика 5.20. Постепени пораст трансмембранског притиска и специфичне потрошње енергије узрокован је почетком смањења пропустљивости мембранске површине. Узрочник смањења пропустљивости мембране је биолошког карактера.



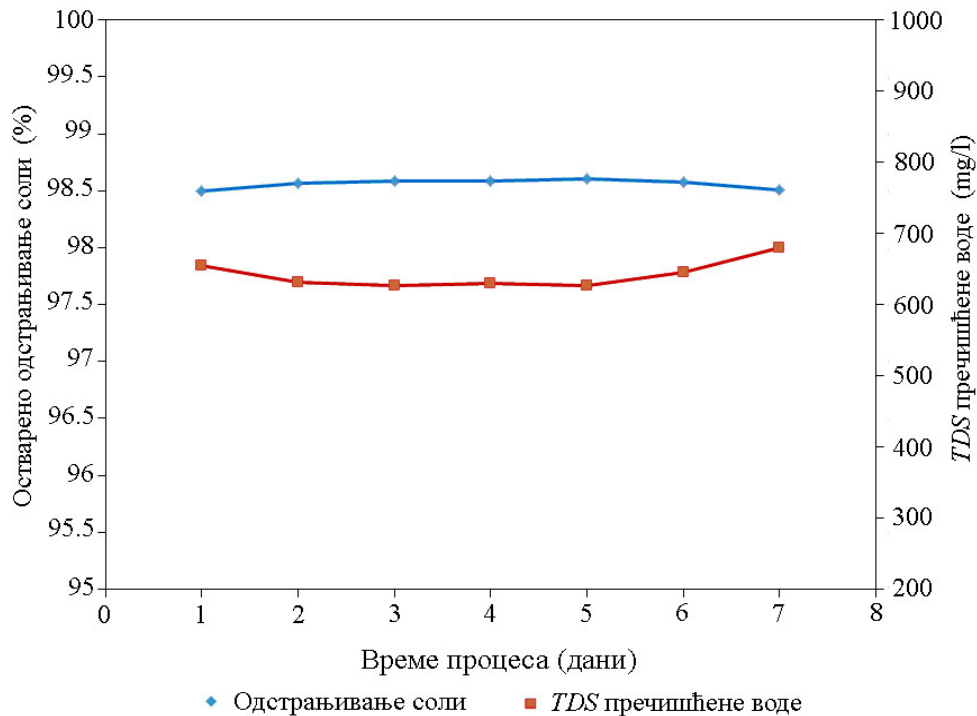
Слика 5.20. Специфична потрошња система RO који садржи 14 мембранских модула типа QFX SW 75 ES у оперативном процесу са морском водом високе концентрације соли

Као што је приказано графиком на слици 5.21, током испитивања је одржан стабилан запремински проток пречишћене воде. Подаци показују благи пад степена корисности процеса и благи пораст вредности пада притиска услед трења кроз систем. То су све показатељи почетка смањења пропустљивости мембранског система.

На слици 5.22 приказан је ниво концентрације растворених материја у пречишћеној води и степен одстрањивања соли подсистема за производњу пречишћене воде. Експериментални подаци указују на релативно константно одстрањивање соли и ниво концентрације растворених материја у пречишћеној води.



Слика 5.21. Запремински проток пречишћене воде, степен корисности процеса и пад притиска услед трења система *RO* који садржи 14 мембранских модула типа *QFX SW 75 ES*



Слика 5.22. Степен одстрањивања соли из морске воде, концентрације соли у пречишћеној води система *RO* који садржи 14 мембранских модула типа *QFX SW 75 ES* са морском водом високе концентрације соли

Просечна температура морске воде током експерименталних испитивања са високом концентрацијом растворених материја била је 19,1°C. Ова температура је релативно ниска за радне услове процеса *RO*, чиме је побољшан степен одстрањивања соли услед смањеног пролаза соли кроз мембрану. Иако је одстрањивање соли на површи мембранског материјала повећано при нижој температури, квалитет пречишћене воде је и даље лошији због високог проласка соли *NanoH₂O* мембранских модула.

5.4.3 Закључци експерименталног испитивања *ES* мембранских модула

Резултати експерименталног испитивања *NanoH₂O QFX SW ES* мембранских елемената указују на незадовољавајући степен одстрањивања соли независно од концентрације *TDS* морске воде. Концентрација соли у пречишћеној води, добијене у експерименталном постројењу била је око 60% већа од захтеване концентрације *TDS* пречишћене воде за све услове експеримента и радне режиме. Због незадовољавајућих карактеристика одстрањивања соли, ови мембрански модули требају бити примењивани у системима у којима је концентрација *TDS* морске воде ниска и/или у хибридној конструкцији система мембранских посуда под притиском, при којој проток воде кроз сваки појединачни мембрански модул може бити оптимизиран. [72]

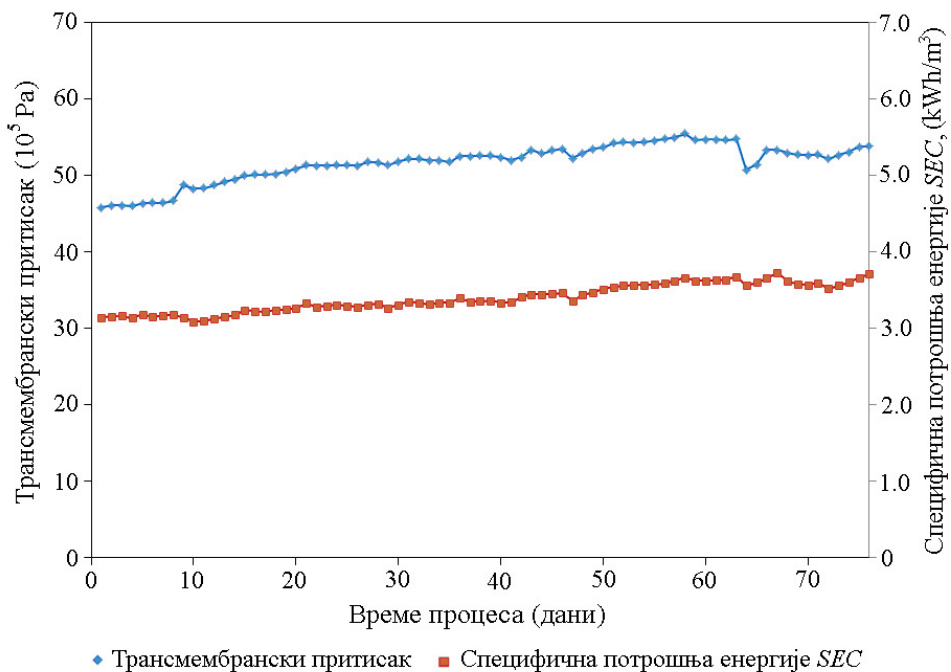
5.4.4 Експериментално испитивање *R* мембранских модула

Карактеристике мембранских модула типа *QFX SW 75 R* су високе вредности протока пречишћене воде и високог степена одстрањивања соли [108]. Запремински проток пречишћене воде *R* мембранских модула је нижи у поређењу са *ES* мембранским модулима, док је степен одстрањивања соли повећан на 99,85%. Како би упоредили карактеристике *R* мембрана са претходно испитаним *ES* мембранама, као и карактеристикама мембрана других произвођача, постављено је и испитано 14 мембранских елемената типа *QFX SW 75 R*. Ови мембрански елементи су касније испитани при ниским и високим вредностима концентрације соли у морској води.

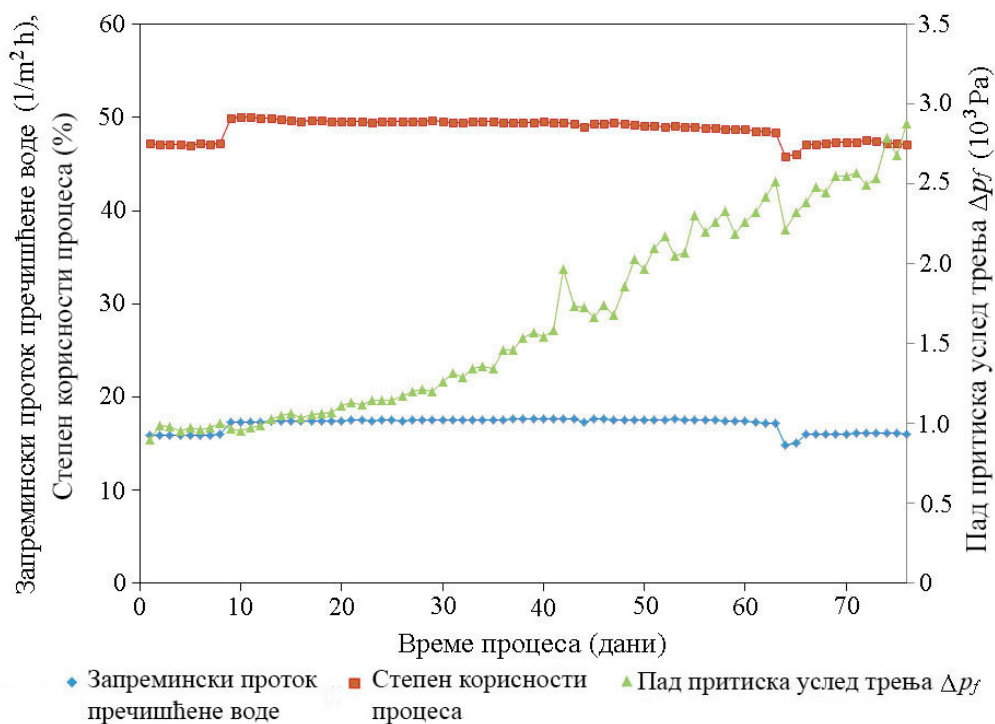
5.4.5 Експериментално испитивање *R* мембранских модула коришћењем морске воде са ниском концентрацијом растворених соли

У сврху испитивања радних режима система *RO*, користећи *NanoH₂O* мембране високог степена одстрањивања соли и високе пропустљивости воде, у подсистем бр. 3 постављено је 14 *QFX SW 75 R* мембранских елемената (7 елемената по посуди под притиском). Током испитивања концентрација *TDS* морске воде била је приближно 31000 mg/l. Као и код претходног експерименталног испитивања, радни параметри система били су праћени како би се испитале перформансе и стабилност система. Трансмембрански притисак и специфична потрошња енергије за мембранске елементе *QFX SW 75 R* приказани су на слици 5.23. Трансмембрански притисак и специфична потрошња енергије постепено су се повећавали током рада. Примећен је благи пад трансмембранског притиска и специфичне потрошње енергије 64. дана процеса због смањења степена корисности процеса. Постепено повећање трансмембранског притиска и специфичне потрошње енергије последица је смањења пропустљивости мембране.

Као што је приказано експерименталним подацима, слика 5.24, запремински проток пречишћене воде имао је стабилне вредности у току испитивања *NanoH₂O QFX SW R* модула (после 8. дана) под ниским условима концентрације *TDS* морске воде. Степен корисности процеса је 9. дана повећан на 50% како би се повећала производња пречишћене воде и испитале перформансе мембране под условима високог степена корисности процеса. Након тога степен корисности процеса био је релативно стабилан, приказујући благи тренд опадања током рада, изазван смањењем пропустљивости мембране. Вредност пада притиска услед трења система се такође експоненцијално повећава, услед биолошког узрочника смањења пропустљивости мембране.

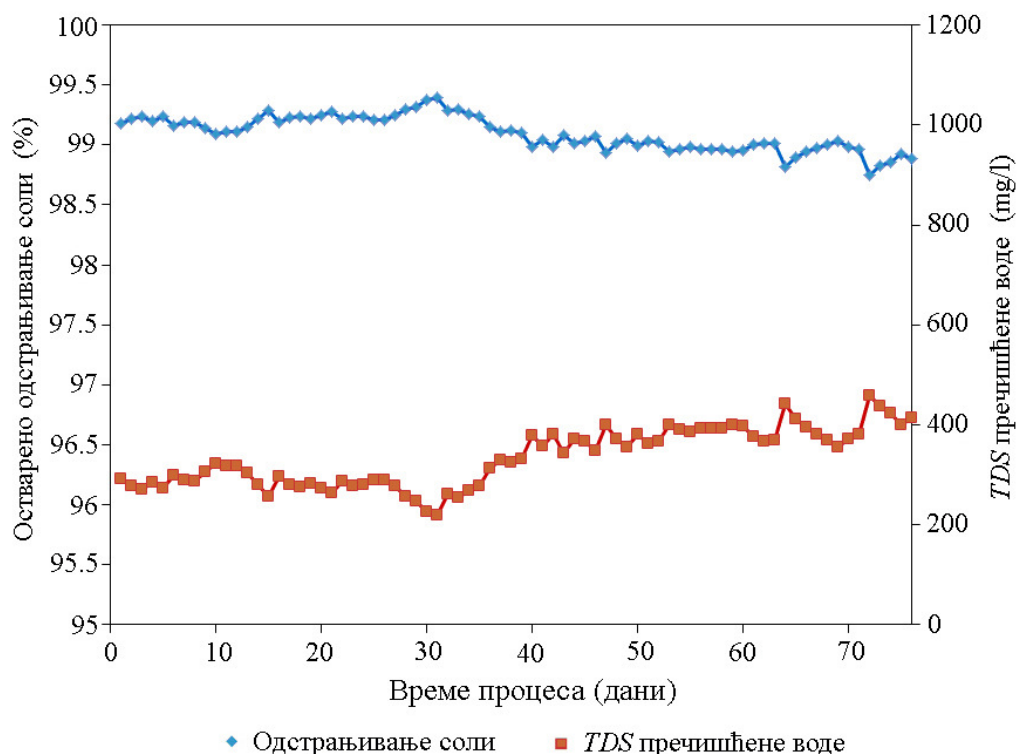


Слика 5.23. Специфична потрошња енергије и трансмембрански притисак система RO који садржи 14 мембранских модула типа QFX SW 75 R са ниском концентрацијом соли морске воде



Слика 5.24. Запремински проток пречишћене воде, степен корисности процеса и пад притиска услед трења система RO који садржи 14 мембранских модула типа QFX SW 75 R са морском водом ниске концентрације соли

На слици 5.25 приказан је степен одстрањивања соли и концентрација растворених материја у пречишћеној води подсистема бр. 3 за прераду воде. У експерименталним подацима примећен је тренд смањења степена одстрањивања соли. Експериментални подаци се поклапају са посматраним повећањем вредности пада притиска услед трења Δp_f . Опадајући тренд степена одстрањивања соли, заједно са повећањем Δp_f , може се објаснити ефектом концентрације поларизације изазване слојем биофилма на мембранској површи.

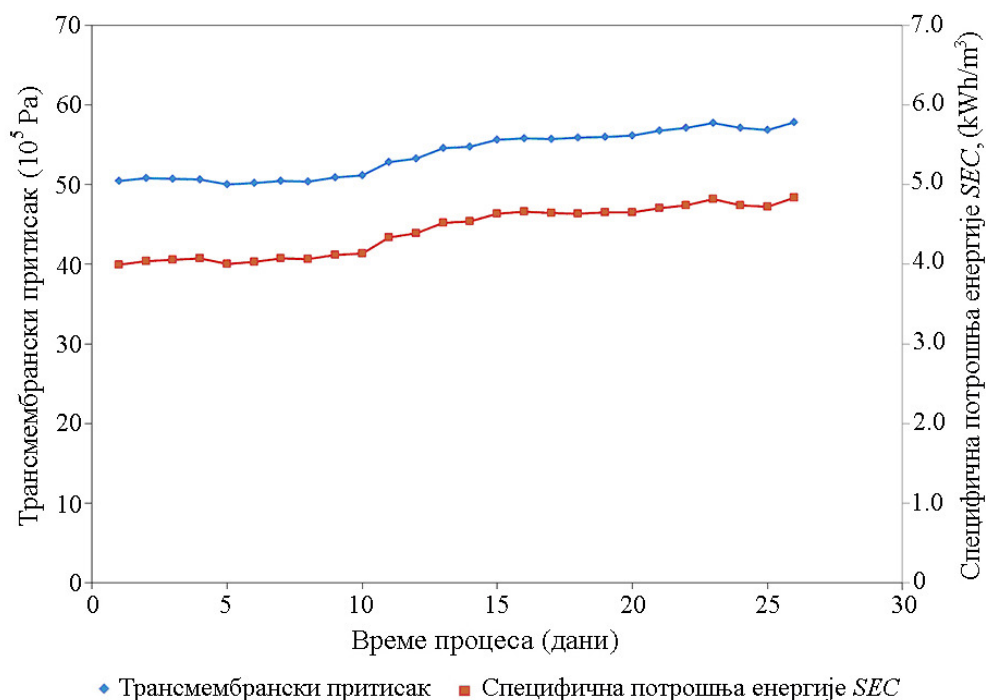


Слика 5.25. Степен одстрањивања соли из морске воде, концентрације растворених соли у пречишћеној води система *RO* који садржи 14 мембранских модула типа *QFX SW 75 R*

5.4.6 Експериментално испитивање *R* мембранских модула коришћењем морске воде високе концентрације соли

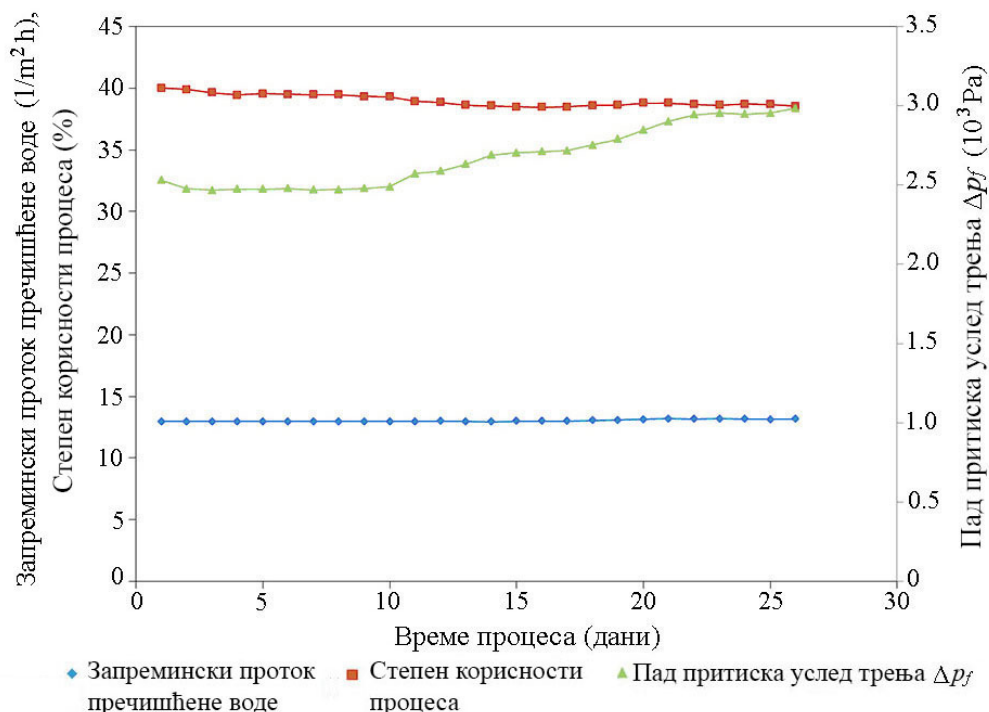
У циљу испитивања карактеристика *NanoH₂O* мембранских модула *QFX SW 75 R*, подсистем бр. 3 снабдеван је морском водом припремљеном за експерименталне услове испитивања високе концентрације растворених материја. Концентрација *TDS* у морској води за експериментално испитивање износила је приближно 42000 mg/l. Као и код претходног испитивања, радни режими система

су праћени како би се испитале перформансе и стабилност система. Притисак морске воде и потрошња енергије *QFX SW 75 R* мембранских модула приказани су на слици 5.26. Трансмембрански притисак и специфична потрошња енергије постепено се повећавају током рада. Постепено повећање трансмембранског притиска и специфичне потрошње енергије је изазвано смањењем пропустљивости мембране.



Слика 5.26. Специфична потрошња енергије система који садржи 14 мембранских модула типа *QFX SW 75 R* и трансмембрански притисак морске воде високе концентрације соли

Као што је приказано графиком на слици 5.27, у току испитивања је одржан стабилан запремински проток *NanoH₂O QFX SW R* мембранских модула са високом концентрацијом растворених соли у морској води. Степен корисности процеса је постављен на почетну вредност од 40%, систем је радио при константном запреминском протоку пречишћене воде. Степен корисности процеса био је релативно стабилан, приказујући благи тренд опадања током времена процеса. Овај тренд указује на смањење пропустљивости мембрана. Пад притиска услед трења мембранског система такође поприма веће вредности након 10. дана рада. Растући тренд пада притиска услед трења настаје услед биолошких узрочника смањења пропустљивости мембране.

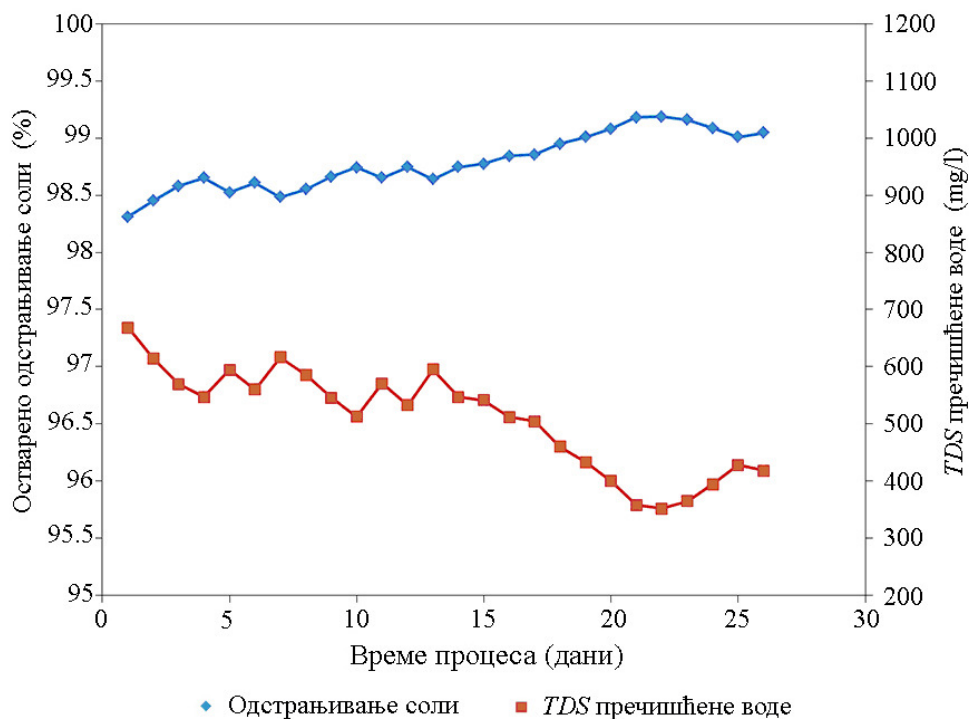


Слика 5.27. Запремински проток пречишћене воде, степен корисности процеса и пад притиска услед трења система *RO* који садржи 14 мембранских модула типа *QFX SW 75 R*

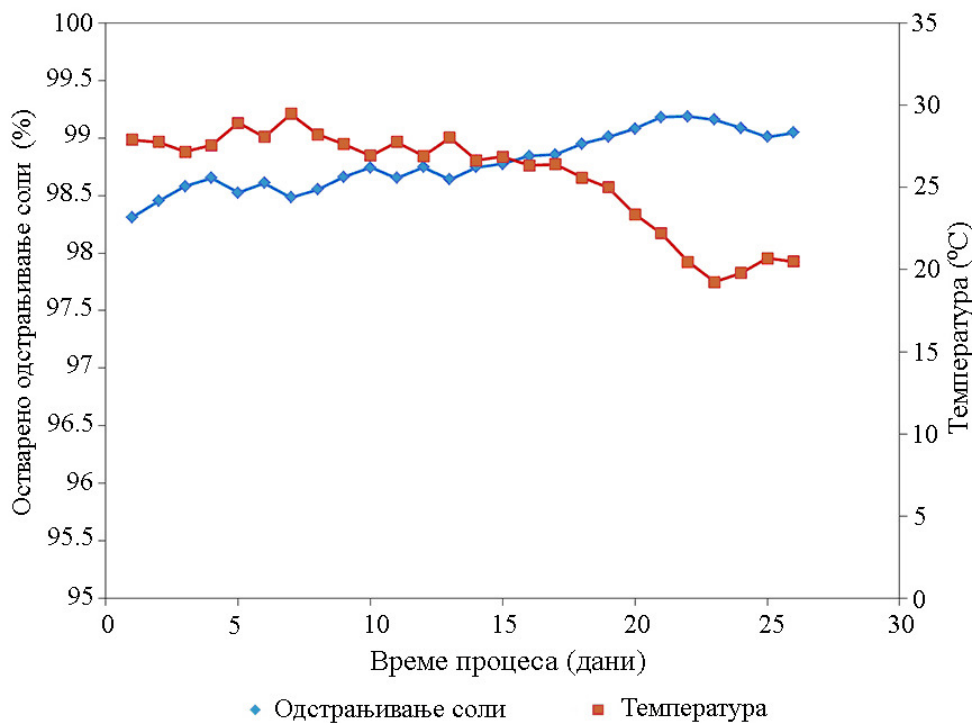
Током процеса праћене су концентрације растворених материја у пречишћеној води и степен одстрањивања соли подсистема *RO*. Добијени подаци указују на релативно константан степен одстрањивања соли и концентрације растворених материја пречишћене воде до тринаестог дана процеса, слика 5.28.

Након 13. дана процеса, степен одстрањивања соли је значајно повећан, а тиме је концентрација *TDS* пречишћене воде значајно смањена. Чак и са повећањем степена одстрањивања соли, квалитет пречишћене воде је испод очекиваног услед велике пролазности соли кроз *NanoH₂O QFX SW 75 R* мембранске модуле.

Након истраживања узрочника повећања степена одстрањивања соли, а самим тим и смањења концентрације *TDS* пречишћене воде током процеса, утврђено је да је температура морске воде била значајно смањена, слика 5.29. Смањењем температуре морске воде смањује се пролазност соли мембране *RO*, а повећава степен одстрањивања соли.



Слика 5.28. Степен одстрањивања соли из морске воде, концентрације растворених материја у пречишћеној води система *RO* који садржи 14 мембранских модула типа *QFX SW 75 R*



Слика 5.29. Степен одстрањивања соли из морске воде према температури морске воде *RO* који садржи 14 мембранских модула типа *QFX SW 75 R*

Посматрајући са другог аспекта, смањењем температуре морске воде, смањује се ниво пропустљивости мембране, а самим тим се повећава специфична потрошња енергије процеса *RO*.

5.4.7 Закључци експерименталног испитивања *R* мембранских модула

Експериментални резултати рада лабораторијске инсталације *RO* који се односе на *NanoH₂O QFX SW R* мембранске елементе указују на умерен и степен одстрањивања соли независно од концентрације соли у морској води.

Осим тога, као што је запажено и код резултата *QFX SW ES* мембранских модула, концентрација соли у пречишћеној води у експерименталном постројењу била је око 60% већа од захтеване концентрације *TDS* пречишћене воде за све испитиване услове процеса.

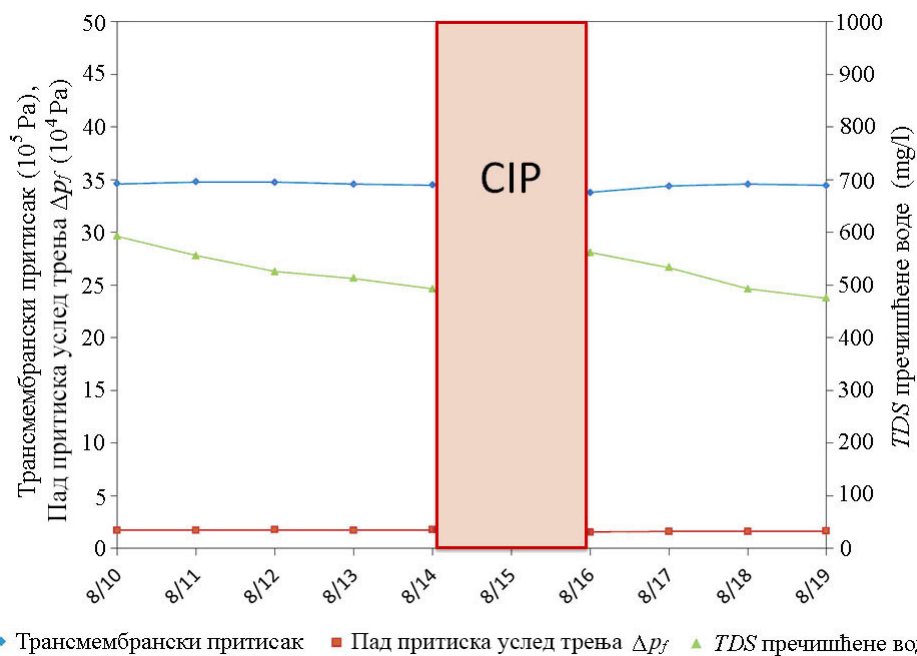
Због неодговарајућих перформанси, ови мембрански модули су прихватљиви само за индустријске примене прераде воде, где је концентрација *TDS* морске воде ниска, или у хибридној конфигурацији система мембранских посуда под притиском при којој проток пречишћене воде појединачних мембранских модула може бити оптимизован.

5.4.8 Резултати процеса чишћења мембрана хемијским растворима

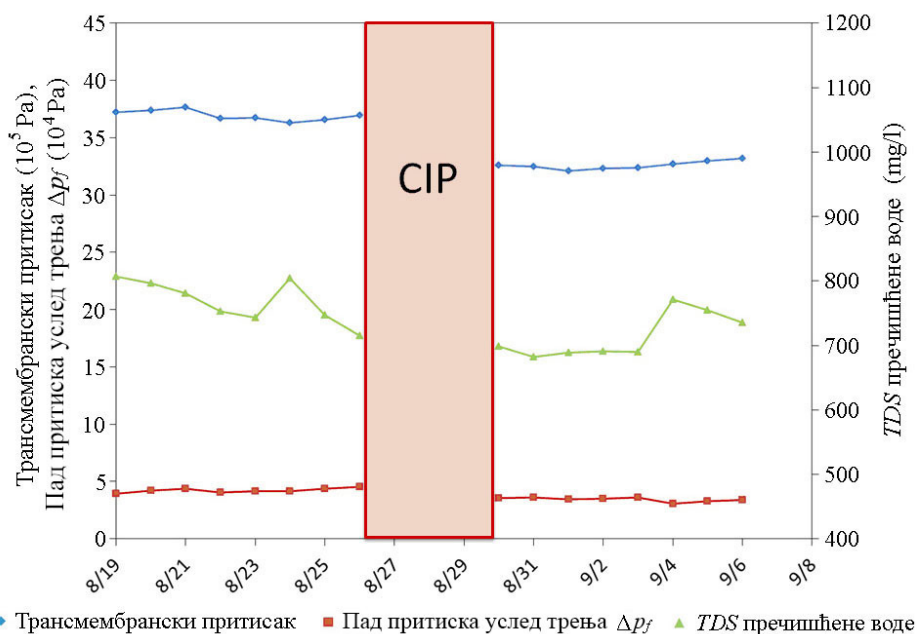
Чишћење мембранских елемената хемијским растворима (скраћено *CIP*) изводи се у складу са наведеним описаним поступком за подсистем бр. 1 (10 елемената *QFX SW 75 ES*) и подсистем бр. 2 (14 елемената *QFX SW 75 ES*). Ова процедура је изведена како би се истражила обновљивост перформанси мембранских елемената.

Поступак чишћења мембранских модула подсистема бр. 1 хемијским растворима резултирао је благим падом трансмембранског притиска и опадајућим трендом вредности пада притиска услед трења кроз систем, слика 5.30. Примећен је пораст концентрације *TDS* пречишћене воде, иако се ниво концентрације *TDS* пречишћене воде вратио у очекивани интервал после пар дана процеса *RO*. Овај почетни пораст концентрације *TDS* пречишћене воде је последица коришћења хемијских раствора за чишћење високе и ниске *pH* вредности. Обновљивост

посматраних перформанси мембранских модула била је прихватљива, указујући на потребу коришћења различитих раствора и процедура хемијског чишћења.



Слика 5.30. Трансмембрански притисак, пад притиска услед трења кроз систем и концентрације соли у пречишћеној води пре и после процеса чишћења мембрана хемијским растворима подсистема бр. 1



Слика 5.31. Трансмембрански притисак, пад притиска услед трења кроз систем и концентрације соли у пречишћеној води, пре и после процеса чишћења мембрана хемијским растворима подсистема бр. 2

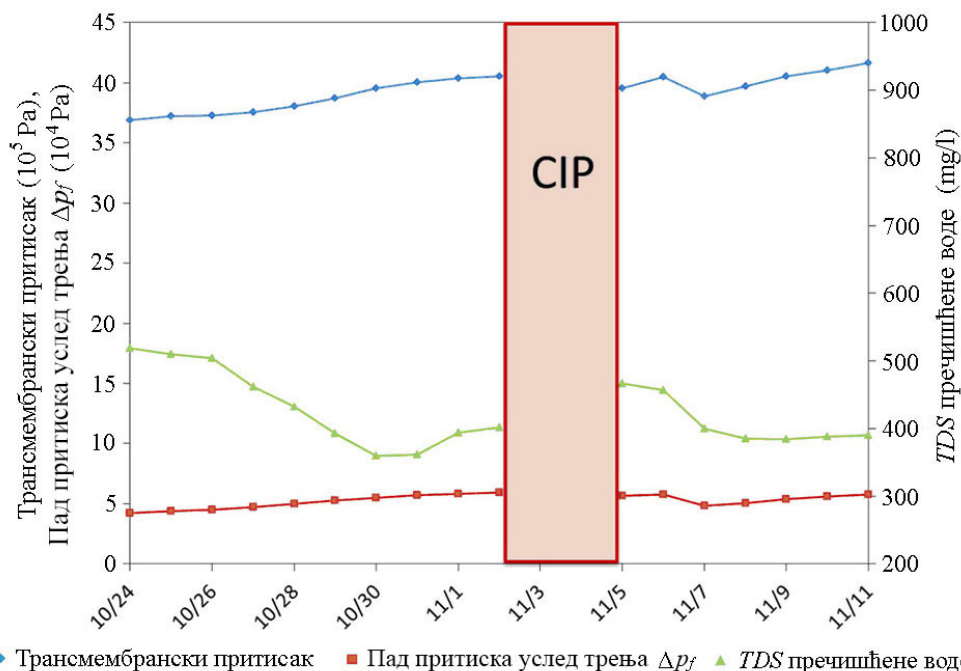
Чишћење мембранских модула подсистема бр. 2 хемијским растворима резултирао је смањењем трансмембранског притиска за $3,5 \cdot 10^5$ Ра и смањењем пада притиска услед трења за $1 \cdot 10^4$ Ра, слика 5.31. Концентрација растворених материја *TDS* у пречишћеној води остала је на истом нивоу након чишћења мембрана хемијским растворима.

Остварена је боља обновљивост перформанси мембранских модула подсистема бр.2 у односу на подсистем бр. 1, услед коришћења базичног раствора високе *pH* вредности за чишћење (од *pH* 11 до *pH* 11,7). Поред тога, подсистем за десалинизацију воде је имао виши ниво смањења пропустљивости мембрана, као што је приказано много вишим вредностима пада притиска услед трења кроз мембрански систем. Обновљивост перформанси мембранских модула није остварена на очекиваном нивоу, указујући на потребу коришћења различитих раствора и процедура чишћења мембрана хемијским поступком.

Додатно чишћење мембрана било је изведено на подсистему бр. 2, модификованим хемијским поступком. Модификовани поступак био је изведен на следећи начин:

1. Подсистем за прераду воде испран је пречишћеном водом;
2. Коришћен је базични раствор (NaOH) *pH* вредности 11,3 са 2% етилен-диамин-тетра сирћетном киселином (*EDTA*) на притиску од $5,2 \cdot 10^5$ Ра у трајању од 2 сата;
3. Подсистем за прераду воде испран је пречишћеном водом;
4. Коришћен је раствор лимунске киселине *pH* вредности 2,4 на притиску $5,2 \cdot 10^5$ Ра у трајању од 12 сати;
5. Подсистем за прераду воде испран је пречишћеном водом и припремљен за оперативан рад.

Наведени *CIP* поступак изведен је на подсистему бр. 2 како би се истражиле могућности побољшања обновљивости перформанси мембранских модула у односу на претходни поступак. Резултат експеримената показује да је дошло до благог смањења трансмембранског притиска, као и смањења вредности пада притиска услед трења подсистема, слика 5.32. У односу на претходни *CIP* поступак, остварено побољшање обновљивости перформанси мембранских модула је било приближно на истом или нешто мањем нивоу.

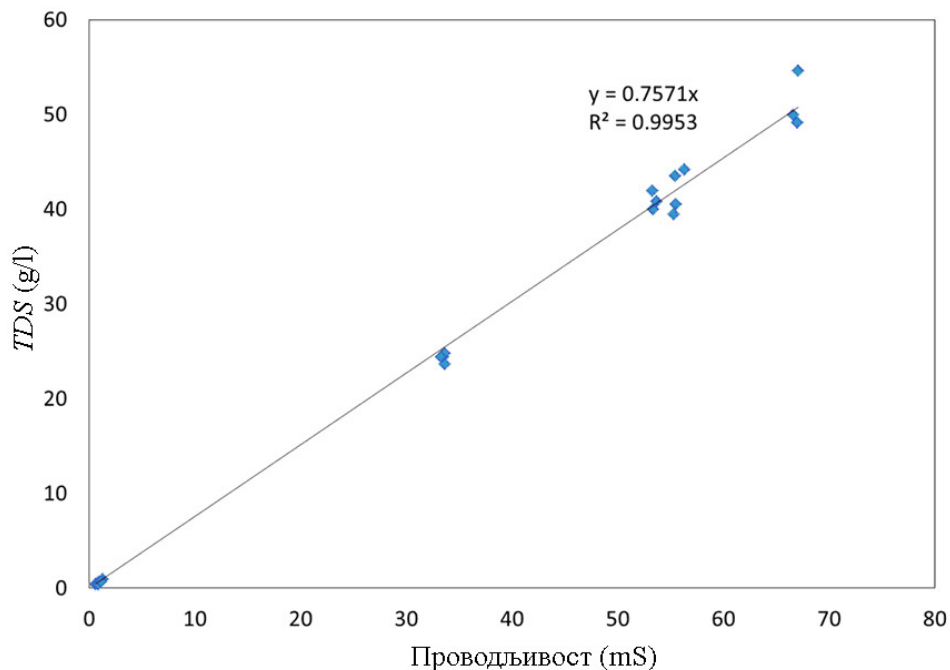


♦ Трансмембрански притисак ■ Пад притиска услед трења Δp_f ▲ TDS пречишћене воде
 Слика 5.32. Трансмембрански притисак, пад притиска услед трења кроз систем и концентрације соли у пречишћеној води, пре и после хемијског процеса чишћења мембрана модификованим CIP поступком, подсистема бр. 2

Резултати претходна три изведена поступка чишћења мембрана коришћењем стандардних хемијских раствора показала су неефикасност обновљивости перформанси мембрана. Да би се постигла повећана пропустљивост мембрана, а самим тим и већи степен корисности процеса, потребно је истраживати друга доступна комерцијална решења за чишћење мембрана хемијским растворима.

5.4.9 Однос између електричне проводљивости и концентрације растворених соли

За потребе експерименталних испитивања, како би се поуздано утврдила корелација између електричне проводљивости морске воде и концентрације растворених материја, обављено је испитивање узорака морске воде, пречишћене воде и концентроване воде у циљу обухватања широког спектра концентрација TDS.



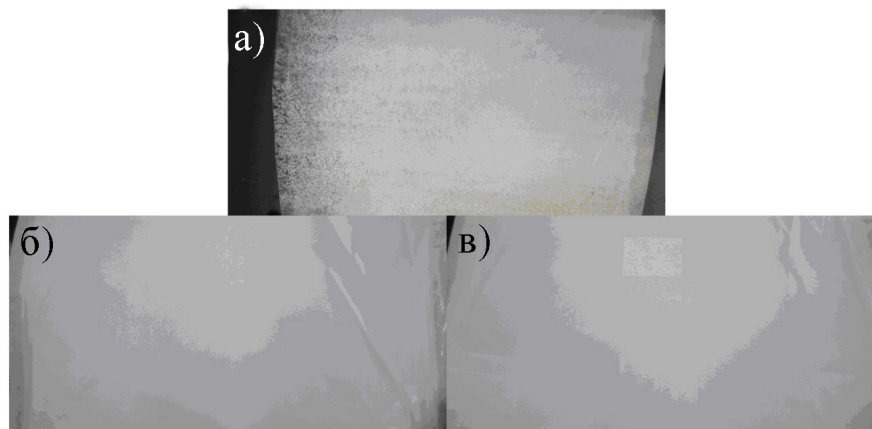
Слика 5.33. Зависност између електричне проводљивости и концентрације соли у води

Као што се види на слици 5.33, корелација између *TDS* и електричне проводљивости је линеарна, и омогућава поуздано предвиђање *TDS* на основу мерења електричне проводљивости воде.

5.5 Аутопсија мембране

Након уклањања 10 мембранских елемената *NanoH₂O QFX SW ES* из подсистема бр. 1, предњи, средњи и задњи мембрански модул из посуде под притиском је сачуван за аутопсију и анализу. Са слике 5.34 је очигледно да је предњи елемент садржи највећу количину наслага, због раста и депоновања биолошког материјала.

За мерење укупне количине наталожених материја на површини мембране, изведен је поступак мерења суве материје. Овај поступак је извршен пружањем наталожених материја са површине мембране коришћењем прибора са равном оштрицом, водећи рачуна да се не оштети мембрански материјал током прикупљања.



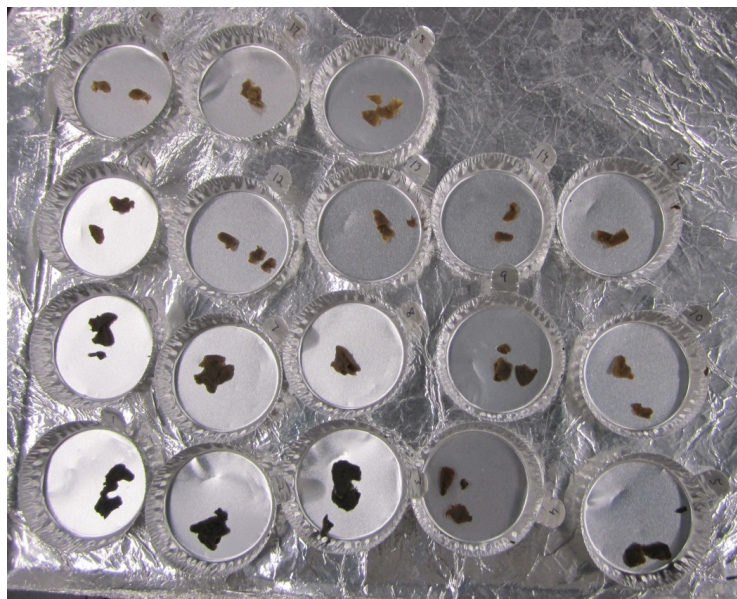
Слика 5.34. Површине појединачних сегмената мембране: а) предњи елемент
б) средњи елемент и в) задњи елемент
(смер струјања воде је са леве на десну страну)

Поступак мерења суве материје је поновљен три пута за сваку деоницу и примењен је на све три деонице сваког мембранског елемента, слика 5.35. Са сваке деонице мембране материјал је пажљиво прикупљен како би се обезбедила симетрична геометрија узорака, са прецизним мерењем површина узимања узорака.



Слика 5.35. Мембрана са приказаним површинама за узимање узорака материјала

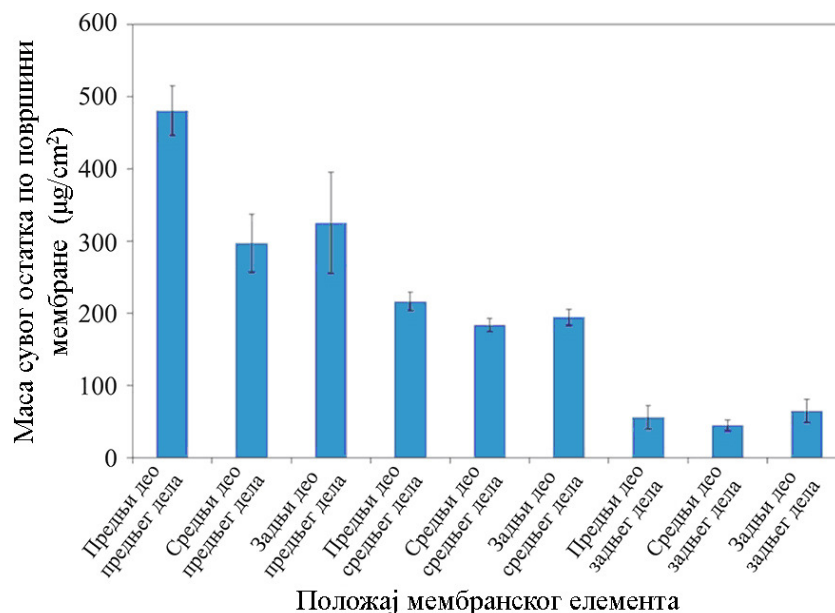
Да би се прецизно одредила количина наталожених материја на површини мембране, прикупљени узорак материја је пажљиво пренет на калибрисану посуду за мерење, без значајног губитка приликом преношења. Узорци су затим осушени на температури од 105°C како би се уклонила влага, слика 5.36.



Слика 5.36. Калибрисане посуде за мерење масе прикупљених узорака материјала са површине слојева мембране

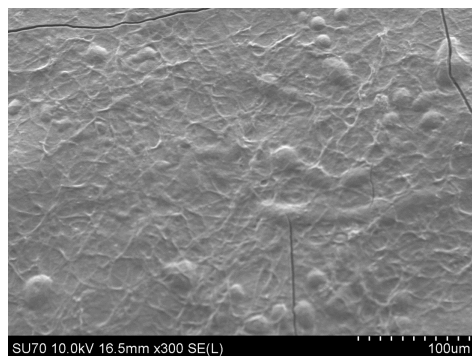
Резултати мерења узорака суве материје узетих из области (деоница) од почетног до крајњег дела мембранске посуде под притиском која је садржала 10 мембранских елемената типа *QFX SW ES*, приказани су на слици 5.37. Из ових резултата је очигледно да је количина наталожених материја највећа на почетној деоници мембранске посуде под притиском и смањује се у смеру завршног дела мембранске посуде под притиском [91]. Овај тренд је логичан, јер је морска вода најбогатија материјалима и органским материјама на улазу у мембранску посуду под притиском. Концентрација ових материја се смањује како морска вода струји дуж мембранске посуде под притиском, што резултира смањеном количином наслага материјала на површини мембране. Одступање измерених вредности масе узорака се може приписати непрецизности која се односи на величину површине узорака, мањег губитка и масе приликом преношења узорака са мембране у посуду за мерење, као и учешћу мале количине соли при мерењу суве материје.

На основу измерених вредности масе узорака (слика 5.37), претпоставља се да су насlage мембране биолошког карактера. Како би боље истражили ову хипотезу, узети су узорци са површине мембране за даљу анализу.



Слика 5.37. Маса суве материје сведена на површину мембране од предњег до задњег положаја мембранских елемената у посуду под притиском

Посматрана је тродимензионална површина мембране коришћењем електронског микроскопа, како би се у потпуности приказао материјал наслага на површини мембране, слика 5.38. Посматрајући наведену слику, закључује се да је примарна компонента наталоженог слоја биолошког карактера и то посматрајући ћелије микроба и екстрацелуларне полимерне супстанце на површини мембране.



Слика 5.38. Електронским микроскопом скенирана површина одводног дела средњег елемента мембране

Уочене пукотине на површини су настале услед припреме узорка. Узорци су били потпуно осушени пре сликања електронским микроскопом. Претходно наведени начин узимања узорка узроковао је формирање пукотина у осушеним материјалима (биофилмовима).

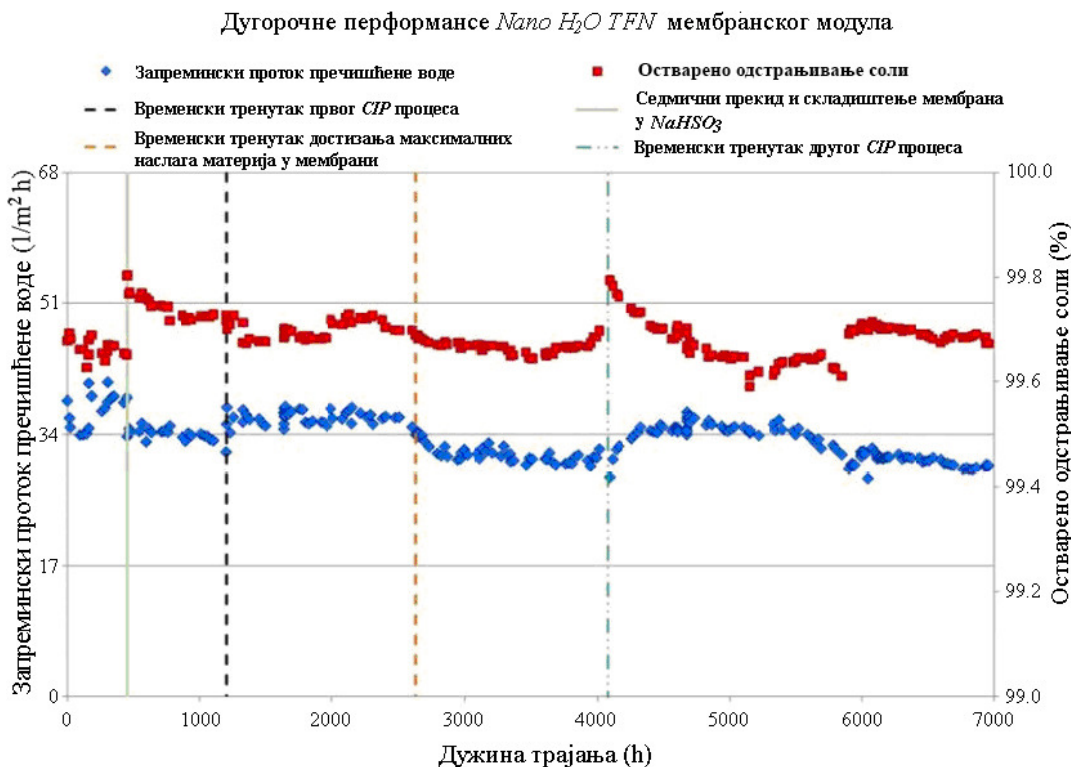
5.6 Резултати експерименталног испитивања процеса *RO* коришћењем *Nano H₂O* мембранских модула

У оквиру експерименталних истраживања обухваћено је испитивање *TFN* материјала мембране. Извршено је испитивање мембранских модула пречника 100 mm и 200 mm. Сва испитивања обављена су коришћењем експерименталне инсталације *RO*, слика 5.39.

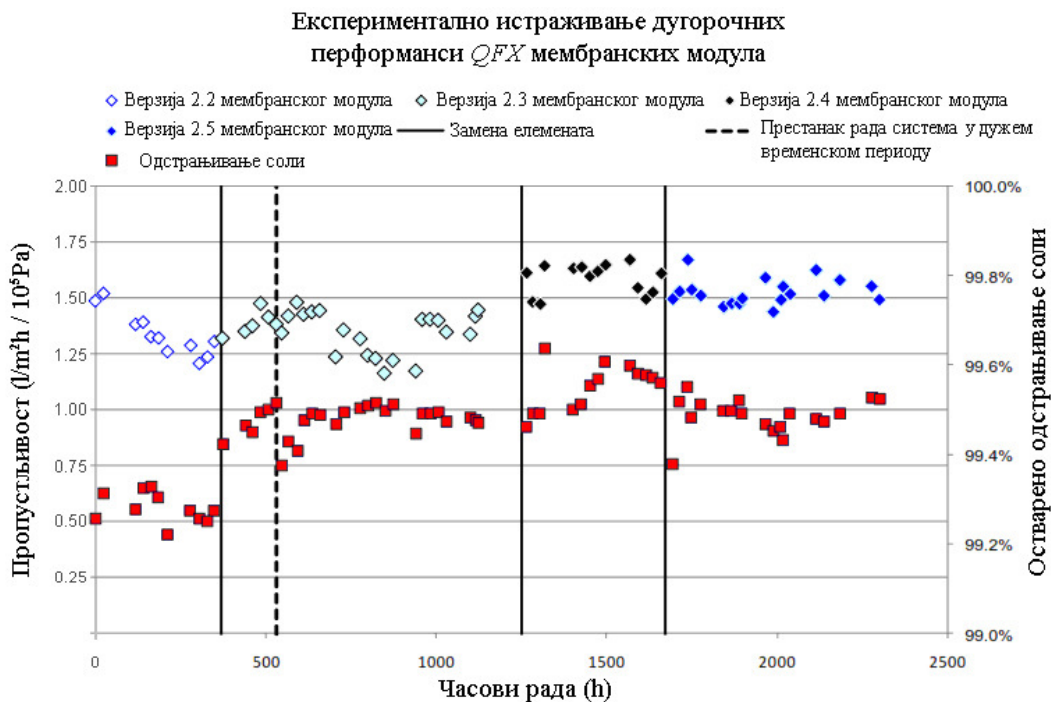


Слика 5.39. Експериментално постројење *RO* са *NanoH₂O* мембранским модулима пречника 100 mm

Експериментални резултати *NanoH₂O* модула показују стабилан запремински проток пречишћене воде и степен одстрањивања соли током трајања процеса, који је одржан у временском интервалу од годину дана, слика 5.40. Праћен је ефекат смањења пропустљивости мембрана, при чему је чишћење мембрана хемијским растворима успешно изведено након 1200 часова рада и 4100 часова рада. Прво чишћење мембрана хемијским процесом извршено је у складу са процедуром описаном у претходном поглављу. Друго хемијско чишћење мембрана обављено је коришћењем комерцијалног раствора, према препоруци компаније *General Electric*.



Слика 5.40. Запремински проток пречишћене воде и степен одстрањивања соли система RO који садржи NanoH₂O мембранске елементе пречника 100 mm



Слика 5.41. Пропустљивост и степен одстрањивања соли система RO који садржи QFX мембранске елементе

Експериментални подаци степена одстрањивања соли, приказани на слици 5.40 представљају екстраполацију једног мембранског елемента у посуди под притиском, а не целокупно одстрањивање у подсистему *RO*. Анализирајући резултате експеримената за *NanoH₂O* мембранске елементе пречника 200 mm, који су приказани на слици 5.41, потврђују да је остварен већи степен одстрањивања соли у односу на мембране пречника 100 mm.

Упоредни приказ радних режима процеса *RO* за *QFX* и *DOW* мембранске модуле дат је у табели 5.2. Треба посебно нагласити да је температура морске воде имала различите вредности у експериментима. Ниже вредности температуре морске воде довеле су до побољшања одстрањивања соли.

Табела 5.2. Резултати процеса одстрањивања соли из воде система *RO* који садржи *QFX* мембранске модуле и комерцијално заступљене мембранске модуле *DOW*

| Параметар | <i>QFX</i> мембрански модули | Комерцијално широко заступљени мембрански модули <i>DOW</i> |
|----------------------------|------------------------------|---|
| Запремина произведене воде | 102 m ³ /d | 84,5 m ³ /d |
| Степен корисности процеса | 44,1% | 42,4% |
| Трансмембрански притисак | 49,6 – 51,1 bar | 55,5 – 58,5 bar |
| Потрошња енергије | 1,33 kWh/m ³ | 1,73 kWh/m ³ |
| Квалитет воде | 192 - 246 mg/l | 110 - 165 mg/l |
| Температура воде | 12,5 - 16,1°C | 11,7 - 15,1°C |

Након анализе радних параметара *QFX* мембранских модула у односу на комерцијални мембрански модул *DOW*, примећено је да су постигнуте повољније вредности укупне запремине произведене пречишћене воде и мања специфична потрошња енергије. Међутим, концентрација растворених материја у пречишћеној води добијена из *QFX* модула је око 60% већа у односу на *DOW* комерцијални мембрански модул. Ови подаци се поклапају са резултатима појединачних експеримената.

5.7 Анализа енергетских трошкова процеса и инвестиционих трошкова постројења реверзибилне осмозе воде

У циљу утврђивања оправданости коришћења високо пропусних *NanoH₂O* мембранских модула у процесима одстрањивања соли из морске воде високе

концентрације *TDS*, примењено је неколико симулационих прорачуна за различите конфигурације *NanoH₂O* мембрана у поређењу са *DOW* мембранама. Прорачуни су изведени за једнофазне/једнопролазне и двофазне системе *SWRO*. Претпоставке усвојене у овој анализи су следеће: капацитет постројења пречишћене воде износи 113562 m³/дан, концентрација соли у морској води 40000 mg/l (концентрације појединачних материја приказане су у табели 5.3), температура морске воде од 25°C. Поред тога, претпоставља се да степен корисности склопа пумпе и електромотора износи 90% и да је могуће остварити уштеду енергије од 30% коришћењем уређаја за повраћај енергије.

Табела 5.3. Приказ концентрација појединачних материја у морској води

| Катјони | mg/l | Ањони | ppm |
|-----------------------------|----------|------------------------------------|----------|
| Амонијак (NH ₄) | 0,00 | Флуор (F) | 1,29 |
| Натријум (Na) | 12248,11 | Хлор (Cl) | 22104,00 |
| Калијум (K) | 504,40 | Сулфати (SO ₄) | 3049,77 |
| Магнезијум (Mg) | 1487,64 | Нитрати (NO ₃) | 0,00 |
| Калцијум (Ca) | 432,11 | Бром (Br) | 0,00 |
| Стронцијум (Sr) | 7,39 | Карбонати(CO ₃) | 2,61 |
| Баријум (Ba) | 0,01 | Хидрокарбонати (HCO ₃) | 154,64 |
| | | Бор (B) | 4,78 |

При овим прорачунима, једина променљива била је конфигурација мембранских посуда под притиском у систему *SWRO* (тип мембране, број и распоред за хибридне системе). Сви остали радни услови, као што су припрема, транспорт морске воде и повраћај енергије су остали непромењени. Својства мембрана коришћених у симулационим прорачунима представљена су у табели 5.4. Резултати експерименталног истраживања перформанси *NanoH₂O* мембрана показују да су концентрације растворених материја пречишћене воде за 60% веће од резултата симулационих прорачуна. Поред тога, резултати који се односе на специфичну потрошњу енергије, добијени из симулационих прорачуна су веома непрецизни. Процењени трошкови *NanoH₂O* мембрана били су \$475 по мембранском елементу и \$450 за комерцијалне *DOW* мембранске елементе.

Табела 5.4. Карактеристике мембрана које су коришћене у прорачунима програмског пакета Q^+ - *Projection software*

| | <i>Dow Filmtec SW30HRLE- 440i</i> | <i>NanoH2O QFX SW 400 ES</i> | <i>NanoH2O QFX SW 400 R</i> | <i>NanoH2O QFX SW 400 SR</i> |
|---|---|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Номинални степен одстрањивања соли | 99,80 % | 99,80 % | 99,85% | 99,85% |
| Површина* | 41 m ² | 37 m ² | 37 m ² | 37 m ² |
| Дебљина слоја материјала који прикупља флуид пречишћене воде | 28 μm | 28 μm | 28 μm | 28 μm |
| Запремински проток пречишћене воде | 31 m ³ /дан | 52 m ³ /дан | 34 m ³ /дан | 24,6 m ³ /дан |
| Процент одстрањивања хемијског елемента Бора | N/A | 89% | 93% | 93% |

5.7.1 Анализа једнопролазне конфигурације SWRO

Приликом пројектовања постројења за десалинизацију, у циљу снабдевања држава Блиског Истока пијаћом водом, треба узети у обзир да највећа дозвољена концентрација растворених материја пречишћене воде износи 200 mg/l [109]. Са тачке гледишта инвестиционих трошкова десалинизационог постројења, пожељно је да се квалитет пречишћене воде оствари у једнофазном систему SWRO [110]. У циљу остваривања минималне специфичне потрошње енергије, коришћене су високопроточне $NanoH_2O$ мембране и направљен је низ симулационих прорачуна у сврху поређења резултата са комерцијалним мембранама (*DOW Filmtec*). Резултати прорачуна добијених применом софтвера Q^+ *Projection Software* указују на то да није било могуће користити $NanoH_2O ES$ мембране самостално, због високе концентрације *TDS* пречишћене воде (веће од 500 mg/l). Смањењем броја мембранских посуда под притиском и броја мембранских елемената при пројектовању смањују се инвестициони трошкови десалинизационог постројења.

Табела 5.5. Резултати прорачуна за одабране једнопролазне мембранске конфигурације постројења SWRO

| Мембранска конфигурација | Трансмембрански притисак (10^5Pa) | Запремин. проток преч. воде ($\text{l/m}^2\text{h}$) | Одстрањивање соли (%) | Потрошња енергије (kWh/m^3) | Потрошња енергије са ERD (kWh/m^3) | TDS преч. воде (mg/l) | Коригован TDS преч. воде (mg/l) | Број посуда под притиском | Број мембр. по посуди под притис. | Површ./Елемен. мембране (m^2) |
|-------------------------------|---|--|-----------------------|--|---|----------------------------------|--|---------------------------|-----------------------------------|--|
| DOW SW30HRLE | 56,59 | 13,6 | 99,5 | 4,40 | 3,08 | 200 | 200 | 1340 | 7 | 37,2 |
| DOW SW30HRLE | 56,75 | 13,6 | 99,5 | 4,41 | 3,09 | 200 | 200 | 1215 | 7 | 37,2 |
| NanoH ₂ O ISR6R | 58,71 | 20,3 | 99,5 | 4,54 | 3,18 | 119 | 190 | 900 | 7 | 37,2 |
| NanoH ₂ O 2SR5R | 59,33 | 20,3 | 99,5 | 4,59 | 3,21 | 114 | 182 | 900 | 7 | 37,2 |
| NanoH ₂ O 4SR2R1ES | 59,72 | 20,3 | 99,5 | 4,62 | 3,23 | 124 | 199 | 900 | 7 | 37,2 |
| NanoH ₂ O 3SR4R | 59,94 | 20,3 | 99,6 | 4,64 | 3,25 | 109 | 174 | 900 | 7 | 37,2 |
| NanoH ₂ O 5SR1R1ES | 60,34 | 20,3 | 99,5 | 4,67 | 3,27 | 119 | 191 | 900 | 7 | 37,2 |
| NanoH ₂ O 4SR3R | 60,69 | 20,3 | 99,6 | 4,69 | 3,28 | 104 | 166 | 900 | 7 | 37,2 |
| NanoH ₂ O 6SR1ES | 61,02 | 20,3 | 99,5 | 4,72 | 3,30 | 114 | 183 | 900 | 7 | 37,2 |
| NanoH ₂ O 5SR2R | 61,37 | 20,3 | 99,6 | 4,75 | 3,32 | 99 | 158 | 900 | 7 | 37,2 |
| DOW SW30HRLE | 61,16 | 17,3 | 99,6 | 4,75 | 3,33 | 160 | 160 | 1340 | 5 | 37,2 |
| NanoH ₂ O 6SR1R | 62,08 | 20,3 | 99,6 | 4,81 | 3,37 | 94 | 150 | 900 | 7 | 37,2 |
| DOW SW30HRLE | 62,05 | 20,3 | 99,7 | 4,82 | 3,37 | 136 | 136 | 900 | 7 | 37,2 |
| DOW SW30HRLE | 62,51 | 18,4 | 99,6 | 4,85 | 3,40 | 149 | 149 | 900 | 7 | 37,2 |
| NanoH ₂ O 7SR | 62,89 | 20,3 | 99,6 | 4,87 | 3,41 | 89 | 142 | 900 | 7 | 37,2 |

У циљу постизања већег степена корисности процеса, применом радних режима који су изнад препоручених вредности за појединачне мембранске материјале, довешће до стварања наслага у мембранама на нивоу целог постројења.

У циљу постизања захтеване вредности концентрације соли у пречишћеној води, коришћена је комбинација *NanoH₂O SR*, *R* и *ES* мембранских модула у софтверском прорачуну (напомиње се да *SR* мембране самостално задовољавају пројектне захтеве). Поређења ради, прорачуни су такође изведени за комерцијалне мембране (*DOW*), иако хибридни системи са *DOW* мембранама нису довољно истражени. Резултати прорачуна приказани су у табели 5.5, добијени из програмског пакета *Q⁺ - Projection software*.

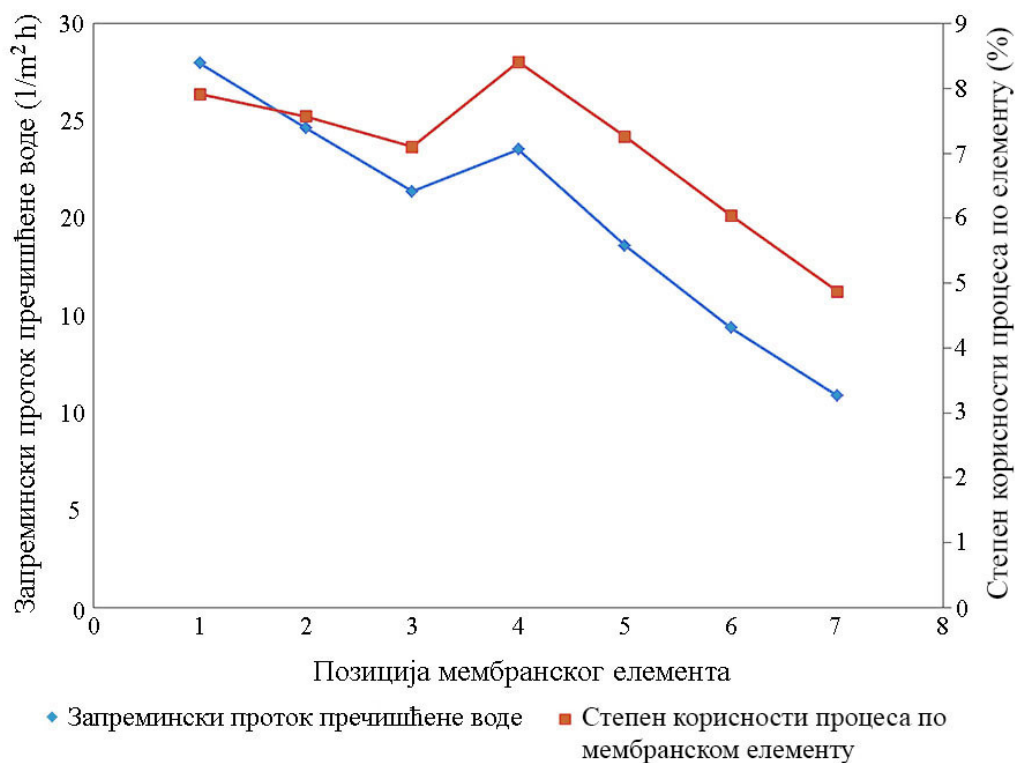
Из резултата прорачуна, најнижа специфична потрошња енергије остварена је коришћењем *DOW* мембранских модула; међутим, ово је једино остварљиво повећањем броја мембранских посуда под притиском и броја мембрана, што знатно повећава инвестиционе трошкове постројења. За постројење *SWRO* капацитета 100000 m³/дан, реалан број мембранских елемената износи око 6300. Симулирано постројење садржало би 900 мембранских посуда под притиском и 6300 мембранских елемента. Када су коришћене хибридне конфигурације *NanoH₂O* мембрана, остварен је веома добар квалитет пречишћене воде и потрошња енергије је била релативно ниска. Као што је наведено, резултати концентрације *TDS* пречишћене воде коришћењем *NanoH₂O* мембрана су кориговани за 60%, због доказане разлике између прорачуна и резултата добијених из експеримената. Прорачун хибридних конфигурација *NanoH₂O* мембрана указују на изузетно повољне резултате специфичне потрошње енергије. Поред тога, остварени квалитет пречишћене воде хибридних мембранских система задовољава захтеване услове. Због виших инвестиционих трошкова *NanoH₂O* мембранских модула, укупни инвестициони трошкови су већи. Међутим, уштеда у потрошњи енергије, у дужем временском периоду, допринеће мањој вредности укупних трошкова процеса одстрањивања соли из морске воде.

Коришћењем мембранског модула пречника 200 mm постигнут је бољи квалитет пречишћене воде услед побољшаног квалитета у производњи мембрана.

Поред постизања доброг квалитета пречишћене воде и ниске специфичне потрошње енергије, предност хибридног мембранског десалинizacionог система је

евидентна када се посматра расподела проласка воде кроз индивидуалне мембранске модуле, постављених по дужини мембранске посуде под притиском, слика 5.42.

Документовано је да у току процеса реверзибилне осмозе при високим вредностима протока воде кроз мембрану долази до бржег стварања наслага на мембранским површинама система *SWRO* [92],[93],[111],[112]. Према томе, способност хибридног система мембранских елемената да равномерно расподели проток воде кроз све мембранске елементе, може знатно смањити потенцијал стварања мембранских наслага читавог система *RO*. То ће довести до значајне уштеде у трошковима енергије, мањег повећања процесом потребне вредности трансмембранског притиска, ређих захтева за чишћење мембрана хемијским поступцима и дужег радног века мембране.



Слика 5.42. Запремински проток пречишћене воде и расподела степена корисности процеса по мембранским модулима по аксијалној дужини мембранских посуду

5.7.2 Индустијске и двопролазне конфигурације система *SWRO*

При процесима десалинизације морске воде у индустријској примени за процес пречишћавања воде у првом пролазу двопролазних система, не постоји ограничење у виду максималне концентрације растворених материја у пречишћеној води [113]. Међутим, висока концентрација соли у пречишћеној води након процеса првог пролаза, повећава оперативне трошкове система другог пролаза пречишћавања воде. Прорачун десалинизационог постројења *SWRO* морске воде капацитета 100000 m³/дан је приказан у табели 5.6. Резултати прорачуна указују да је најнижа специфична потрошња енергије остварена коришћењем *NanoH₂O ES* мембрана. Међутим, потребан је велики број мембранских модула (9380) и мембранских посуда под притиском (1340) док концентрација соли у пречишћеној води има знатно веће вредности у поређењу са другим конфигурацијама (609 mg/l).

Да би се искористила повољна својства високог протока пречишћене воде *NanoH₂O ES* мембрана, уз истовремено смањење величине постројења и инвестиционих трошкова и одржала ниска вредност специфичне потрошње енергије, коришћен је хибридни мембрански систем (комбинација *NanoH₂O SR, R* и *ES* мембрана). Укупан број мембрана (6300) и мембранских посуда под притиском (900) је значајно смањен. Ове конфигурације су биле у стању да смање ниво TDS пречишћене воде до приближно 300 mg/l, одржавајући специфичну потрошњу енергије релативно ниском (приближно 3 kWh/m³). Када се користе комерцијалне мембране *DOW SW30HRLE* у конфигурацији 900 посуда под притиском, постиже се најбољи квалитет пречишћене воде са већом специфичном потрошњом енергије (напомена: квалитет воде ове конфигурације је прихватљив за једнопролазни систем). Прорачуни су добијени из програмског пакета *Q⁺ - Projection software*.

Табела 5.6. Збирни резултати прорачуна двопротлазних система SWRO

| Мембранска конфигурација | Транс-мем-брански притисак (10^5Pa) | Запремин. проток преч. воде ($\text{l/m}^2\text{h}$) | Одстран-вање соли (%) | По-прошња енергије (kWh/m^3) | Погрошња енергије са ERD (kWh/m^3) | TDS преч. воде (mg/l) | Коригован TDS преч. воде (mg/l) | Број посуда под притиском | Број мембр. по посуди под притис. | Површ./Елемен. мембране (m^2) |
|--------------------------|---|--|-----------------------|---|---|----------------------------------|--|---------------------------|-----------------------------------|--|
| <i>NanoH2O ES</i> | 50,75 | 13,6 | 98,5 | 3,93 | 2,75 | 381 | 609 | 1340 | 7 | 37,2 |
| <i>DOW SW30 ULE</i> | 51,43 | 12,4 | 98,8 | 3,99 | 2,79 | 469 | 469 | 1340 | 7 | 40,9 |
| <i>DOW SW50ULE</i> | 52,32 | 13,6 | 98,9 | 4,07 | 2,85 | 428 | 428 | 1340 | 7 | 37,2 |
| <i>DOW SW30 ULE</i> | 52,82 | 15,7 | 99,1 | 4,10 | 2,87 | 374 | 374 | 1160 | 7 | 37,2 |
| <i>DOW SW30 ULE</i> | 52,95 | 15,8 | 99,1 | 4,11 | 2,88 | 373 | 373 | 1050 | 7 | 40,9 |
| <i>NanoH2O 2R5ES</i> | 55,02 | 20,3 | 99,1 | 4,26 | 2,98 | 219 | 351 | 900 | 7 | 37,2 |
| <i>NanoH2O ISR1R5ES</i> | 55,37 | 20,3 | 99,1 | 4,29 | 3,00 | 214 | 343 | 900 | 7 | 37,2 |
| <i>NanoH2O 3R4ES</i> | 55,57 | 20,3 | 99,2 | 4,30 | 3,01 | 201 | 322 | 900 | 7 | 37,2 |
| <i>DOW SW30HRLE</i> | 55,31 | 12,4 | 99,5 | 4,30 | 3,01 | 220 | 220 | 1340 | 7 | 40,9 |
| <i>NanoH2O ISR2R4ES</i> | 55,99 | 20,3 | 99,2 | 4,33 | 3,03 | 196 | 314 | 900 | 7 | 37,2 |
| <i>NanoH2O 2SR1R4ES</i> | 56,40 | 20,3 | 99,2 | 4,36 | 3,05 | 191 | 306 | 900 | 7 | 37,2 |
| <i>DOW SW30HRLE</i> | 62,05 | 20,3 | 99,7 | 4,82 | 3,37 | 136 | 136 | 900 | 7 | 37,2 |

Табела 5.7. Појединачни резултати прорачуна двопротлазних система SWRO по пролазима

| Мембранска конфигурација | Транс-мем-брански притисак (10^5Pa) | Запремин. проток преч. воде ($\text{l/m}^2\text{h}$) | Одстрањивање соли (%) | Потрошња енергије (kWh/m^3) | Потрошња енергије са ERD (kWh/m^3) | TDS преч. воде (mg/l) | Коригован TDS преч. воде (mg/l) | Број посуда под притиском | Број мембр. по посуди под притис. | Површ./Елемен. мембране (m^2) |
|--------------------------|---|--|-----------------------|--|---|----------------------------------|--|---------------------------|-----------------------------------|--|
| 1. пролаз | | | | | | | | | | |
| <i>NanoH2O ES</i> | 50,75 | 13,6 | 99,0 | 3,93 | 2,75 | 381 | 609 | 1340 | 7 | 37,2 |
| 2. пролаз | | | | | | | | | | |
| <i>CAPEX</i> | | | | | | | | | | |
| <i>DOW BW30</i> | 31,01 | 39,9 | | 1,02 | | 14,86 | | 280 | 7 | 40,9 |
| <i>DOW BW30</i> | 28,04 | 34,6 | | | | 38,89 | | 110 | 7 | 40,9 |
| <i>DOW BW30</i> | 25,73 | 25,0 | | | | 101,11 | | 30 | 7 | 40,9 |
| | | | Укупно | 4,95 | 3,77 | 24,78 | | | | |
| 1. пролаз | | | | | | | | | | |
| <i>DOW SW30ULE</i> | 51,42 | 12,4 | 98,8 | 3,99 | 2,79 | 469 | 469 | 1340 | 7 | 40,9 |
| 2. пролаз | | | | | | | | | | |
| <i>DOW BW30</i> | 17,10 | 40,8 | | 0,67 | | 9,54 | | 280 | 7 | 40,9 |
| <i>DOW BW30</i> | 14,19 | 30,9 | | | | 23,74 | | 90 | 7 | 40,9 |
| <i>DOW BW30</i> | 11,08 | 17,8 | | | | 53,90 | | 40 | 7 | 40,9 |
| | | | Укупно | 4,66 | 3,46 | 14,30 | | | | |

Прорачун другог пролаза воде система SWRO

Прегледом резултата прорачуна *NanoH₂O ES* елементи постигли су најнижу укупну потрошњу енергије. Међутим, *TDS* пречишћене воде имао је највише вредности. Да би истражили употребу високопроточних *NanoH₂O ES* мембранских елемената у двопролазним системима и анализирали ниво уштеде специфичне потрошње енергије, извршена је симулација са *NanoH₂O ES* мембранским елементима за први пролаз и симулација *DOW BW30-440i* мембранских модула (3 фазе, степен корисности процеса од 90%) за други пролаз. Са сврхом директног поређења резултата, изведена је додатна симулација коришћењем *DOW SW30ULE* мембранских елемената за први пролаз и *DOW BW30-440i* мембранских елемената (3 фазе, степен корисности процеса од 90%) за други пролаз.

Резултати симулације за сценарио у коме су коришћене *NanoH₂O ES* мембране у првом пролазу, показују да је за други пролаз потребно додатних 1,02 kWh/m³ специфичне потрошње енергије. Инвестициони трошкови двопролазног систем *RO* су \$ 5400000.

Поређења ради, када се први пролаз састоји од *DOW SW30ULE* мембрана, подсистем *RO* другог пролаза са *DOW* мембранским елементима захтева додатних 0,67 kWh/m³ специфичне потрошње енергије. Трошкови за овај двопролазни систем *RO* су \$ 4500000. Детаљи ових симулација су приказани у табели 5.7.

Иако употреба *NanoH₂O* мембрана у првом пролазу води нижој специфичној потрошњи енергије, виши *TDS* пречишћене воде резултирао је већом потрошњом енергије у другом пролазу. Сумирани резултати указују да је коришћење високопроточних *NanoH₂O ES* мембрана у двопролазном систему *SWRO* неисплативо са стране трошкова експлоатације и инвестиционих трошкова. Треба напоменути да су резултати симулационих прорачуна концентрације растворених материја пречишћене воде за *NanoH₂O*, кориговани на основу експерименталног истраживања коришћењем лабораторијске инсталације. Коришћењем мембранских модула пречника 200 mm постигнуте су боље вредности квалитета пречишћене воде услед побољшаног квалитета у производњи мембрана.

5.7.3 Прорачун инвестиционих трошкова процеса одстрањивања соли из морске воде

Због већих појединичних трошкова $NanoH_2O$ мембранских модула, укупни инвестициони трошкови за еквивалентну изградњу постројења, односно за исти број мембрана и посуда под притиском је око 1% већи него код постројења која користе комерцијалне *DOW* мембранске модуле, табела 5.8. Поред чињенице да су инвестициони трошкови изградње постројења већи, потрошња енергије може бити смањена приближно 5% у односу на упоредиви систем са *DOW SW30HRLE* са комерцијалним мембранама, табела 5.5, истовремено испуњавајући захтеве квалитета пречишћене воде.

Табела 5.8. Поређење инвестиционих трошкова система *SWRO* капацитета $100000 \text{ m}^3/\text{дан}$

| <i>NanoH₂O</i> | | <i>DOW</i> | |
|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| Број посуда под притиском | Инвестициони трошкови | Број посуда под притиском | Инвестициони трошкови |
| 900 | \$ 15,17 М | 900 | \$ 15,01 М |
| 1340 | \$ 21,71 М | 1340 | \$ 21,48 М |

5.8 Дискусија и закључци експерименталних истраживања

5.8.1 *QFX SW ES* мембрански модули

Експерименталним истраживањем унутар лабораторијске инсталације, показано је да *QFX SW 75 ES* мембрански модули обезбеђују смањену специфичну потрошњу енергије потребну за одвијање процеса. Систем *RO* који садржи 14 мембранских елемената *QFX SW 75 ES* показао је значајно нижу специфичну потрошњу енергије него код система *RO* са 10 мембранских елемената, као код система који користе друге комерцијално доступне мембране. Међутим, квалитет пречишћене воде био је деградиран. Квалитет пречишћене воде, коришћењем *QFX SW 75 ES* мембранских елемената је лошији у односу на комерцијалне мембране. Ова чињеница отежава применљивост мембранских модула *QFX SW 75 ES* у једнопролазним системима *RO*. Додатне симулације експерименталних истраживања су потврдиле да није реализована уштеда енергије када се ови модули користе у двопролазним системима *RO*, што резултира већим енергетским захтевима у операцијама другог пролаза и већу укупну специфичну

потрошњу енергије. Ове мембране су применљиве у процесима *RO* када морска вода има ниску вредност концентрације *TDS* или за индустријске примене, где захтеви квалитета пречишћене воде нису тако ригорозни.

Извршена су три одвојена поступка чишћења мембранских модула *QFX SW ES* хемијским растворима. Резултати хемијског процеса чишћења мембрана указују да су перформансе обновљивости пропустљивости мембрана биле лошије од очекиваних. Ови резултати су последица природе процеса стварања наслага материја, које захтевају коришћење ефикаснијих раствора у хемијским процесима чишћења мембрана. Хемијски раствори за чишћење мембрана, доступни у комерцијалном облику, показали су успешне резултате приликом испитивања *NanoH₂O* мембранских материјала.

5.8.2 *QFX SW R* мембрански модули

Експерименталним истраживањем унутар лабораторијске инсталације показано је да *QFX SW 75 R* модули обезбеђују радне перформансе упоредиве са комерцијалним мембранама. Није било значајнијег смањења у специфичној потрошњи енергије или повећања растворених материја пречишћене воде током посматраног процеса. Перформансе ових високопроточних мембрана су стабилне, чак и на већој концентрацији соли морске воде *TDS*. Степен одстрањивања соли остао је непромењен. Међутим, квалитет пречишћене воде постигнут током операције високе концентрације соли морске воде, био је изнад прихватљивих вредности. Ово указује да је примена ових високопроточних мембрана под претходно наведеним радним условима неостварива за пројектне захтеве квалитета пречишћене воде концентрације *TDS* испод 200 mg/l. Ове мембране могу бити коришћене у двопролазној конфигурацији или у индустријским применама где захтеви концентрације *TDS* пречишћене воде нису ригорозни. Поред тога, ове мембране су погодне за примену у системима у којима квалитет морске воде има просечну или нижу вредност концентрација *TDS* које су типичне за морску воду.

5.8.3 Хибридне мембранске конфигурације

На основу испитиваних појединачних мембранских модула изведен је закључак да испитивани *NanoH₂O* модули нису погодни за употребу у условима високе концентрације *TDS* морске воде. Пројектовањем развојног решења

хибридних мембранских система смањиле се укупна потрошња енергије, уз одржање високог квалитета пречишћене воде. *QFX SW 75 SR* мембрански модули нису били доступни за испитивање, коришћени су само у оквирима прорачуна. Хибридна мембранска конфигурација која садржи мембранске модуле типа *SR* и *R* показала је предности у погледу квалитета пречишћене воде и специфичне потрошње енергије. Употребом сва три мембранска модела остварује се равномерна расподела протока пречишћене воде, док је оперативно управљање системом изузетно компликовано.

Резултати експерименталног истраживања указују на непрецизност добијених резултата (програмског пакета *Q⁺ - Projection software*), који се односе на концентрацију *TDS* у пречишћеној води. Резултати програмског прорачуна су одступали од 40-60% у односу на експерименталне вредности.

5.8.4 Анализа трошкова процеса одстрањивања соли из морске воде

Цена високопроточних *NanoH₂O* мембранских модула већа је за 5-10% од цене комерцијалних мембранских модула (*DOW*). Међутим, трошкови мембрана незнатно утичу на укупне инвестиционе трошкове система *SWRO* (приближно 1%). У извесним ситуацијама, употреба ових високопроточних мембранских модула обезбеђује значајне предности, у виду уштеде енергије, које превазилазе додатне инвестиционе трошкове. *NanoH₂O* мембрански модули у прорачунима показују нижу специфичну потрошњу енергије, потребне за процес *RO*. У поређењу са комерцијалним мембранама *DOW*, концентрација растворених материја пречишћене воде захтева додатне експлоатационе трошкове подсистема за третман другог пролаза.

5.8.5 Препоруке

На основу резултата експерименталног истраживања применом лабораторијске инсталације и прорачуна изведен је закључак да високопроточне *NanoH₂O ES* и *R* мембране имају ограничену употребу када се независно користе. Ове мембране смањују специфичну потрошњу енергије (посебно *R* мембране), међутим, квалитет пречишћене воде је деградиран. Наведено ограничава њихову употребу само у оквиру индустријских система где захтеви *TDS* пречишћене воде

нису толико ригорозни, као и у десалинизационим системима у којима је концентрација растворених материја у морској води релативно ниска.

Високопроточни *NanoH₂O* мембрански модули се могу употребити и у десалинизационим системима са високим концентрацијама растворених материја у морској води. Ово се може постићи употребом хибридних мембранских модула у посудама под притиском укључујући *NanoH₂O SR* модуле мембрана (који због недоступности нису испитани у експерименталној инсталацији). Хибридни системи са *NanoH₂O* мембранама обезбеђују следеће предности: смањену специфичну потрошњу енергије, добар квалитет пречишћене воде и смањену могућност стварања наслага материја на површини мембрана (услед боље расподеле протока воде кроз индивидуалне мембранске модуле који су постављени по дужини у мембранској посуди под притиском).

6 ПОРЕЂЕЊЕ РЕЗУЛТАТА ТЕОРИЈСКИХ МОДЕЛА И РЕЗУЛТАТА ЕКСПЕРИМЕНТА

У циљу верификације теоријских модела, извршено је поређење резултата сопственог модела запреминског протока пречишћене воде са резултатима спроведеног сопственог експерименталног истраживања као и са моделима других аутора.

Приликом поређења сопствених експерименталних резултата са резултатима сопственог модела, као и приликом поређења сопствених експерименталних резултата са резултатима модела других аутора коришћене су две методе: математичко-статистичка и графо-аналитичка.

У првом делу анализе су упоређени резултати запреминског протока пречишћене воде добијени експериментом, са подацима добијеним из теоријских модела. У другом делу анализе стављен је акценат на анализу одступања резултата теоријских модела од резултата експеримента.

У експериментима су коришћене 3 различита мембранска модула:

- *Nano H₂O QFX SW 75 ES*,
- *QFX SW 75 R* и
- *DOW SW 30*.

Урађен је 61 експеримент са мембранским модулом *QFX SW 75 ES*, 28 експеримената са мембранским модулом *QFX SW 75 R* и 50 експеримената са мембранским модулом *DOW SW 30*, што је укупно 139 експеримената.

6.1 Дефинисање математичких модела и њихових параметара

Сопствени теоријски модел запреминског протока пречишћене воде изведен је из израза (3.8) и израза (3.22), коме су додате утицајне променљиве процеса реверзибилне осмозе, температура морске воде и степен одстрањивања соли из морске воде и има облик:

$$Q_{P\text{norm}} \frac{Q_P}{A_m} = \frac{L_p \cdot \Delta p}{1 + \frac{A_f \cdot R \cdot C_f}{\Delta p \cdot Y} \cdot \ln \left(\frac{1 - (A_f \cdot R \cdot C_f / \Delta p)}{1 - Y - (A_f \cdot R \cdot C_f / \Delta p)} \right)} \cdot B^{(T_o - 298)} \quad (6.1)$$

где су:

$Q_{p\text{norm}}$ - запремински проток пречишћене воде по јединици површине мембране, [m³/(m²·s)],

Δp - трансмембрански притисак, [Pa],

C_f - концентрација растворених материја у морској води, [g/l],

T_o - температура морске воде, [K],

Y - степен корисности процеса RO ,

A_m - активна површина мембране, [m²],

L_p - пропустљивост мембране, [m³/(m²·s·Pa)],

R - степен одстрањивања соли из морске воде,

A_f - коефицијент осмотског притиска морске воде, [Pa/g/l],

B_f - корекциони коефицијент температуре морске воде.

Поређење резултата сопствених истраживања извршено је и са математичким моделима других аутора. Избор модела за поређење извршен је тако да је анализом великог броја истраживања и модела других аутора, табела 2.3, сужен избор на она истраживања која се тичу мембранских модула сличних физичко-хемијских својстава пропустљивости и степена одстрањивања соли и сличних радних режима процеса реверзибине осмозе, табела 6.1, као и позитивног закључка о погодности коришћења одговарајућег модела. Одабрана су три у литератури најчешће примењивана модела запреминског протока пречишћене воде.

Табела 6.1. Преглед одабраних математичких модела других аутора за поређење са сопственим резултатима

| Назив модела | Модел | Литературни извор |
|-----------------------------|---|-------------------|
| <i>Mulder</i> | $Q_{p\text{nor}} = L_p \cdot (\Delta p - \sigma \cdot \Delta \pi)$ | [76] |
| <i>Taylor & Zhao</i> | $Q_{p\text{nor}} = L_p \cdot (\Delta p - \sigma \cdot \Delta \pi) \cdot \theta^{(T_o - 298)}$ | [94] |
| <i>Vakili & Nezhaad</i> | $Q_{p\text{nor}} = L_p \cdot \left(\Delta p - \sum_{s=1}^n \sigma_s \cdot \frac{R_s \cdot T_o}{m_s} R \cdot C_s \right)$ | [95] |

где су:

σ - коефицијент рефлексије мембране (представља карактеристику мембране),

θ - корекциони коефицијент температуре морске воде,

R_g - константа која износи $8314,15 \text{ J}\cdot\text{Pa}/(\text{mol}\cdot\text{K})$,

C_s - концентрација растворене материје у морској води, $[\text{g}/\text{l}]$,

m_s - моларна маса хемијског једињења, $[\text{g}/\text{mol}]$,

n - укупан број растворених материја у морској води.

Статистички критеријуми за поређење резултата су Пирсонов коефицијент линеарне корелације (r), аритметичка средина, стандардна девијација (Sd) и *Anova* (анализа варијансе) поновљених мерења. Поређење је извршено помоћу софтвера *SPSS Ver 20.0* (деталји дати у Прилогу 1) где су израчунате вредности статистичких показатеља квалитета оствареног поклапања.

Вредности варијабли трансмембранског притиска (Δp), температуре морске воде (T_f), концентрације растворених материја у морској води (C_f), степена корисности процеса (Y), степена одстрањивања соли из морске воде (R) и оствареног запреминског протока пречишћене воде по јединици површине мембране ($Q_{p\text{norm}}$) за сва 3 мембранска модула приказане су Прилогу 2. Вредности израчунатог запреминског протока пречишћене воде ($Q_{p\text{norm}}$) по јединици површине мембрана по сопственом теоријском моделу и теоријским моделима других аутора за варијабле експерименталних испитивања за све 3 мембране приказане су Прилогу 3.

6.2 Поређење експерименталних резултата са резултатима модела

У циљу верификације теоријског модела запреминског протока пречишћене воде $Q_{p\text{norm}} = f(\Delta p, T_f, C_f, Y, R)$ извршено је поређење резултата модела са сопственим експерименталним резултатима, коришћењем математичко-статистичке и графо-аналитичке методе. Статистичка анализа података је извршена кроз дескриптивне статистичке показатеље (Пирсонов коефицијент линеарне

корелације, аритметичка средина, стандардна девијација, апсолутно одступање) као и коришћењем статистичких техника за поређење групна-анализа варијансе поновљених мерења *Anova*.

Коришћени су следећи математичко-статистички показатељи:

1. Пирсонов (Pearson) коефицијент линеарне корелације (r) (скраћено од *eng. Coefficient of linear correlation*). То је величина чија вредност одређује корелациону везу посматраних променљивих ($-1 \leq r \leq 1$). Што је та вредност ближа јединици слагање је боље, а што је ближа нули слагање је лошије. Предзнак показује да ли је корелација позитивна (обе променљиве заједно и опадају и расту) или негативна (једна променљива расте када друга опада и обрнуто). Апсолутна вредност овог коефицијента показује јачину везе. Савршена корелација, која износи $r = 1$ или $r = -1$ показује да се вредност једне променљиве може тачно утврдити када знамо вредност друге променљиве. Дијаграм растурања који илуструје такву везу права је линија. Са друге стране када коефицијент корелације има вредност $r = 0$ показује да између променљивих не постоји никаква веза [96].
2. Стандардно одступање (Sd) (скраћено од *eng. Standard deviation*), означава меру дисперзије података у основном скупу. Оно говори колико резултати одступају од аритметичке средине [96].
3. *Anova* – анализа варијансе (Sig) (скраћено од *eng. Analysis of variance*), је аналитички модел за испитивање значајности разлике и користи се када имамо више од две групе испитаника. Предност ове методе се огледа у томе што у модел улазе у обзир сви варијабилитети, као и њихов међусобни утицај, што је немогуће проценити на други начин. Код ове методе сваки субјект се мери по два или више пута односно на истој непрекидној скали у три или више наврата. Уколико је вредност коефицијента $Sig > 0,05$ сматра се да је теоријски модел статистички значајно не разликује од експерименталног модела и да је статистички валидан.

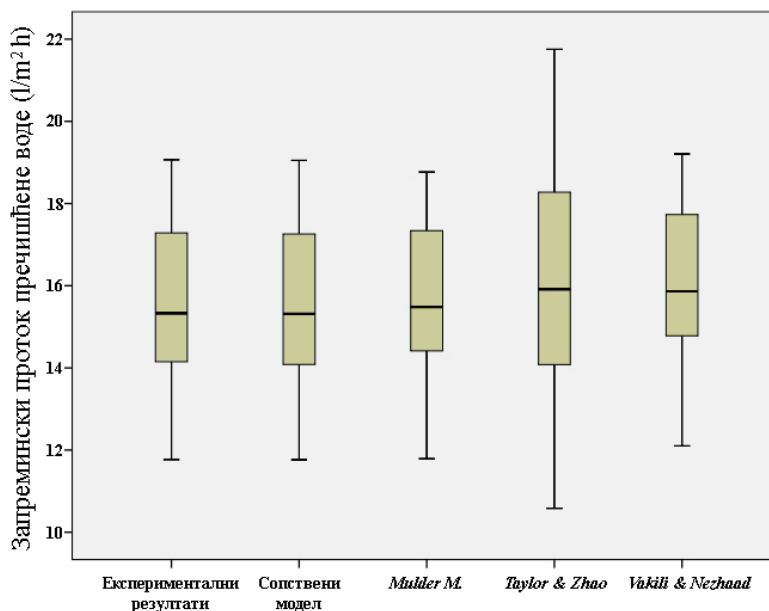
У табели 6.2 приказана је упоредна минимална вредност, максимална вредност као и аритметичка средина стандардног одступања и коефицијент

варијације запреминског протока пречишћене воде података експерименталних резултата, сопственог теоријског модела као и теоријских модела других аутора за све 3 мембране. На основу добијених показатеља аритметичке средине може се закључити да је просечна вредност резултата сопственог теоријског модела, која износи $m = 15,592$, најмање одступа од просечне вредности резултата добијених у експерименту која износи $m = 15,567$, са идентичним стандардним одступањем од $Sd = 1,862$, као мером варијабилитета. Просечна вредност показатеља теоријских модела других аутора разликује се нешто више од просечне вредности експерименталних резултата и то најмање код теоријског модела *Mulder*-а ($m = 15,832$; $Sd = 1,738$) затим *Vakili-Nezhaad* ($m = 16,218$; $Sd = 1,762$) и *Taylor & Zhao* ($m = 16,220$; $Sd = 2,440$).

Табела 6.2. Упоредни приказ аритметичке средине, стандардног одступања и коефицијента варијације, за експериментални, сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за све 3 мембране

| Запремински проток пречишћене воде (l/m^2h) | Број експерименталних | Min | Max | Аритметичка средина | Стандардно одступање | Коефицијент варијације у % |
|---|-----------------------|--------|--------|---------------------|----------------------|----------------------------|
| Експеримент | 139 | 11,769 | 19,065 | 15,567 | 1,862 | 11,962 |
| Сопствени теоријски модел | 139 | 11,764 | 19,050 | 15,592 | 1,862 | 11,941 |
| Теоријски модел аутора <i>Mulder</i> | 139 | 11,789 | 18,766 | 15,832 | 1,738 | 10,977 |
| Теоријски модел аутора <i>Taylor & Zhao</i> | 139 | 10,582 | 21,755 | 16,220 | 2,440 | 15,042 |
| Теоријски модел аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> | 139 | 12,104 | 19,207 | 16,218 | 1,762 | 10,863 |

Када је реч о варијацији добијених показатеља варијабилитет исказан коефицијентом варијације је најближи код сопственог теоријског модела (11,941), а затим код *Mulder*-а (10,977) и *Vakili-Nezhaad* (10,863), *Taylor & Zhao* (15,042). Наведени показатељи су графички приказани на слици 6.1.



Слика 6.1. Упоредни приказ аритметичке средине, стандардног одступања и коефицијента варијације, за експериментални, сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за све 3 мембране

С обзиром да су у експерименту коришћена 3 различита мембранска модула (*Nano H₂O QFX SW 75 ES*, *QFX SW 75 R* и *DOW SW 30*) наведени показатељи дескриптивне статистике се могу приказати по појединачним мембранама.

У табели 6.3 приказани су упоредни дескриптивни показатељи за мембрански модул *QFX SW 75 ES*. На основу добијених показатеља аритметичке средине можемо закључити да је просечна вредност резултата сопственог теоријског модела која износи $m = 15,388$ најближа просечној вредности резултата добијеним у експерименту која износи $m = 15,316$, са стандардним одступањем од $Sd = 1,710$ као мером варијабилитета. Просечна вредност показатеља теоријских модела других аутора се разликује нешто више од просечне вредности експерименталних резултата и то најмање код теоријског модела *Mulder*-а ($m = 15,694$; $Sd = 1,648$) затим *Taylor & Zhao* ($m = 15,806$; $Sd = 2,036$) и *Vakili-Nezhaad* ($m = 16,099$; $Sd = 1,676$). Када је реч о варијабилитету добијених показатеља варијабилитет исказан коефицијентом варијације је најближи код сопственог теоријског модела (11,116), а затим код *Mulder*-а (10,505), *Vakili-*

Nezhaad (10,416), *Taylor & Zhao* (12,866). Наведени показатељи су графички приказани на слици 6.2.а.

Табела 6.3. Упоредни приказ аритметичке средине, стандардног одступања и коефицијента варијације, за експериментални, сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за мембрану *QFX SW 75 ES*

| Запремински проток пречишћене воде l/m ² h | Број експеримената | Min | Max | Аритметичка средина | Стандардно одступање | Коефицијент варијације у % |
|---|--------------------|-------|-------|---------------------|----------------------|----------------------------|
| Експеримент | 61 | 11,77 | 19,07 | 15,316 | 1,702 | 11,115 |
| Сопствени теоријски модел | 61 | 11,76 | 19,05 | 15,388 | 1,710 | 11,116 |
| Теоријски модел аутора <i>Mulder</i> | 61 | 11,79 | 18,77 | 15,694 | 1,648 | 10,505 |
| Теоријски модел аутора <i>Taylor & Zhao</i> | 61 | 10,58 | 20,45 | 15,806 | 2,036 | 12,886 |
| Теоријски модел аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> | 61 | 12,10 | 19,21 | 16,099 | 1,676 | 10,416 |

У табели 6.4 приказани су упоредни дескриптивни показатељи за мембрански модул *QFX SW 75 R*. На основу добијених показатеља аритметичке средине може се закључити да је просечна вредност резултата сопственог теоријског модела која износи $m = 13,493$ најближа просечној вредности резултата добијеним у експерименту која износи $m = 13,499$, са стандардним одступањем од $Sd = 0,452$, као мером варијабилитета. Просечна вредност показатеља теоријских модела других аутора разликује нешто више од просечне вредности експерименталних резултата и то најмање код теоријског модела *Taylor & Zhao* ($m = 13,492$; $Sd = 0,725$), *Mulder*-а ($m = 13,872$; $Sd = 0,402$) затим *Vakili-Nezhaad* ($m = 14,216$; $Sd = 0,407$). Када је реч о варијабилитету добијених показатеља, варијабилитет исказан коефицијентом варијације је најближи код сопственог теоријског модела (3,347), а затим код *Mulder*-а (2,900), *Vakili-Nezhaad* (2,865), *Taylor & Zhao* (5,375). Наведени показатељи су графички приказани на слици 6.2.б.

Табела 6.4. Упоредни приказ аритметичке средине, стандардног одступања и коефицијента варијације, за експериментални, сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за мембрану *QFX SW 75 R*

| Запремински проток пречишћене воде l/m^2h | Број експеримената | Min | Max | Аритметичка средина | Стандардно одступање | Коефицијент варијације у % |
|---|--------------------|-------|-------|---------------------|----------------------|----------------------------|
| Експеримент | 28 | 13,01 | 14,77 | 13,499 | 0,450 | 3,332 |
| Сопствени теоријски модел | 28 | 12,96 | 14,78 | 13,493 | 0,452 | 3,347 |
| Теоријски модел аутора <i>Mulder</i> | 28 | 13,41 | 14,87 | 13,872 | 0,402 | 2,900 |
| Теоријски модел аутора <i>Taylor & Zhao</i> | 28 | 12,40 | 15,67 | 13,492 | 0,725 | 5,375 |
| Теоријски модел аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> | 28 | 13,74 | 15,23 | 14,216 | 0,407 | 2,865 |

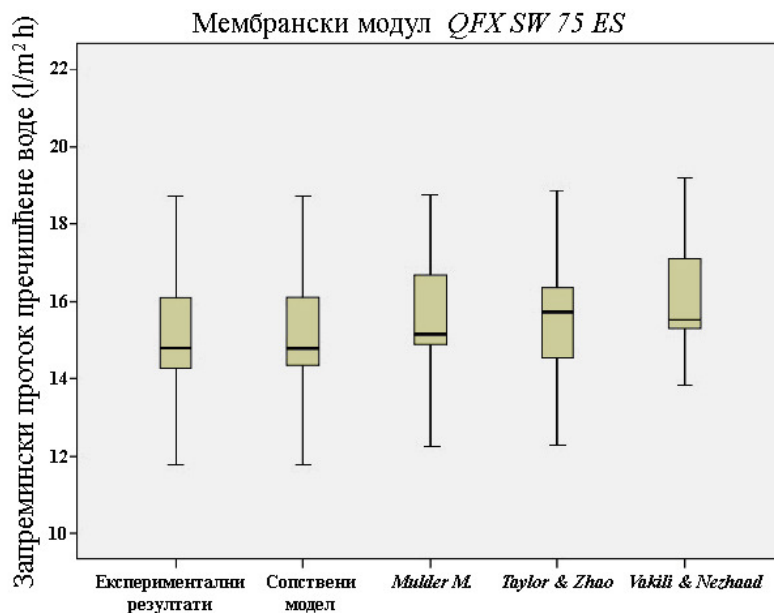
У табели 6.5 приказани су упоредни дескриптивни показатељи за мембрански модул *DOW SW 30*. На основу добијених показатеља аритметичке средине може се закључити да је просечна вредност резултата сопственог теоријског модела која износи $m = 17,016$ најближа просечној вредности резултата добијеним у експерименту која износи $m = 17,031$, са стандардним одступањем од $Sd = 1,195$ као мером варијабилитета. Просечна вредност показатеља теоријских модела других аутора разликује се нешто више од просечне вредности експерименталних резултата и то најмање код теоријског модела *Mulder*-а ($m = 17,096$; $Sd = 1,113$), затим *Vakili-Nezhaad* ($m = 17,483$; $Sd = 1,125$), *Taylor & Zhao* ($m = 18,252$; $m = 1,650$).

Када је реч о варијабилитету добијених показатеља, варијабилитет исказан коефицијентом варијације је најближи код сопственог теоријског модела (7,020), а затим код *Mulder*-а (6,509), *Vakili-Nezhaad* (6,437), *Taylor & Zhao* (9,036). Наведени показатељи су графички приказани на слици 6.2.в. Даље у анализи посматрана је вредност сваког појединачног експеримента и одступања сваког теоријског модела од експерименталних резултата.

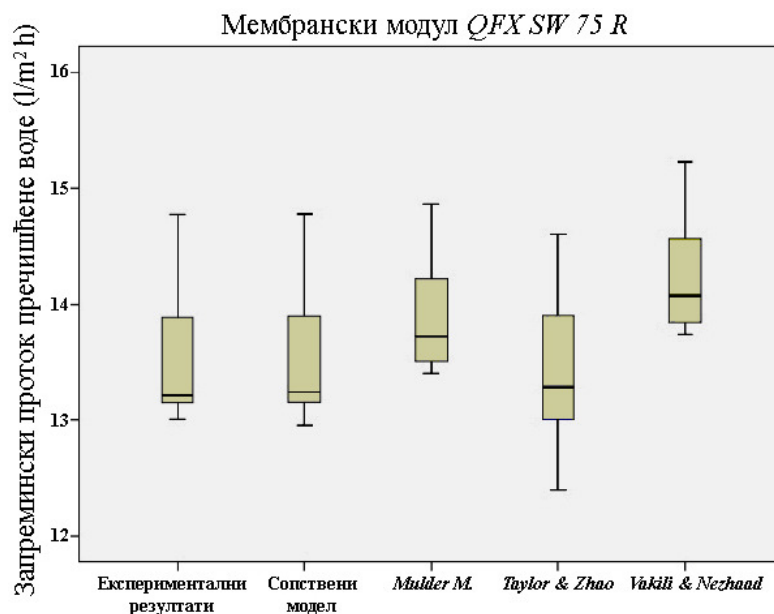
Табела 6.5. Упоредни приказ аритметичке средине, стандардног одступања и коефицијента варијације, за експериментални, сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за мембрану *DOW SW 30*

| Запремински проток пречишћене воде l/m ² h | Број експримената | Min | Max | Аритметичка средина | Стандардно одступање | Коефицијент варијације у % |
|---|-------------------|-------|-------|---------------------|----------------------|----------------------------|
| Експеримент | 50 | 13,15 | 18,79 | 17,031 | 1,182 | 6,940 |
| Сопствени теоријски модел | 50 | 13,01 | 18,74 | 17,016 | 1,195 | 7,020 |
| Теоријски модел аутора <i>Mulder</i> | 50 | 12,81 | 18,30 | 17,096 | 1,113 | 6,509 |
| Теоријски модел аутора <i>Taylor & Zhao</i> | 50 | 15,39 | 21,76 | 18,252 | 1,650 | 9,036 |
| Теоријски модел аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> | 50 | 13,11 | 18,69 | 17,483 | 1,125 | 6,437 |

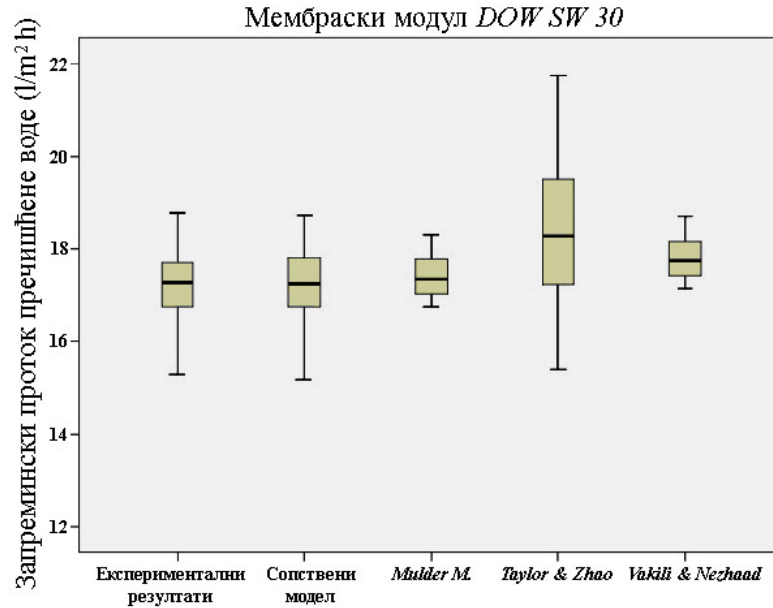
На слици 6.5 а/б/в/г приказана су одступања за сваки од 138 експримената, све 3 мембране, за сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора.



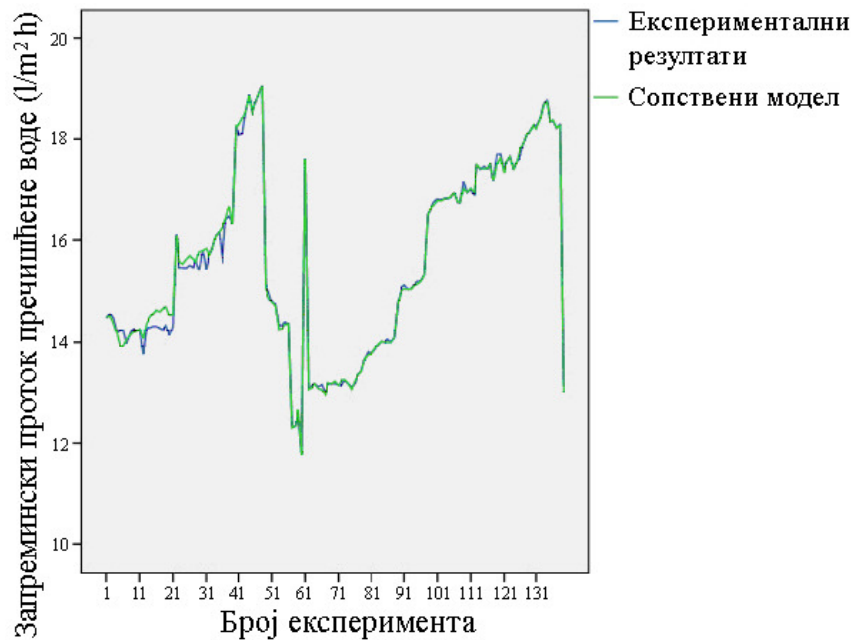
Слика 6.2.а. Упоредни приказ аритметичке средине, стандардног одступања и коефицијента варијације, за експериментални, сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за мембрану *QFX SW 75 ES*



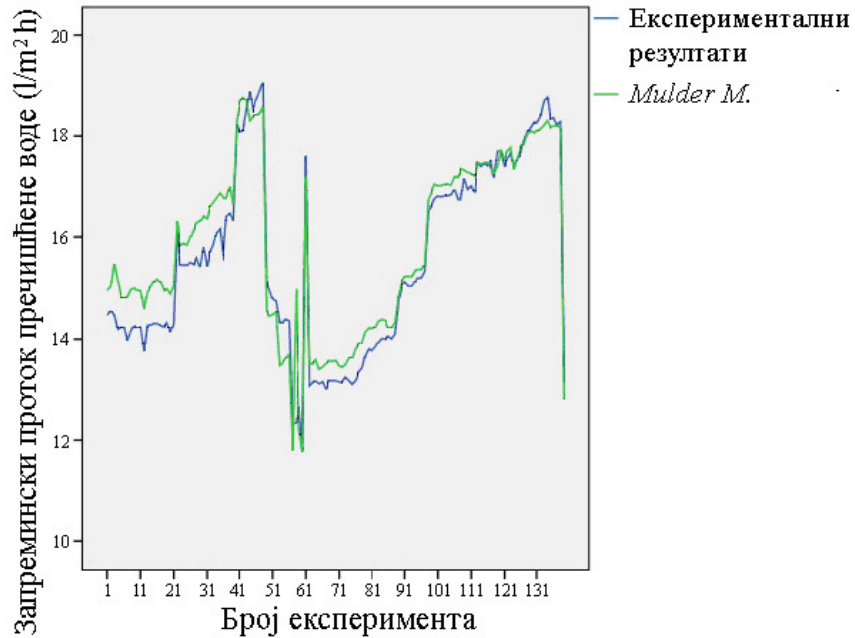
Слика 6.2.б. Упоредни приказ аритметичке средине, стандардног одступања и коефицијента варијације, за експериментални, сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за мембрану *QFX SW 75 R*



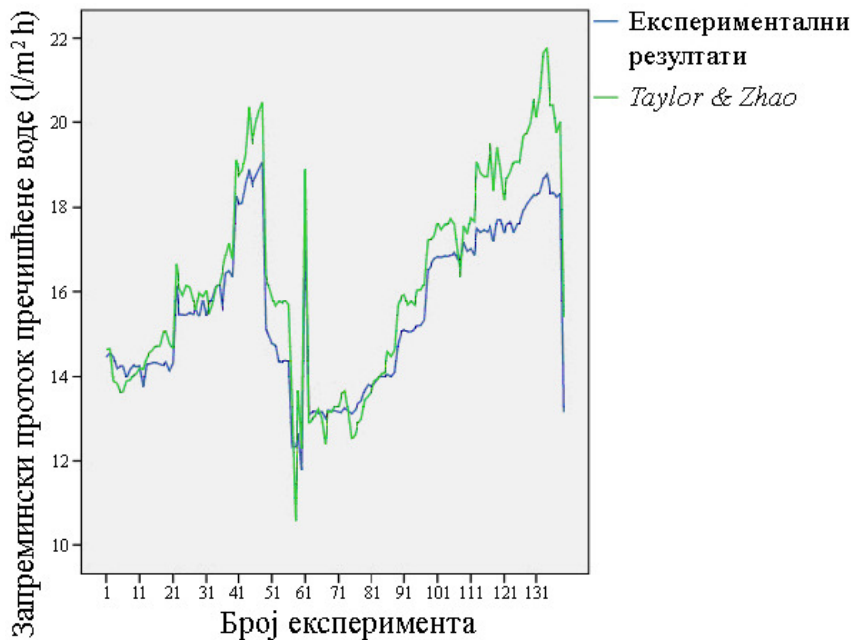
Слика 6.2.в. Упоредни приказ аритметичке средине, стандардног одступања и коефицијента варијације, за експериментални, сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за мембрану *DOW SW 30*



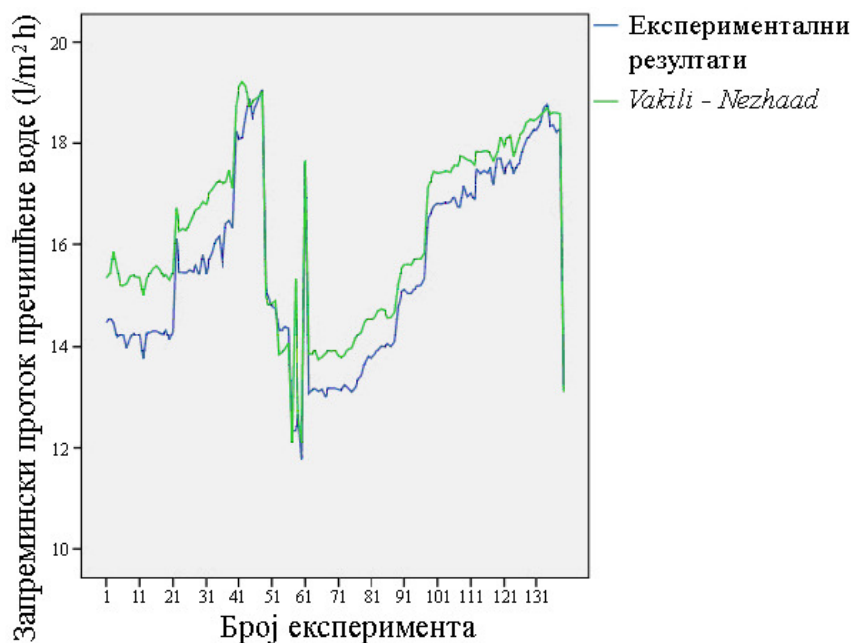
Слика 6.3.а. Упоредни приказ одступања сопственог теоријског модела од експерименталних резултата за сваки појединачни експеримент за све 3 мембране



Слика 6.3.б. Упоредни приказ одступања теоријског модела аутора *Mulder* од експерименталних резултата за сваки појединачни експеримент за све 3 мембране



Слика 6.3.в. Упоредни приказ одступања теоријског модела аутора *Taylor & Zhao* од експерименталних резултата за сваки појединачни експеримент за све 3 мембране



Слика 6.3.г. Упоредни приказ одступања теоријског модела аутора Vakili-Nazhaad од експерименталних резултата за сваки појединачни експеримент за све 3 мембране

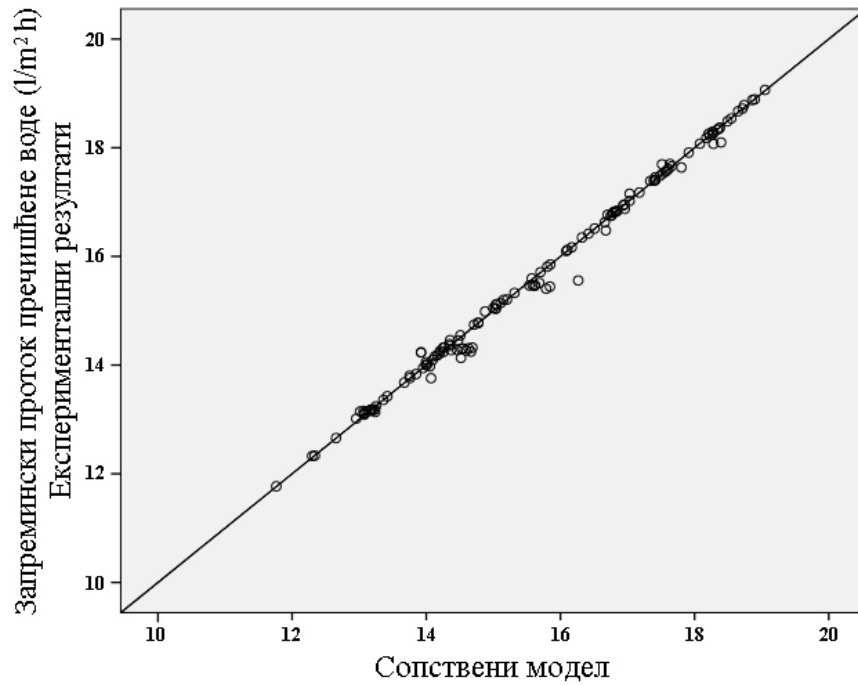
На дијаграмима, слика 6.3 а/б/в/г, зеленом бојом су приказани експериментални резултати оствареног запреминског протока пречишћене воде, док су плавом бојом приказани резултати запреминског протока пречишћене воде теоријских модела. Са ових дијаграма се може закључити да резултати сопственог теоријског модела имају највеће поклапање са линијом експерименталних резултата. Такође, ови дијаграми су дати и по мембранама посебно, а приказани су у Прилогу 4. На дијаграмима по мембранама може се донети идентичан закључак као и у збирном дијаграму свих експеримената. Наиме, дијаграми израђени по мембранама представљају само подељену слику збирних експеримената. За мембрански модул *QFX SW 75 ES* сопствени теоријски модел има највеће поклапање са линијом експерименталних резултата, затим теоријски модели *Taylor & Zhao*, *Mulder* и *Vakili-Nezhaad*. За други мембрански модул *QFX SW 75 R*, сопствени теоријски модел има највеће поклапање са линијом експерименталних резултата, затим теоријски модели *Taylor & Zhao*, *Mulder* и *Vakili-Nezhaad*. Код трећег мембранског модула *DOW SW 30* сопствени теоријски модел има највеће поклапање са линијом експерименталних резултата, затим теоријски модели *Mulder*, *Vakili-Nezhaad* и *Taylor & Zhao*.

Такође у циљу квантитативног слагања експерименталних резултата са теоријским моделима израчунати су Пирсонови коефицијенти. У приказаној корелационој матрици, табела 6.6, анализиран је Пирсонов коефицијент, с обзиром да он показује квантитативно слагање експерименталних података са теоријским моделима. Из претходно наведене табеле видимо да су сви показатељи тј. сви коефицијенти просте Пирсонове линеарне корелације врло значајни ($p < 0,001$), али да је највећа вредност код сопственог теоријског модела и износи $r = 0,998$, а затим код теоријског модела аутора *Taylor & Zhao* $r = 0,972$, *Mulder* $r = 0,969$ и *Vakili-Nezhaad* $r = 0,968$. Анализа квантитативног слагања теоријских модела међусобно није значајна за ову анализу. Наведени резултати о степену квантитативних слагања теоријских модела и експерименталних резултата приказани су дијаграмима на слици 6.4. Међусобно одступање се визуелно манифестује непклапањем вредности дијаграма са правом $y = x$ (дијагонала). Резултати теоријских модела који одговарају експерименталним резултатима налазе се на дијагонали. Најмања одступања од експерименталних резултата се уочавају код сопственог теоријског модела. Дијаграми одступања теоријских модела од експерименталних резултата за појединачне мембране дати су у Прилогу 5. На основу њих се могу извести идентични закључци.

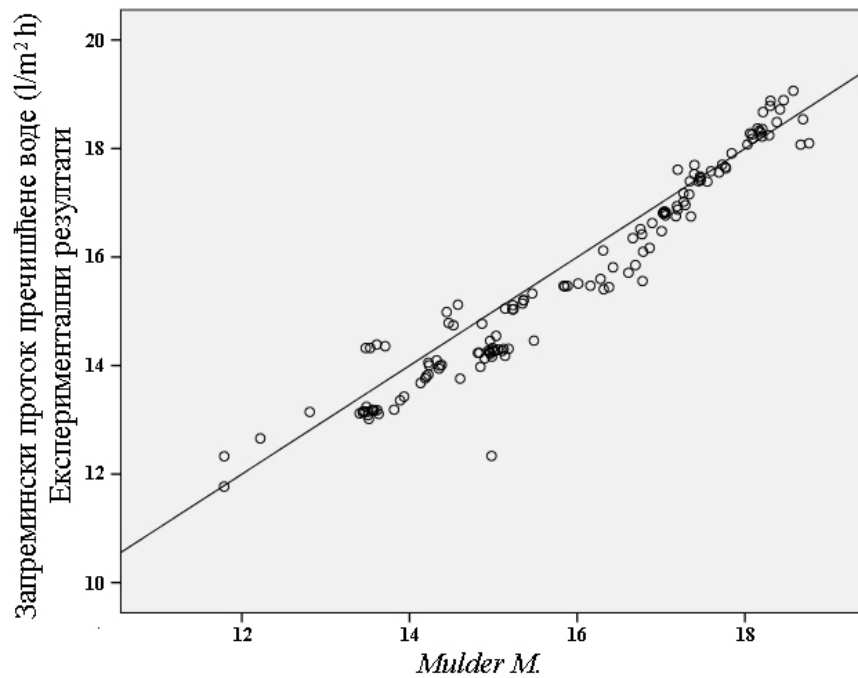
Даље, у анализи су израчуната одступања теоријских модела од експерименталних резултата. Наведена одступања приказана су у табели 3.а/б/в/г, Прилог 6. Ради лакшег визуелног тумачења ове табеле су приказане у виду хистограма слика 9.д/ђ/е/ж у Прилогу 7. На слици 9.а/б/в/г резултати сопственог теоријског модела приказани су плавом линијом и они су најближи апсциси која представља нулто одступање, док резултати теоријских модела осталих аутора одступају у нешто већој мери од експерименталних резултата. Идентичан закључак може се донети и за све 3 мембране чији су дијаграми приказани сликом 2.а/б, в у Прилогу 4. С обзиром да извршен део резултата у теоријском моделу показује ниже вредности од резултата добијеним експериментом, док са друге стране и извршен део резултата у теоријском моделу показује више вредности од резултата добијеним експериментом, израчунате су апсолутне вредности одступања и извршена је њихова анализа.

Табела 6.6. Упоредни приказ Пирсонових коефицијента просте линеарне корелације, за сопствени теоријски модел и теоријске моделе других аутора за све 3 мембране

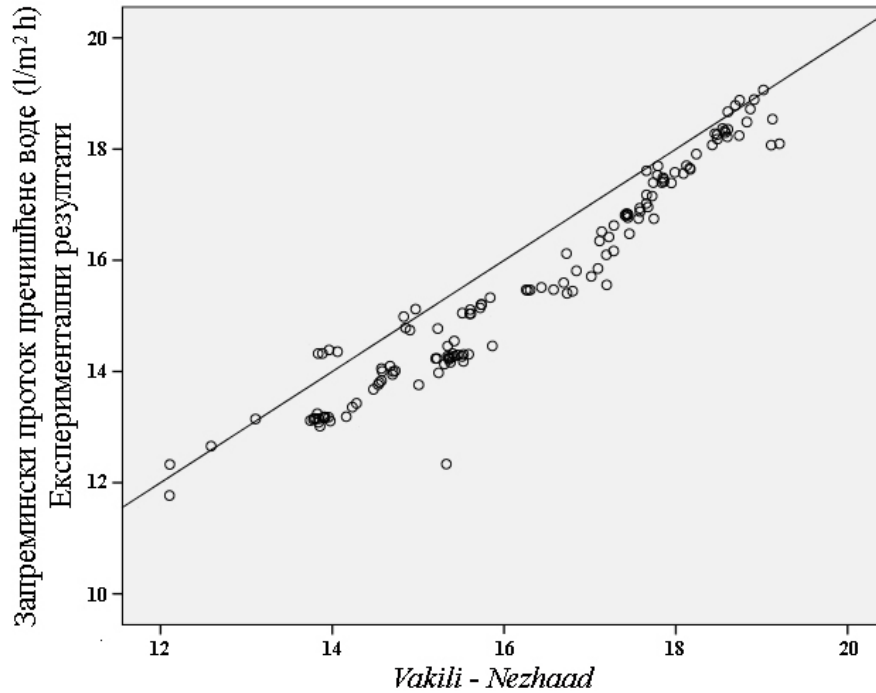
| Запремински проток пречишћене воде l/m^2h | | Експеримент | Сопствени теоријски модел | Теоријски модел аутора <i>Mulder</i> | Теоријски модел аутора <i>Taylor & Zhao</i> | Теоријски модел аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> |
|---|---------------------------|-------------|---------------------------|--------------------------------------|---|--|
| Експеримент | Пирсонов коефицијент | 1,000 | 0,998** | 0,969** | 0,972** | 0,968** |
| | Значајност p | / | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | Број експеримената | 139 | 139 | 139 | 139 | 139 |
| Сопствени теоријски модел | Пирсонов коефицијент, r | 0,998** | 1,000 | 0,974** | 0,970** | 0,974** |
| | Значајност p | 0,000 | / | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | Број експеримената | 139 | 139 | 139 | 139 | 139 |
| Теоријски модел аутора <i>Mulder</i> | Пирсонов коефицијент, r | 0,969** | 0,974** | 1,000 | 0,900** | 1,000** |
| | Значајност p | 0,000 | 0,000 | / | 0,000 | 0,000 |
| | Број експеримената | 139 | 139 | 139 | 139 | 139 |
| Теоријски модел аутора <i>Taylor & Zhao</i> | Пирсонов коефицијент | 0,972** | 0,970** | 0,900** | 1,000 | 0,899** |
| | Значајност $Sig.$ | 0,000 | 0,000 | 0,000 | / | 0,000 |
| | Број експеримената | 139 | 139 | 139 | 139 | 139 |
| Теоријски модел аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> | Пирсонов коефицијент, r | 0,968** | 0,974** | 1,000** | 0,899** | 1,000 |
| | Значајност p | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | / |
| | Број експеримената | 139 | 139 | 139 | 139 | 139 |



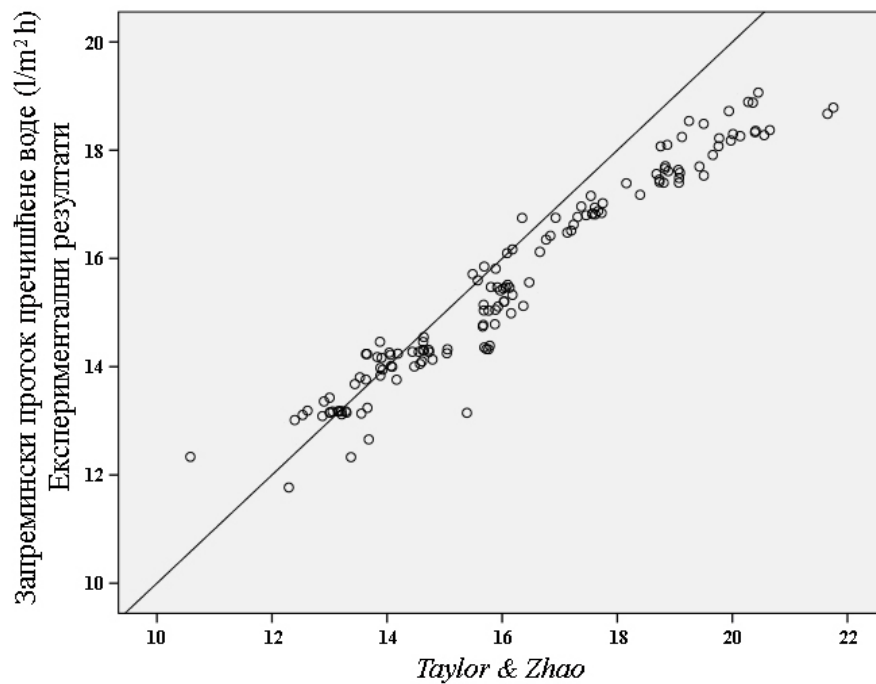
Слика 6.4.а. Графички приказ одступања резултата сопственог теоријског модела од експерименталних резултата за сваки појединачни експеримент за све 3 мембране



Слика 6.4.б. Графички приказ одступања теоријског модела аутора *Mulder* од експерименталних резултата за сваки појединачни експеримент за све 3 мембране



Слика 6.4.в. Графички приказ одступања теоријског модела аутора Vakili-Nazhaad од експерименталних резултата за сваки појединачни експеримент за све 3 мембране



Слика 6.4.г. Графички приказ одступања теоријског модела аутора Taylor & Zhao од експерименталних резултата за сваки појединачни експеримент за све 3 мембране

Табела 6.7. Израчуната збирна апсолутна одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока прецишћене воде за све мембранске модуле *QFX SW 75 ES*, *QFX SW 75 R* и *DOW SW 30*

| Дескриптивна статистика апсолутних одступања за мембранске модуле <i>QFX SW 75 ES</i> , <i>QFX SW 75 R</i> и <i>DOW SW 30</i> | | | | | |
|---|--------------------|---------|----------|-----------------|----------------------|
| | Број експеримената | Минимум | Максимум | Средња вредност | Стандардно одступање |
| Апсолутна одступања резултата сопственог модела од експерименталних резултата | 139 | 0,00 | 0,71 | 0,0686 | 0,11285 |
| Апсолутна одступања резултата модела аутора <i>Mulder</i> од експерименталних резултата | 139 | 0,01 | 2,64 | 0,4233 | 0,32634 |
| Апсолутна одступања резултата модела аутора <i>Taylor & Zhao</i> од експерим. резултата | 139 | 0,01 | 2,98 | 0,7891 | 0,62526 |
| Апсолутна одступања резултата модела аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> од експер. резултата | 139 | 0,02 | 2,99 | 0,6884 | 0,40944 |
| Укупан број експеримената | 139 | | | | |

На основу добијених резултата *Anova* (анализа варијансе) приказаним у табели 6.8 и коефицијента значајности сопственог модела $Sig = 0,240 > 0,05$, закључујемо да се теоријски модел статистички значајно не разликује од експерименталних резултата и да је статистички валидан. По овој методи анализе варијанси *Anova*, теоријски модели аутора *Mulder*, *Taylor & Zhao* и *Vakili-Nezhaad* имају вредност коефицијента $Sig < 0,05$ и у статистичком смислу се значајно разликују од експерименталних резултата.

Табела 6.8. Упоредни приказ средње разлике, стандардне грешке, коефицијента значајности теоријских модела према експерименталним резултатима за све 3 мембране по методи анализе варијанси *Anova*

| Фактор | | Средње разлике (I-J) | Стандардна грешка | Значајност P | 95% Интервал поверења разлике | |
|---------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------|----------------|-------------------------------|---------------|
| | | | | | Доња граница | Горња граница |
| Експериментални резултати | Сопствени модел | -0,025 | 0,011 | 0,240 | -0,057 | 0,006 |
| | <i>Mulder</i> | -0,265* | 0,039 | 0,000 | -0,377 | -0,152 |
| | <i>Taylor & Zhao</i> | -0,653* | 0,065 | 0,000 | -0,839 | -0,467 |
| | <i>Vakili-Nezhaad</i> | -0,651* | 0,040 | 0,000 | -0,764 | -0,538 |

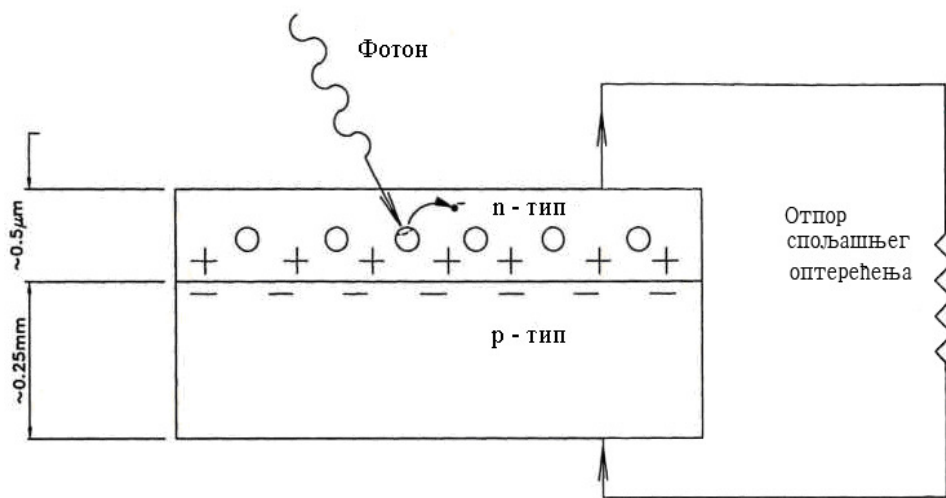
7 АСПЕКТИ ИНТЕГРАЦИЈЕ ОБНОВЉИВОГ ИЗВОРА СОЛАРНЕ ЕНЕРГИЈЕ СА ДЕСАЛИНИЗАЦИОНИМ СИСТЕМОМ РЕВЕРЗИБИЛНЕ ОСМОЗЕ ВОДЕ

7.1 Фотонапонски ефекат

Када валентни електрон апсорбује фотон светлости, енергија електрона постаје увећана за износ енергије фотона. Ако је енергија фотона једнака или већа од енергије у међупростору полупроводника, електрон са вишком енергије ће прећи у кондукциони простор, где се може слободно кретати. Ако је енергија фотона мања од енергије у међупростору полупроводника, електрон неће имати довољну енергију да пређе у кондукциони простор. У овом случају, вишак енергије електрона се конвертује у кинетичку енергију електрона, што се манифестује повећањем температуре. Ако апсорбован фотон има више енергије од оне која је потребна за прелаз у кондукциони простор, након преласка повећаће се кинетичка енергија електрона. Потребно је напоменути да фотон може ослободити само један електрон чак иако је енергија фотона много већа од енергије у међупростору полупроводника. Ова чињеница представља разлог слабије ефикасности фотонапонских уређаја. Решење за коришћење фотонапонског ефекта за генерисање корисне снаге, је у одвођењу слободних електрона применом спољњег електричног отпора. Ово се постиже помоћу p - n споја.

На слици 7.1 шематски је приказана фотонапонска ћелија. Пошто слободни електрони настају у n слоју деловањем фотона, они могу да прођу кроз спољашње струјно коло или се рекомбинују у позитивном делу у попречном правцу или помере ка p слоју. Негативно наелектрисање у p слоју p - n споја ограничава њихово кретање у том правцу. Ако је n слој изузетно танак, кретање електрона, и стога вероватноћа рекомбинације унутар n слоја је увелико смањена, осим ако је спољашње струјно коло отворено. Када је спољашње струјно коло отворено,

електрони генерисани деловањем фотона се рекомбинују унутар делова уређаја, што доводи до повећања температуре самог уређаја.



Слика 7.1. Шематски приказ фотонапонске ћелије [97]

У типичној кристалној силицијумској ћелији, n слој је дебљине око $0,5 \mu\text{m}$ док је p слој дебљине око $0,25 \text{ mm}$. Енергија садржана у фотону E_p је дата следећим изразом:

$$E_p = h\nu \quad (7.1)$$

где су:

h - Планкова константа, $6,625 \cdot 10^{-34} [J \cdot s]$,

ν - фреквенција која представља однос између брзине светлости c и таласне дужине λ , дефинисана је следећим изразом:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (7.2)$$

Тако да је:

$$E_p = \frac{hc}{\lambda} \quad (7.3)$$

За силицијум разлика енергије између проводне и валентне зоне износи $1,11 \text{ eV}$. Фотони Сунчевог зрачења таласне дужине $1,12 \mu\text{m}$ или мање, корисни су за рад фотонапонске ћелије [97]. Овај спектар представља највећи део Сунчевог зрачења.

Табела 7.1. Нивои енергије електрона за материјале фотонапонских ћелија [97]

| Материјал | Разлика енергије између проводне и валентне зоне (eV) | Материјал | Разлика енергије између проводне и валентне зоне (eV) |
|---------------------|---|---------------------------------|---|
| Si | 1,11 | CuInTe ₂ | 0,90 |
| SiC | 2,60 | InP | 1,27 |
| CdAs ₂ | 1,00 | In ₂ Te ₃ | 1,20 |
| CdTe | 1,44 | In ₂ O ₃ | 2,80 |
| CdSe | 1,74 | Zn ₃ P ₂ | 1,60 |
| CdS | 2,42 | ZnTe | 2,20 |
| CdSnO ₄ | 2,90 | ZnSe | 2,60 |
| GaAs | 1,40 | AlP | 2,43 |
| GaP | 2,24 | AlSb | 1,63 |
| Cu ₂ S | 1,80 | As ₂ Se ₃ | 1,60 |
| CuO | 2,00 | Sb ₂ Se ₃ | 1,20 |
| Cu ₂ Se | 1,40 | Ge | 0,67 |
| CuInS ₂ | 1,50 | Se | 1,60 |
| CuInSe ₂ | 1,01 | | |

7.1.1 Анализа фотонапонских ћелија

У наставку је представљена анализа електричних карактеристика фотонапонске ћелије која се користи за напајање енергијом процеса реверзибилне осмозе воде. Електрична струја која настаје у $p-n$ споју, назива се електрична струја $p-n$ споја. Јачина струје J_j представља разлику јачине струје која настаје услед индуковане светлости J_r , од n стране на p страну материјала фотонапонске ћелије и јачине струје J_0 услед преласка електрона из p стране на n страну (назива се

реверзибилна струја). У зависности од вредности температуре T , одређени број електрона p -материјала се налази у проводном делу. Ови електрони могу лако прећи на страну n како би попунили шупљине настале на p - n споју, формирајући струју J_0 . Електрони заузимају проводни простор у зависности од температуре у n -материјалу, уколико немају довољно енергетског потенцијала да пређу p - n спој, на p страну. Међутим, уколико постоји преднапон V , који је настао услед дејства фотона светлости у фотонапонској ћелији, неки од генерисаних електрона имају довољно енергије да пређу p - n спој на p страну фотонапонске ћелије.

Овим ефектом настаје индукована струја J_r , која је сразмерана J_0 , и приказана је изразом [98]:

$$J_r = J_0 \exp(e_0 V / kT) \quad (7.4)$$

где су:

e_0 - наелектрисање електрона, $1,602 \cdot 10^{-19} [J/V]$,

k - Болцманова константа, $1,381 \cdot 10^{-23} [J/K]$.

Јачина струје p - n споја J_j представља разлику струја J_r и J_0 .

$$\begin{aligned} J_j &= J_r - J_0 \\ &= J_0 [\exp(e_0 V / kT) - 1] \end{aligned} \quad (7.5)$$

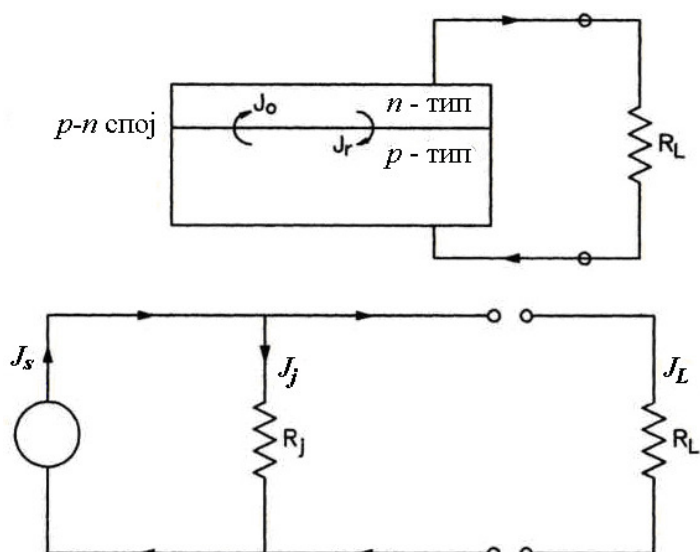
Посматрајући слику 7.2, очигледно је да струја генерисана у ћелији има два проласка, један кроз p - n спој, а други у виду отпора спољашњег кола R_L . На слици 7.2 приказано је еквивалентно струјно коло фотонапонске ћелије. Треба нагласити да је јачина струје генерисана у фотонапонској ћелији, укључујући струју p - n споја, пропорционална површини ћелије. Потребно је увести величину J која представља јачину струје I по јединици површине A и дефинише се изразом:

$$J = \frac{I}{A} \quad (7.6)$$

где су:

I - јачина струје, [A],

A - површина фотонапонске ћелије [m^2].



Слика 7.2. Фотонапонска ћелија и приказ еквивалентног струјног кола [97]

На основу слике 7.2, може се дефинисати следећи израз:

$$\begin{aligned} J_L &= J_s - J_j & (7.7) \\ &= J_s - J_0 [\exp(e_0 V/kT) - 1] \end{aligned}$$

где је J_s тренутна јачина струје затвореног кола.

За затворено струјно коло, $V = 0$ и $J_L = J_s$.

За отворено струјно коло, $J_L = 0$ и $V = V_{oc}$.

Из чега произилазе следећи изрази [98]:

$$0 = J_s - J_0 [\exp(e_0 V/kT) - 1] \quad (7.8)$$

или

$$V_{oc} = \frac{kT}{e_0} \ln \left(\frac{J_s}{J_0} + 1 \right) \quad (7.9)$$

Слика 7.3 приказује типичне перформансе криве јачине струје и напона (I - V) соларне ћелије. Излазна снага је производ струје оптерећења и напона и представља функцију електричног отпора

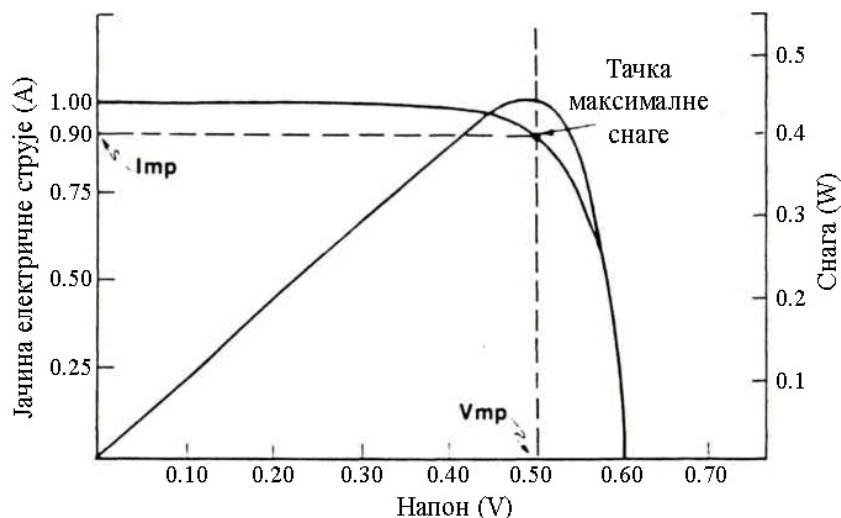
$$\begin{aligned} p_L &= AJ_L V = I_L V \\ &= I_L^2 R_L \end{aligned} \quad (7.10)$$

где је A површина ћелије.

Излазна снага при одређеним условима постиже максималну вредност. Да би се пронашао услов максималне излазне снаге p_{\max} , потребно је диференцирати израз излазне снаге у односу на V и изједначити израз са нулом:

$$\exp(e_0/kT)\left(1 + \frac{e_0 V_m}{kT}\right) = 1 + \frac{J_s}{J_0} \quad (7.11)$$

где V_m представља напон при максималној снази. Јачина струје при максималној снази $J_{L,m}$ и максимална снага p_{\max} могу се добити из израза (7.7) и (7.10) [99].



Слика 7.3. Криве јачине струје, напона и снаге соларне ћелије [99]

$$J_{L,m} = J_s - J_0 [\exp(e_0 V_m / kT) - 1] \quad (7.12)$$

Комбинацијом израза (7.11) и (7.12), добија се:

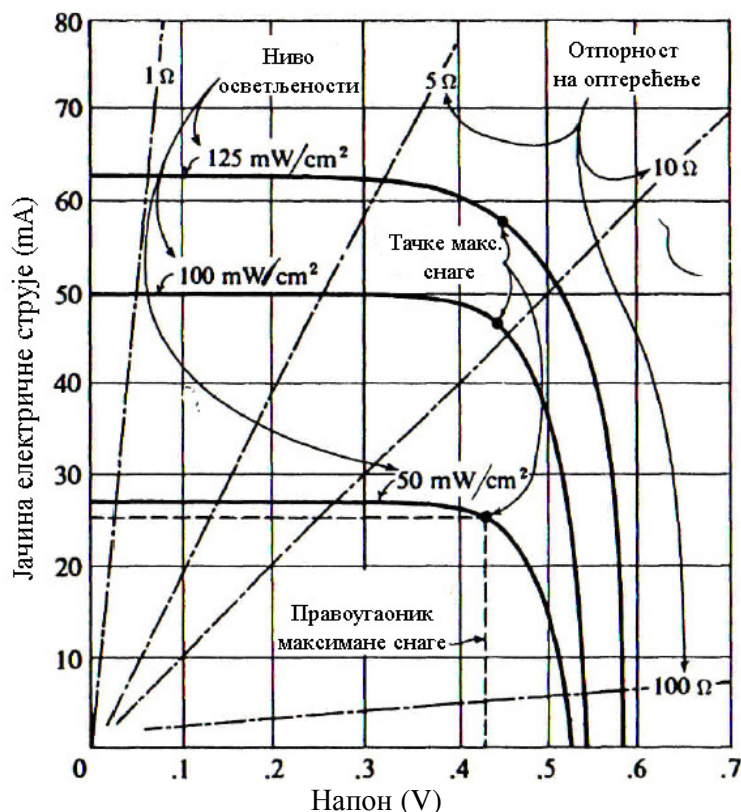
$$J_{L,m} = \frac{e_0 V_m / kT}{1 + (e_0 V_m / kT)} (J_s + J_0) \quad (7.13)$$

$$P_{\max} = \frac{e_0 V_m^2 / kT}{1 + (e_0 V_m / kT)} (J_s + J_0) \cdot A \quad (7.14)$$

Слика 7.4 показује ефекат интензитета Сунчевог зрачења и отпор спољашњег оптерећења на перформансе силицијумске ћелије. Температура такође утиче на перформансе, где се напон и излазна снага смањују са повећањем температуре.

7.1.2 Степен корисности фотонапонских соларних ћелија

Вредности теоријских ефикасности фотонапонских ћелија приказане су на слици 7.5.

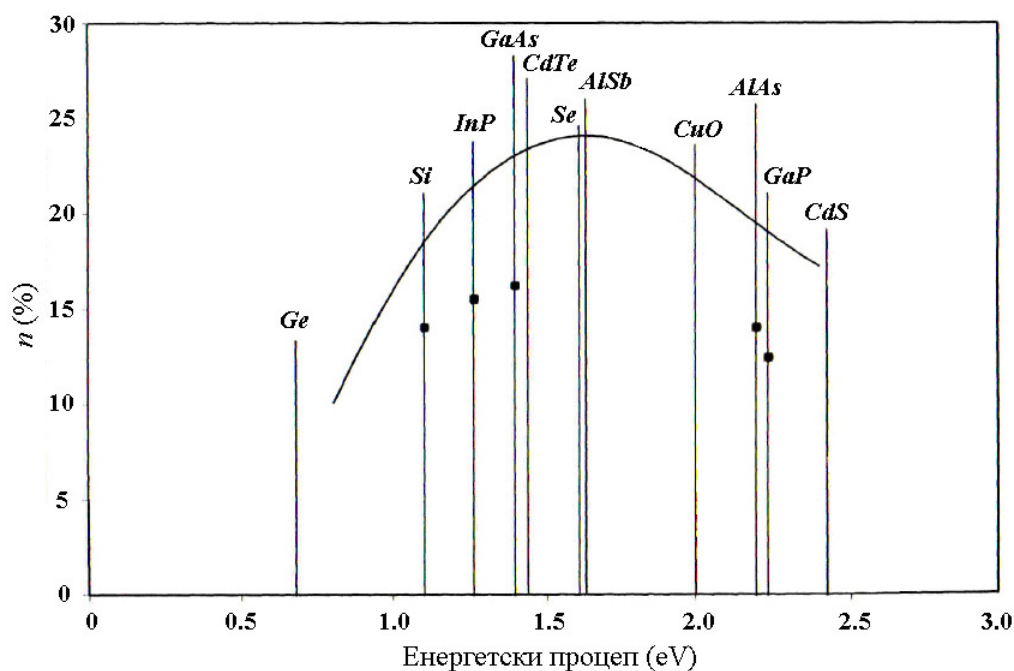


Слика 7.4. Типичне карактеристике јачине струје и напона силицијумске ћелије, ефекти нивоа осветљења и отпорност оптерећења [99]

Разлози остваривања мањег степена корисности соларних ћелија у поређењу са теоријским вредностима су следећи:

1. Услед рефлексије светлости са површине ћелије. Овај ефекат се може смањити антирефлексивном (AR) превлаком. Ради илустрације наводи се да AR превлаке могу смањити рефлексију Si ћелије до 3%.
2. Услед делимичног замрачења ћелије сенком електричних контаката и инсталација. Овај ефекат се може делимично отклонити смањењем површине контаката и/или чинећи их транспарентним,
3. Услед интерног електричног отпора ћелије.
4. Услед рекомбинације електрона и шупљина пре него што они могу да допринесу стварању електричне струје. Овај ефекат се може редуковати у

поликристалним и аморфним ћелијама употребом легура са учешћем водоника.

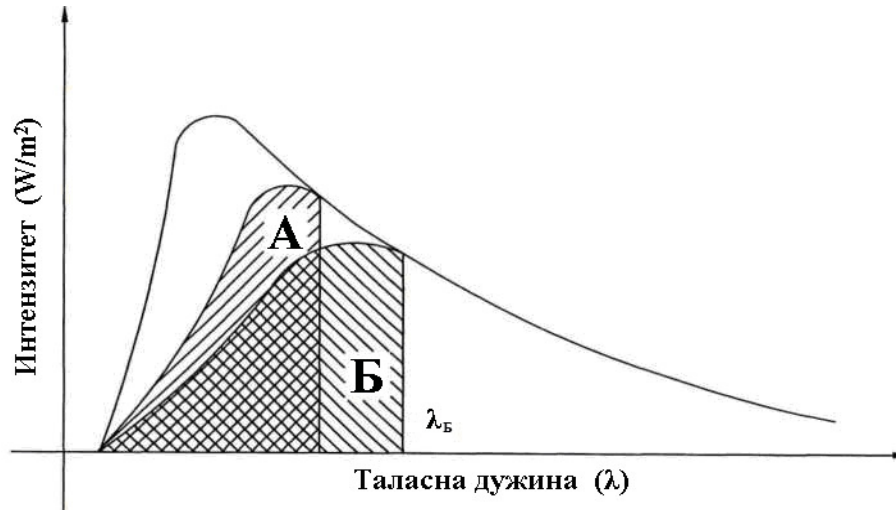


Слика 7.5. Максимална теоријска ефикасност конверзије соларне енергије као функција разлике енергије између проводне и валентне зоне полупроводника (енергетски процеп) [99]

7.1.3 Вишеслојне фотонапонске соларне ћелије

Претходно објашњена ограничења соларних ћелија услед разлике енергије између проводне и валентне зоне могу бити делимично превазиђена коришћењем више слојева материјала постављених једни на друге, где сваки наредни слој поседује веће вредности разлике енергије између проводне и валентне зоне у односу на претходни слој. На пример, као што је приказано на слици 7.6, ако је горњи слој ћелије израђен од материјала А (разлика енергије између проводне и валентне зоне одговара таласној дужини λ_A), Сунчево зрачење са таласним дужинама мањим од λ_A апсорбоваће се у излазну снагу једнаку шрафираној површини А. Сунчево зрачење таласне дужине веће од λ_A ће проћи кроз слој А и биће конвертован доњим слојем ћелије Б (разлика енергије између проводне и валентне зоне одговара таласној дужини λ_B) у излазну снагу једнаку шрафираној површини Б. Укупна излазна снага, а самим тим и степен корисности ових комбинованих фотонапонских ћелија биће већа од излазне снаге и степена корисности сваког појединачног слоја ћелије.

Степен корисности ћелије се повећава са бројем слојева. Како би овај концепт функционисао, сваки слој треба бити што тањи, што је веома велика ако не и непремостива препрека у изради вишеслојних кристалних и поликристалних ћелија. Овај концепт је истраживан углавном употребом танких слојева аморфних материјала.



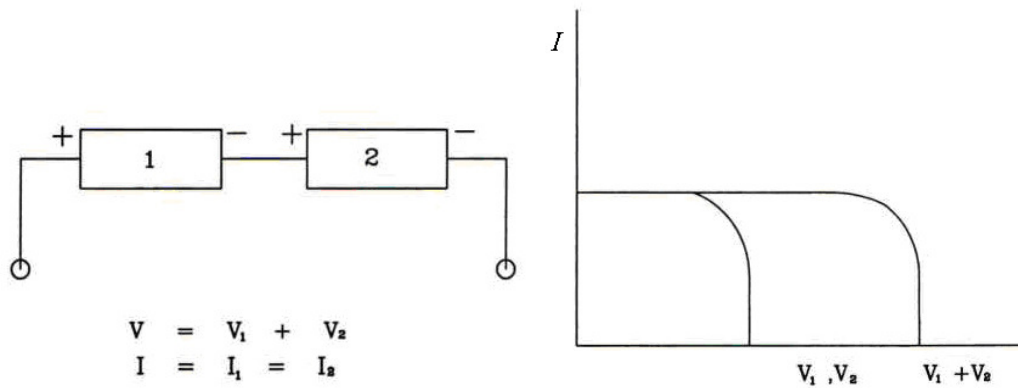
Слика 7.6. Дијаграм конверзије снаге двослојне фотонапонске ћелије [100]

7.2 Развој фотонапонских система

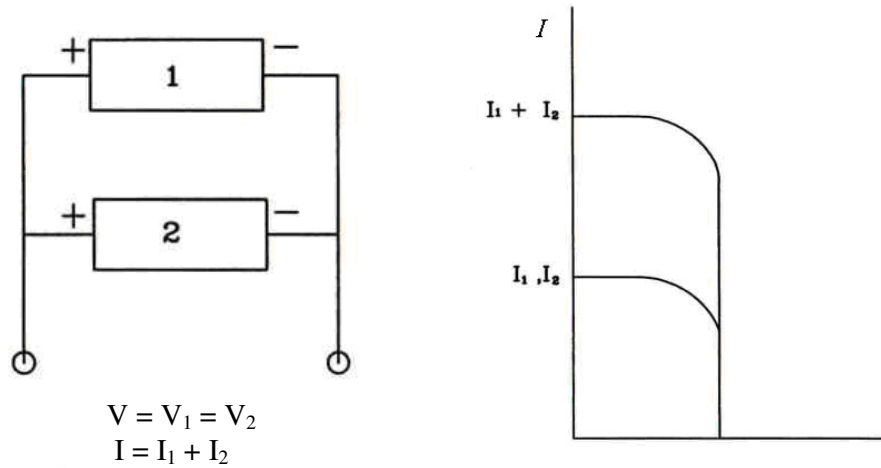
Фотонапонска постројења су веома корисна за напајање енергијом десалинизационих система реверзибилне осмозе воде у подручјима удаљеним од електричне мреже са друге стране. У подручјима у којима је доступна конвенционална електрична мрежа, фотонапонски системи могу значајно смањити енергетске трошкове система *RO*.

Соларне ћелије могу бити повезане серијски, паралелно или на оба начина, са циљем остваривања потребног напона и јачине електричне струје. Када су фотонапонске соларне ћелије везане серијски, вредности излазног напона и јачине електричне струје представљени су на слици 7.7. Паралелним повезивањем повећава се јачина електричне струје, као што је приказано на слици 7.8. Ако фотонапонске ћелије бр. 1 и бр. 2 имају различита електрична својства, излазне карактеристике изгледаће као што је приказано на слици 7.9.

Ћелије су везане тако да формирају модуле, модули су повезани тако да формирају панеле, а панели су повезани тако да формирају низове. Начини повезивања приказани су на сликама 7.7 и 7.8.



Слика 7.7 . Карактеристике две истоветне фотонапонске ћелије серијски везане

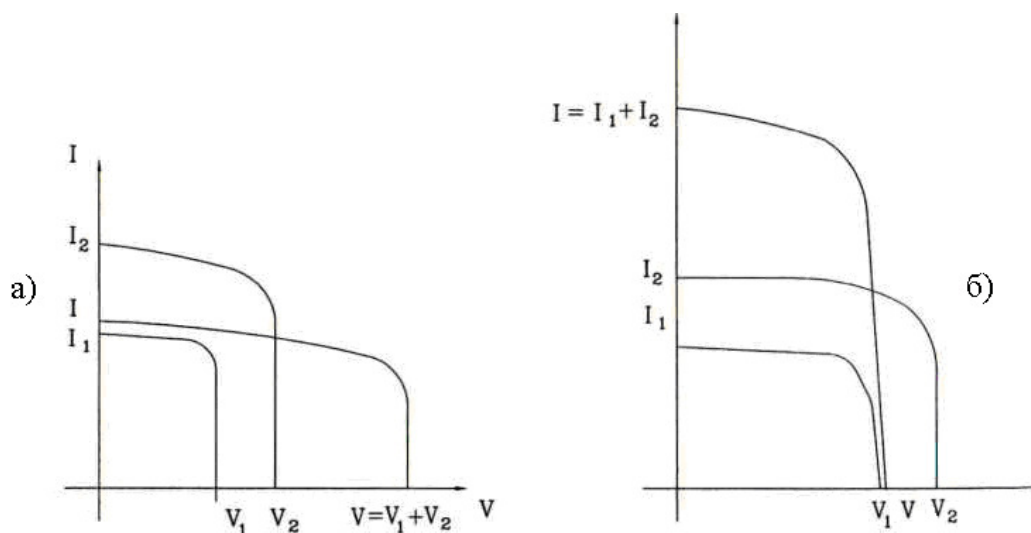


Слика 7.8 . Карактеристике две истоветне фотонапонске ћелије паралелно везане

Развој фотонапонских система засновано је на енергетским захтевима система реверзибилне осмозе воде са којом се интегрише.

Неопходно је дефинисати параметре:

1. Одредити приоритет између укупне остварене количине дневне електричне енергије или остварене максималне снаге;
2. Доступност другог извора електричне енергије;
3. Захтеви за складиштењем електричне енергије (типови батерија);
4. Специфични захтеви везани за једносмерни или наизменични извор електричне енергије.



Слика 7.9 . Карактеристике фотонапонских ћелија различитих електричних својстава које су повезане:
а) редно и б) паралелно

Постоје три основна корака у развоју соларних фотонапонских система:

1. Процена електричног оптерећења и профила промена;
2. Процена доступног Сунчевог зрачења;
3. Димензионисање фотонапонских система, укључујући површину фотонапонских панела, избор осталих компоненти као и начин повезивања електричног система.

Сваки од ових корака илустрован је одговарајућим примерима [101],[102].

7.2.1 Профили и процена електричних оптерећења

Прецизна процена електричних оптерећења и њихових профила промена изузетно је важна при пројектовању фотонапонских система. Потребно је одабрати минималну конфигурацију фотонапонског система која задовољава дневне потребе спољашњег електричног оптерећења. Ради илустрације наводи се следећи пример: уколико је потребна снага за пет различитих подсистема потрошача који захтевају 200W, 300W, 500W, 1000W и 1500W, односно тако да само један подсистем буде активан у било ком тренутку и када је сваки подсистем активан у просеку 1 час дневно, развој фотонапонског система врши се на основу максималне снаге од 1500W и дневне потребе енергије од 3500 Wh. Вишеструка спољашња електрична оптерећења фотонапонског система требају бити распоређена на начин да

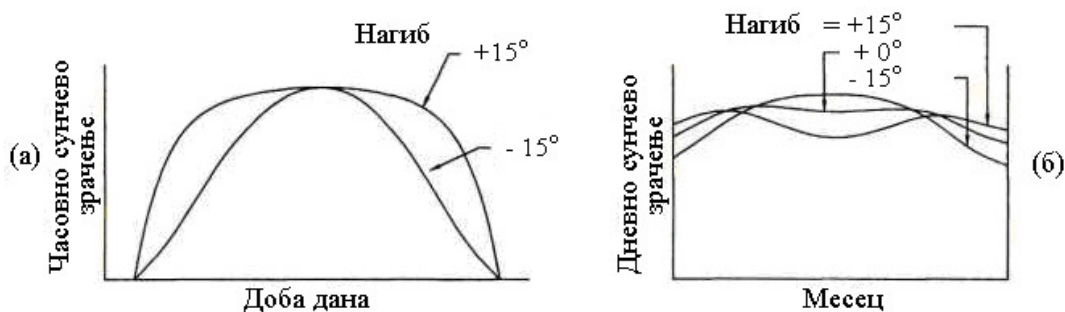
снабдевање захтеваном енергијом буде остварено употребом мањих фотонапонских система, с обзиром да су инвестициони трошкови примарни.

7.2.2 Процена доступног Сунчевог зрачења

Процена доступног Сунчевог зрачења добија се на основу дугорочних измерених вредности за изабрану локацију. Ови подаци су доступни у метролошким базама података. У овом истраживању процена доступног Сунчевог зрачења добијена је из *MTM* базе података софтвера *Insel*. При пројектовању фотонапонског система, потребно је донети одлуку да ли ће фотонапонски панел пратити кретање сунца или ће бити фиксиран на одређеном нагибу и азимуту. За фиксне панеле и зимске услове, најбољи угао нагиба износи географска ширина $+15^\circ$, док за услове лета износи географска ширина -15° . Угао нагиба фиксног панела који је једнак географској ширини омогућава остваривање максималне енергије добијене на годишњем нивоу као што је приказано на слици 7.10.

7.2.3 Димензионисање фотонапонских система

Уколико остваривање снаге електричног оптерећења у сваком тренутку није критично, фотонапонски системи се димензионишу на основу просечних вредности енергије и потребне снаге расположивог Сунчевог зрачења и ефикасности компоненти. Овај начин назива се хеуристички приступ развоја. Важно је напоменути да фотонапонски систем димензионисан на основу овог приступа неће остварити оптималне вредности, међутим, представља добру полазну основу за развој детаљног решења.

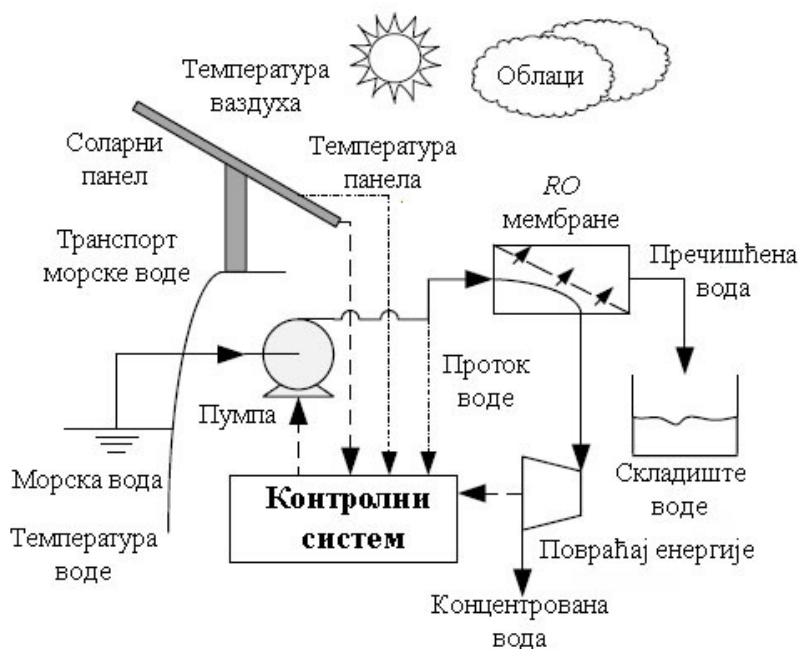


Слика 7.10. Дијаграми Сунчевог зрачења за фотонапонски панел са различитим угловима: а) Часовно Сунчево зрачење, б) Дневно Сунчево зрачење[101]

Детаљни аспекти димензионисања обухватају параметре: промене ефикасности компонената у зависности од електричног оптерећења, доступности соларног зрачења, затим избор начина рада система, тренутно снабдевање система *RO* електричном енергијом, пуњење батерија или комбиновани рад.

7.3 Интеграција соларних фотонапонских система са десалинизационим системом реверзибилне осмозе

Теорија развоја фотонапонских система описана је у претходном поглављу. Соларни десалинизациони системи *PVRO* остварују се интеграцијом система *RO* и фотонапонских модула. Типична конфигурација *PVRO* система приказана је на слици 7.11. Данас су фотонапонске и технологије *RO* унапређене и комерцијално доступне за широку употребу. Постројења *RO* су модуларне и компактне конструкције са релативно малом потрошњом енергије двоструко мањом у односу на термалне десалинизационе технологије. Фотонапонски енергетски системи представљају еколошки чисту технологију која је карактерисана једноставношћу рада и одржавања што представља подстицај за ширу примену ове технологије, нарочито у срединама у којима није доступна конвенцијална електрична мрежа.



Слика 7.11. Шематски приказ фотонапонског система [103]

Стално смањење трошкова израде фотонапонског подсистема поспешује економску оправданост интеграције са десалинизационим системима.

Опште компоненте фотонапонског енергетског система су [103]:

- Фотонапонски модули,
- Инвертер,
- Систем за праћење позиције Сунца у времену,
- Контролни систем за одређивање максималне снаге према тренутној вредности Сунчевог зрачења,
- Линеарни појачавачи јачине електричне струје.

7.3.1 Фотонапонски модули

У фотонапонским десалинизационим системима, једносмерна електрична струја генерисана у соларним ћелијама (силицијумских или других полупроводника), користи се директно или након регулације за снабдевање пумпе електричном енергијом. Садашња индустријска производња фотонапонских модула је примарно усмерена на коришћење (моно и поли) кристалног силицијума и танких слојева аморфних силицијумских превлака. Током неколико технолошких достигнућа, остварен је степен корисности фотонапонских модула вредности од 13 до 20% за поли и монокристалне силицијумске ћелије и 6 до 10% за танкослојне соларне ћелије. Цена фотонапонских модула тренутно износи 2 \$/W.

У фотонапонском панелу, свака појединачна соларна ћелија је представљена класичним дво-диодним моделом, који је дат изразом [104]:

Јачина струје генерисана сунчевим зрачењем приказана је изразом:

$$I_{ph} = A(C_0 + C_1 \cdot T_{\text{ћелије}}) \cdot G_t \quad (7.15)$$

где су:

I_{ph} - јачина генерисане струје, [A],

A - површина соларне ћелије, [m²],

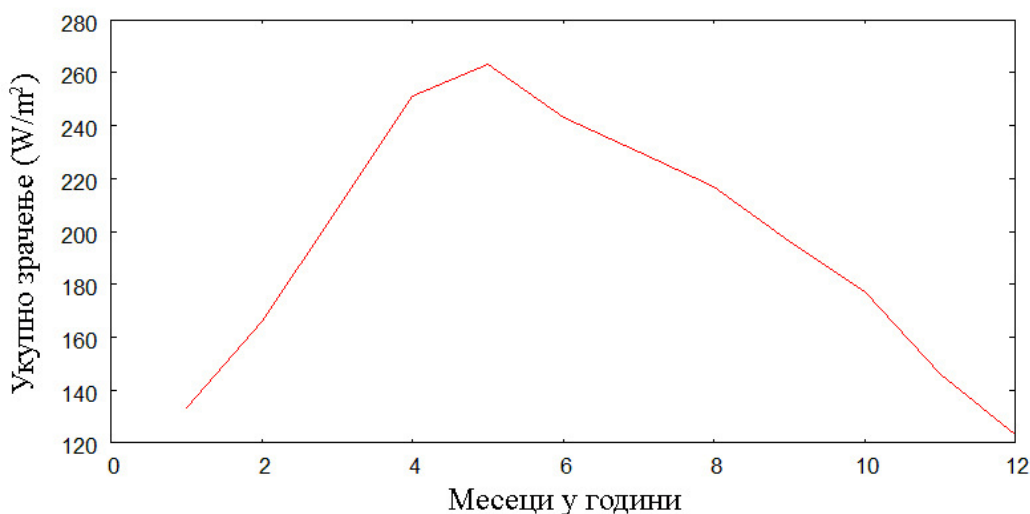
C_0, C_1 - специфичне константе соларних ћелија,

$T_{\text{ћелије}}$ - температура ћелије, [°C],

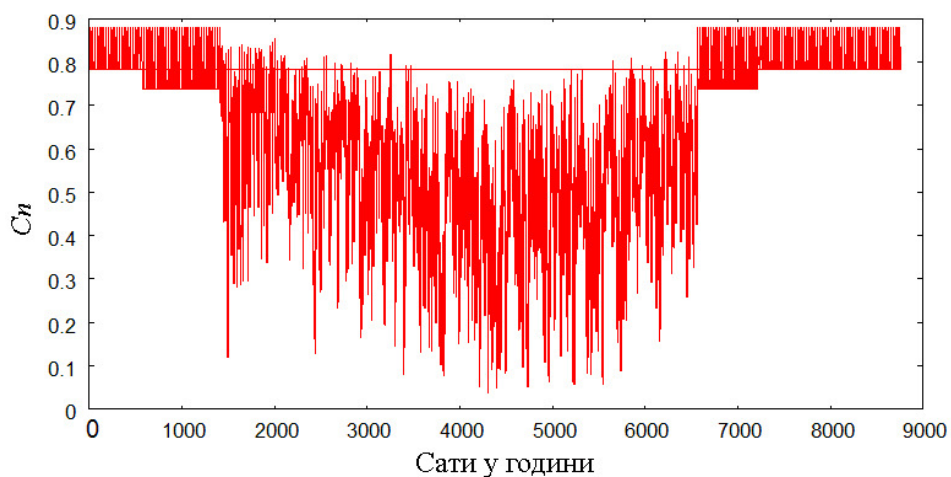
G_t - укупно зрачење на нагнуту површ, [W/m²].

7.3.2 Могућности коришћења соларне енергије на локацији Тампа, Флорида, САД

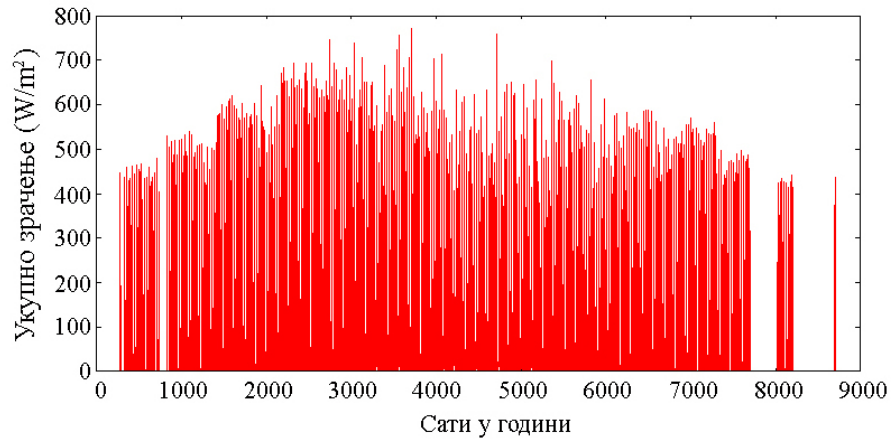
Тампа се налази у централној Флориди на западној обали. Сви подаци коришћени у овом раду су из *MTM* базе података (метеоролошки подаци из *Insel* софтвера). Сви приказани подаци добијени су вишегодишњим мерењем. Слика 7.12 показује месечне укупне вредности зрачења на хоризонталној равни на локацији Тампа, Флорида САД.



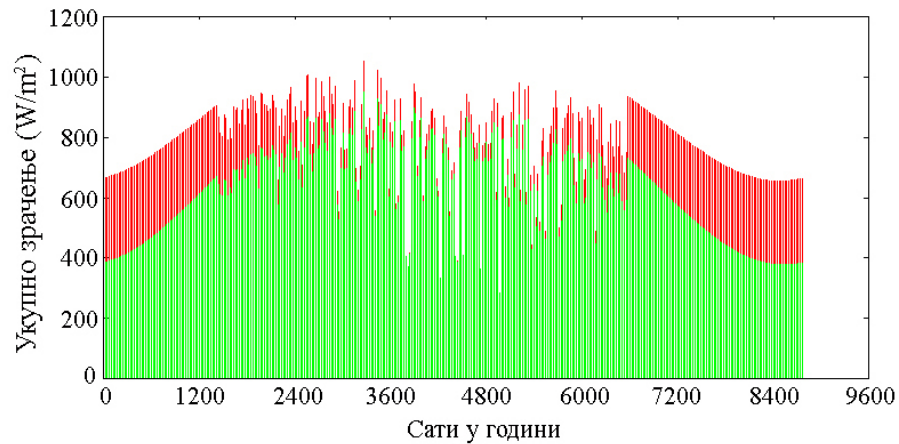
Слика 7.12. Месечне вредности укупног зрачења на хоризонталну раван на локацији Тампа Флорида, САД [105]



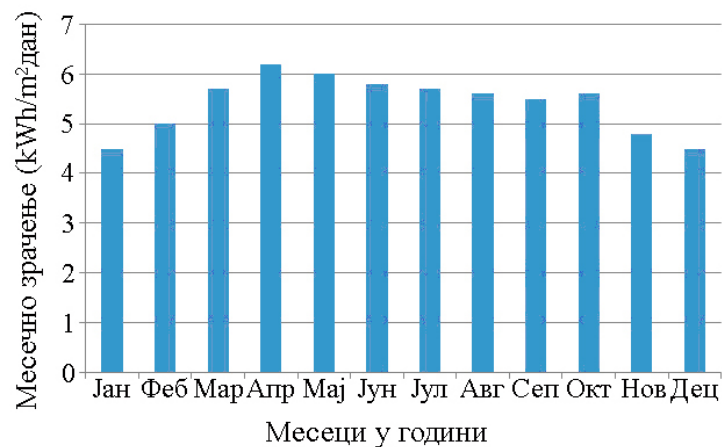
Слика 7.13. Часовни индекс прозрачности на локацији Тампа Флорида, САД [105]



Слика 7.14. Часовно укупно Сунчево зрачење на локацији Тампа Флорида, САД [105]



Слика 7.15. Часовно укупно Сунчево зрачење на нагнуту раван (црвена боја) и на хоризонталну раван (зелена боја) на локацији Тампа Флорида, САД [105]



Слика 7.16. Месечне средње дневне вредности укупног Сунчевог зрачења на нагнуту раван на локацији Тампа Флорида, САД [105]

7.3.3 Анализа могућности коришћења соларних фотонапонских панела за рад експерименталног десалинизационог постројења

За одабране услове експеримента потребна електрична енергија за производњу 10 m^3 пречишћене воде процесом реверзибилне осмозе израчунава се на основу следећих параметара:

- специфичне потрошње енергије која износи $3,1 \text{ kWh/m}^3$ за морску воду са концентрацијом растворених материја од 25000 mg/l ,
- потребног времена рада система константним оптерећењем 6h .

Аспект анализе могућности коришћења фотонапонског подсистема заснован је на употреби фотонапонских модула *General Electric GE PV p-200-M* снаге 200W и 14% степена корисности, површине од $1,46 \text{ m}^2$. Максимални напон фотонапонског модула износи $26,3\text{V}$ док потребан напон за рад пумпе високог притиска износи 220V . Потребан број фотонапонских модула у систему који су везани серијски, износи [106]:

$$N_m = \frac{HPP_{wv}}{MPPT_v} = \frac{220}{26.3} \approx 9 \quad (7.16)$$

где су:

HPP_{wv} - радни напон пумпе високог притиска, [V],

$MPPT_v$ - максимални напон фотонапонског модула са системом праћења позиције сунца у времену, [V].

Номинална излазна снага сваког модула на *MPPT* при интензитету Сунчевог зрачења од 1000W је 200W .

Номинална излазна снага подсистема серијски повезаних елемената износи:

$$W_n = 200\text{W} \cdot 9 = 1800 [\text{W}] \quad (7.17)$$

Најнижа месечна просечна дневна вредност укупног Сунчевог зрачења на локацији Тампа, Флорида САД износи $4,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{дан})$, током јануара месеца. Дневна вредност добијене енергије за сваки подсистем од 9 фотонапонских модула износи:

$$W_d = 4,6 \cdot 1800 = 8,280 [\text{Wh}/\text{дан}] \quad (7.18)$$

Дневна „потрошња” енергије неопходна за производњу 10 m^3 пречишћене воде (морска вода концентрације 25.000 mg/l TDS) износи: $W_w = 31000 [\text{Wh}/\text{дан}]$.

Број потребних модула у серији износи:

$$N_{mst} = \frac{W_w}{W_d} = \frac{31000}{8280} \approx 4 \quad (7.19)$$

Укупан број фотонапонских соларних модула износи:

$$N_{PV\ tot} = N_m \cdot N_{mst} = 9 \cdot 4 = 36 \quad (7.20)$$

Укупна површина фотонапонских модула износи:

$$A_{PV} = 1,46 \text{ m}^2 / \text{мод} \cdot 36 \text{ мод} = 52,56 \text{ m}^2 \quad (7.21)$$

7.3.4 Закључак студије изводљивости интеграције соларних фотонапонских панела са десалинизационим постројењем

Циљ истраживања у овом поглављу био је да се изврши анализа могућности интеграције фотонапонских подсистема са десалинизационим системом реверзибилне осмозе воде. Теоријска и експериментална истраживања потврдила су да потрошња енергије десалинизационог система највише зависи од параметара радних процеса, концентрације соли у морској води, степена корисности процеса, перформанси мембранских елемената и температуре морске воде. Експериментална истраживања потврдила су да потребе система у погледу трансмембранског притиска расту током рада, чиме се повећава и вредност специфичне потрошње енергије. Истовремено, примећено је да се при константном трансмембранском притиску током времена степен корисности процеса се незнатно смањује.

Промене концентрација растворених материја у концентрованој и пречишћеној води изазване су променом температуре морске воде током рада. Смањењем температуре морске воде смањује се пролазност соли кроз мембрану. Пропустљивост воде кроз мембрану се такође смањује, чиме се специфична потрошња енергије повећава са смањењем температуре морске воде.

Изведена студија изводљивости интеграције фотонапонских енергетских система са десалинизационим системом *RO* морске воде указује да интензитет укупног Сунчевог зрачења, а тиме и економска исплативост, директно зависе од географске локације постројења. Такође, концентрација растворених материја у морској води зависи од географске локације мора. Према теоријским истраживањима, оптимална конфигурација садржи фото-напонски модул са конвертором и регулатором. Извршено је димензионисање фотонапонских соларних панела за географску локацију Тампа, Флорида, САД.

8 ЗАКЉУЧАК

У дисертацији су приказани резултати истраживања термодинамичких процеса одстрањивања соли из морске воде применом десалинизационих система реверзибилне осмозе воде. Извршена је анализа термодинамичких процеса и сагледане су могућности оптимизације рада система реверзибилне осмозе воде. Развијен је модел процеса запреминског протока пречишћене воде као основни значајни параметар енергетских захтева система реверзибилне осмозе воде који узима у обзир утицај термодинамичких величина стања морске воде. Осмишљено је и израђено лабораторијско експериментално постројење које има могућност регулисања радних режима процеса реверзибилне осмозе у зависности од термодинамичких величина стања морске воде. Спроведена су обимна експериментална истраживања појава и процеса који се јављају приликом десалинизације морске воде са сврхом верификације модела процеса. У експериментима су коришћена три типа мембранских модула различитих својстава пропустљивости и степена одстрањивања соли. Мембрански модули су одабрани према критеријумима погодности физичко-хемијских особина за одстрањивање соли процесом реверзибилне осмозе и могућностима формирања геометријских конфигурација десалинизационих система погодних за испитивање. Такође, узети су у обзир и критеријуми заступљености мембранских материјала на светском тржишту. Урађена је анализа и дискусија експерименталних резултата. Извршена је анализа одступања сопственог теоријског модела запреминског протока пречишћене воде од сопствених експерименталних резултата. Извршено је и поређење са резултатима истраживања других аутора. На основу резултата теоријских и експерименталних истраживања анализиран је рад комплетног десалинизационог система реверзибилне осмозе и могућности његове оптимизације у смислу смањења потрошње енергије по јединици запремине пречишћене воде.

Модел процеса омогућава симулацију промене запреминског протока пречишћене воде и енергетских захтева током процеса одстрањивања соли из морске воде. Претпоставке модела су усвојене тако да одговарају реалној физичкој

слици процеса. Предложеним моделом процеса разматрани су релевантни параметри одстрањивања соли из морске воде. Основна функција теоријског модела процеса приказује промену запреминског протока пречишћене воде током десалинizacionог процеса реверзибилне осмозе воде, и представљена је више-параметарском функцијом:

$$Q_p = \frac{L_p \cdot \Delta p}{1 + \frac{R \cdot A \cdot C_f}{\Delta p \cdot Y} \cdot \ln \left(\frac{1 - (R \cdot A \cdot C_f / \Delta p)}{1 - Y - (R \cdot A \cdot C_f / \Delta p)} \right)} \cdot B^{(T_o - T_i)}$$

где су: Δp , C_f , Y , T_o , варијабле функције Q_p , док L_p , R и A представљају физичко-хемијске карактеристике мембране.

На бази резултата експерименталних мерења одређен је непознати параметар B који представља утицај температуре на процес десалинизације.

Одабране полупропусне мембране испитиване су под истим радним режимима, са трансмембранским притиском у опсегу од $32 \cdot 10^5 - 55 \cdot 10^5$ Pa, концентрацији растворених материја морске воде у опсегу од 27500 до 40000 mg/l (*TDS*), температуре морске воде у опсегу од 15 до 30°C, степеном корисности процеса у опсегу од 42 до 51%. Параметри радних режима су одабрани на основу препорука из литературе о оптималним режимима процеса реверзибилне осмозе за постизање задовољавајућег квалитета пречишћене воде.

Изабрани су мембрански модули са физичко-хемијским својствима: високог протока *Nano H₂O QFX SW 75 ES*, са својствима високог степена одстрањивања соли *QFX SW 75 R* и комерцијално доступне мембране стандардних карактеристика протока и степена одстрањивања соли *DOW SW30*.

Добијени резултати експерименталних мерења сврстани су у две групе. Прва група резултата односи се на праћење промена запреминског протока пречишћене воде у зависности од одговарајућих вредности температуре, притиска, степена корисности процеса, концентрације растворених материја у морској води и мембранских карактеристика на основу којих су дефинисани потребни капацитети компонената система и одређене величине које се користе у параметарској анализи рада самог система.

Друга група резултата се односи на праћење промена специфичне потрошње енергије процеса у зависности од термодинамичких величина стања морске воде.

Сви прикупљени резултати су обрађени и анализирани. Одређене су величине од значаја за моделирање процеса реверзибилне осмозе воде, посматраног мембранског модула кроз анализу добијеног запреминског протока пречишћене воде. Постављени су масени биланси компонената система и израчунате вредности основних показатеља енергетске и квалитативне ефикасности рада система. Широка примена мембранских модула ниског притиска, захваљујући високој пропустљивости, омогућила је да се вредности притиска морске воде приближе вредностима осмотског притиска процеса *RO*. Разматрана је оптимизација мембранских процеса *RO* у зависности од степена корисности процеса, са циљем смањења потрошње енергије, према термодинамичким ограничењима. Експериментални резултати показали су да је могуће оптимизирати десалинизациони процес *RO* са циљем остваривања минималне потрошње енергије, узимајући у обзир ефекте осмотског притиска обухваћених моделом термодинамичког ограничења.

Анализа захтева процеса мембранских површина изражена преко специфичних енергетских трошкова процеса *RO*, извршена је у циљу да се процени опсег степена корисности процеса током којег ће унапређење својстава пропустљивости мембране бити значајно за смањење трошкова производње пречишћене воде. Стога, као што је приказано у овом раду, с обзиром на однос трошкова израде захтеваних мембранских површина и трошкове електричне енергије, значајан је будући развој мембрана веће пропустљивости за примену у системима десалинизације вода са мањом концентрацијом растворених материја, применом радних режима са мањим степеном корисности процеса. Међутим, при ниском степену корисности процеса треба узети у обзир додатне трошкове, везане за припрему морске воде и трошкове управљања концентрованом водом. Са друге стране, за десалинизацију морске воде која садржи већу концентрацију растворених соли, енергетски трошкови су много већи од трошкова израде захтеваних мембранских површина (поређењем са еквивалентним енергетским јединицама), тако да постоји мали економски подстицај за развој мембрана веће пропустљивости, за остваривање циља смањења укупних трошкова десалинизације морске воде. Показано је да се високопроточни мембрански модули могу користити и у десалинизационим системима са високим концентрацијама

растворених материја морске воде као саставна компонента хибридних мембранских конфигурација. Хибридни мембрански системи обезбеђују смањену потрошњу енергије, добар квалитет пречишћене воде и смањену могућност стварања наслага материја на површи мембрана услед боље расподеле проласка воде кроз индивидуалне мембранске модуле, који су постављени по аксијалном правцу мембранске посуде.

Анализиран је утицај температуре, притиска, концентрације растворених материја морске воде, степена корисности процеса и карактеристике мембранске пропустљивости на остварену вредност запреминског протока пречишћене воде. Резултати истраживања су потврдили да концентрација растворених материја у морској води и степен корисности процеса имају значајан утицај на величину протока пречишћене воде а сам тим и на енергетске захтеве система, док температура морске воде значајно утиче на квалитет пречишћене воде.

Утврђено је да се при степену корисности процеса од 50% постиже најмања потрошња енергије. Најповољнија вредност потрошње енергије од $0,713 \text{ kW/m}^3/10000 \text{ mg/l}$ остварена је коришћењем високопроточне мембране *QFX SW 75 ES* при оптималном степену корисности процеса. Променом степена корисности процеса за само 5% на вредност од 45% специфична потрошња енергије система била је повећана за 21,7% на вредност од $0,868 \text{ kW/m}^3/10000 \text{ mg/l}$. Правилан одабир степена корисности процеса је од изузетног значаја код десалинизационих постројења у којима енергетски фактор има превасходну улогу. Са повећањем температуре повећава се и проток пречишћене воде, при чему треба посебно нагласити да и садржај растворених соли у пречишћеној води има одређени пораст. Дакле, повећање температуре морске воде је значајно до извесне мере у интервалу при коме концентрација растворених соли у пречишћеној води не превазилази унапред прописану употребну вредност. Поређења ради, повећањем температуре са 286 К на 303 К (што значи повећање од 17 К) вредност енергетских захтева се умањила за $0,171 \text{ kW/m}^3/10000 \text{ mg/l}$ или 18%, при чему се концентрација растворених материја у пречишћеној води повећала за 942 mg/l . Овим високопроточним мембранама остварена је вредност протока пречишћене воде од $19,0651/(\text{m}^2\text{h})$ при степену корисности процеса од

50,05% са потрошњом енергије од $0,814 \text{ kW/m}^3/10000 \text{ mg/l}$ и садржајем соли у пречишћеној води од 376 mg/l .

Мембрански модули високог степена одстрањивања соли *QFX SW 75 R* постигли су боље резултате у погледу квалитета пречишћене воде уз значајно веће енергетске захтеве. Најповољнија вредност специфичне потрошње енергије износила је $0,902 \text{ kW/m}^3/10000 \text{ mg/l}$. Остварена је вредност протока пречишћене воде у износу од $14,098 \text{ l/(m}^2\text{h)}$ при степену корисности процеса од 49,5%, са енергетским захтевима од $0,907 \text{ kW/m}^3/10000 \text{ mg/l}$ и садржајем соли у пречишћеној води од 354 mg/l . Комерцијални мембрански модули *DOW SW30* постигли су вредност специфичне потрошње енергије од $0,882 \text{ kW/m}^3/10000 \text{ mg/l}$. Илустрације ради, повећањем температуре са 295 K на 305 K вредност енергетских захтева се умањила за $0,049 \text{ kW/m}^3/10000 \text{ mg/l}$ или 5%, при чему се концентрација растворених материја у пречишћеној води повећала за 246 mg/l . Овим комерцијалним мембранама остварена је вредност запреминског протока пречишћене воде од $17,021 \text{ l/(m}^2\text{h)}$ при степену корисности процеса од 49,5% са енергетским захтевима од $0,915 \text{ kW/m}^3/10000 \text{ mg/l}$ и садржајем соли у пречишћеној води од 269 mg/l .

У циљу верификације добијених резултата извршено је поређење резултата сопственог модела запреминског протока пречишћене воде са резултатима спроведеног сопственог експерименталног истраживања, а затим и са моделима других аутора. Формирани модел запреминског протока пречишћене воде показује задовољавајуће слагање са сопственим експерименталним резултатима. Вредности Пирсоновог коефицијента линеарне корелације (r), апсолутних одступања и параметри анализе варијанси добијене су помоћу софтвера *SPSS Ver. 20.0*. Поређењем резултата сопственог теоријског модела и резултата сопствених експеримената за сва 3 мембранска модула постигнута је вредност коефицијента корелације од $r=0,998$. Извршено је поређење сопствених експерименталних резултата са моделима других аутора која се односе на мембранске модуле сличних физичко-хемијских својстава пропустљивости. Анализом квантитативног слагања резултата модела других аутора са сопственим експерименталним резултатима,

показано је да су модели других аутора остварили већа одступања од експерименталних резултата услед необухваћености утицајних параметара процеса реверзибилне осмозе, температуре морске воде, степена одстрањивања соли и степена корисности процеса. Постигнути су следећи коефицијенти корелације за моделе аутора *Taylor & Zhao* $r = 0,972$, *Mulder* $r = 0,969$ и *Vakili-Nezhaad* $r = 0,968$. Просечна вредност апсолутних одступања сопственог теоријског модела од сопствених експерименталних резултата износила је $0,0686 \text{ l/(m}^2\text{h)}$. Остварене су следеће просечне вредности апсолутних одступања од сопствених експерименталних резултата за моделе аутора *Mulder*-а $0,4233 \text{ l/(m}^2\text{h)}$, *Vakili-Nezhaad* $0,6884 \text{ l/(m}^2\text{h)}$, *Taylor & Zhao* $0,7891 \text{ l/(m}^2\text{h)}$. На основу добијених резултата анализе варијансе и коефицијента значајности сопственог модела $p = 0,240 > 0,05$, закључено је да се теоријски модел статистички значајно не разликује од сопствених експерименталних резултата и да је статистички валидан.

Приказана је студија изводљивости интеграције фотонапонских енергетских подсистема са десалинизационим системом морске воде за географску локацију Тампа, Флорида, САД. Истраживања показују да код десалинизационих система чије се напајање врши једносмерном струјом из фотонапонских панела, једноструко одређивање степена корисности процеса, у временском периоду максималног интензитета Сунчевог зрачења, није поуздано, јер промене температуре, концентрације соли у морској води и промене интензитета Сунчевог зрачења имају утицај на остварене капацитете производње пречишћене воде.

Закључено је да радни режими система реверзибилне осмозе при константном притиску морске воде не гарантују могућност остваривања процеса реверзибилне осмозе при већем степену корисности процеса, у циљу одржавања константних капацитета производње пречишћене воде. Истраживања потврђују да су радни режими система при ниским вредностима степена корисности процеса економски неисплативи, јер потрошња енергије по јединици произведене пречишћене воде достиже веће вредности. Додатне уштеде енергије постижу се интеграцијом система за хемијско чишћење мембрана са фотонапонским системом и коришћењем ниско енергетских мембранских модула.

Научни допринос ове докторске тезе се пре свега огледа у једном свеобухватном приступу у развоју модела запреминског протока пречишћене воде, у зависности од термодинамичких величина стања морске воде и радних режима процеса реверзибилне осмозе. Треба нагласити да модел поседује општост, што омогућава симулацију низа режима рада процеса десалинизације воде реверзибилном осмозом, како испитиваних високопроточних мембранских материјала тако и других мембранских материјала сличних карактеристика. Анализама показатеља енергетске ефикасности процеса одстрањивања соли из морске воде реверзибилном осозом и очекиваног квалитета пречишћене воде, могуће је предвидети и евентуалне кофигурационе измене мембранских елемената које би довеле до побољшања рада система, што представља и инжењерски допринос.

Даља научна истраживања би пре свега требало базирати на развоју модела запреминског протока пречишћене воде и специфичне потрошње енергије десалинизационих система реверзибилне осмозе, посматрањем појава и процеса у проширеном домену истраживања. Потребно је анализирати процесе реверзибилне осмозе са високим степеном корисности процеса $>80\%$. Такође, требало би разматрати и утицај ниске концентрације растворених материја у морској води из других извора, река, језера и подземних вода. За потребе индустријских третмана вода потребно је проширити интервал температуре морске воде, нарочито у системима прераде воде у термоелектранама. У моделу процеса потребно је укључити временски фактор таложења материја на површи и порама мембрана, према физичко-хемијским карактеристикама морске воде. Од великог значаја представља развој алгоритма за прилагођавање радних режима током процеса таложења материја у циљу одржавања захтеваног капацитета производње пречишћене воде и енергетске ефикасности десалинизационог система. Потребно је развити теоријске моделе за процесе реверзибилне осмозе при којима се врши омекшавање воде. При томе би требало извршити експерименталну верификацију система реверзибилне осмозе који садржи уређај за повраћај енергије. Посебну пажњу би требало посветити истраживањима усмереним на развој система складиштења електричне енергије, добијене из фотонапонских колектора у циљу остваривања континуалног рада еколошки чистих фотонапонских система

реверзибилне осмозе воде. Процес одстрањивања соли из морске воде се не завршава на границама система изабраним у овом раду, већ се може проширити узимањем у обзир додатних утицајних параметара, чије се варијације могу постићи на најразличитије начине, укључујући и имплементацију напредних технологија. Спајањем експерименталних истраживања која се тичу квалитета процеса, ефикасности рада система, квалитета пречишћене воде и утицаја на животну средину, може настати јединствена целина која би била веома значајна за свеобухватну мултидисциплинарну анализу десалинизационих система воде.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Butt, F.H., F. Rahman, and U. Baduruthamal, *Identification of Scale Deposits through Membrane Autopsy*. Desalination, 1995. 101(3): p. 219-230.
- [2] Butt, F.H., F. Rahman, and U. Baduruthamal, *Hollow fine fiber vs. spiral-wound reverse osmosis desalination membranes .2. Membrane autopsy*. Desalination, 1997. 109(1): p. 83-94.
- [3] Shannon, M.A., et al., *Science and technology for water purification in the coming decades*. Nature, 2008. 452(7185): p. 301-310.
- [4] Gray S, S.R., Duke M, Rahardianto A and Cohen Y, *Seawater Use and Desalination Technology*. In: Peter Wilderer (ed.) *Treatise on Water Science*, Oxford: Academic Press., 2011. vol. 4, pp. 73-109.
- [5] Ghobeity, A. and A. Mitsos, *Optimal time-dependent operation of seawater reverse osmosis*. Desalination, 2010. 263(1-3): p. 76-88.
- [6] Li, M., *Minimization of Energy in Reverse Osmosis Water Desalination Using Constrained Nonlinear Optimization*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010. 49(4): p. 1822-1831.
- [7] Kaghazchi, T., et al., *A mathematical modeling of two industrial seawater desalination plants in the Persian Gulf region*. Desalination, 2010. 252(1-3): p. 135-142.
- [8] Jamal, K., M.A. Khan, and M. Kamil, *Mathematical modeling of reverse osmosis systems*. Desalination, 2004. 160(1): p. 29-42.
- [9] Oh, H.-J., T.-M. Hwang, and S. Lee, *A simplified simulation model of RO systems for seawater desalination*. Desalination, 2009. 238(1-3): p. 128-139.
- [10] McCutcheon, J.R., R.L. McGinnis, and M. Elimelech, *Desalination by ammonia-carbon dioxide forward osmosis: Influence of draw and feed solution concentrations on process performance*. Journal Of Membrane Science, 2006. 278(1-2): p. 114-123.
- [11] Semiat, R., *Energy Issues in Desalination Processes*. Environmental Science & Technology, 2008. 42(22): p. 8193-8201.
- [12] Nanomagnetics, a UK based company. <http://www.nanomagnetics.com/>.

- [13] Wilf, M., *Design consequences of recent improvements in membrane performance*. Desalination, 1997. 113(2-3): p. 157-163.
- [14] Nemeth, J.E., *Innovative system designs to optimize performance of ultra-low pressure reverse osmosis membranes*. Desalination, 1998. 118(1-3): p. 63-71
- [15] Fethi, K., *Optimization of energy consumption in the 3300 m³/d RO Kerkennah plant*. Desalination, 2003. 157(1-3): p. 145-149.
- [16] Beca, J., *Pharmaceutical discharge: Zero discharge for pharma plant*. Filtration & Separation, 2007. 44(6): p. 40-41.
- [17] Manth, T., M. Gabor, and E. Oklejas, *Minimizing RO energy consumption under variable conditions of operation*. Desalination, 2003. 157(1-3): p. 9-21.
- [18] Busch, M. and W.E. Mickols, *Reducing energy consumption in seawater desalination*. Desalination, 2004. 165: p. 299-312.
- [19] Wilf, M. and C. Bartels, *Optimization of seawater RO systems design*. Desalination, 2005. 173(1): p. 1-12.
- [20] R05-, A.R.N., *Overview of Treatment Processes for the Production of Fit for Purpose Water: Desalination and Membrane Technologies*. 2005, Australian Sustainable Industry Research Centre Ltd.
- [21] Lachish, U., *Optimizing the Efficiency of Reverse Osmosis Seawater Desalination*. urila.tripod.com/Seawater.htm, 2002.
- [22] 95, D., W.P.R. \, and D.P.R. No., *Desalination and Water Purification Technology Roadmap*. 2003, Sandia National Laboratories and the U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation.
- [23] Brady, P.V., et al., *Inland Desalination: Challenges and Research Needs*. Journal of Contemporary Water Research & Education, 2005. 132: p. 46-51.
- [24] Water Science and Technology Board, *Review of the Desalination and Water Purification Technology Roadmap*. 2004: National Academies Press.
- [25] Mickley, M.C., *Membrane Concentrate Disposal: Practices and Regulation, in Desalination and Water Purification Research and Development Program Report No. 123*. 2006, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation: Denver, CO.
- [26] Bond, R. and S. Veerapaneni, *Zero Liquid Discharge for Inland Desalination*. 2007, Denver, CO: AWWA Research Foundation, AWWA, & IWA Publishing.

- [27] Rahardianto, A., et al., *High recovery membrane desalting of low-salinity brackish water: Integration of accelerated precipitation softening with membrane RO*. Journal of Membrane Science, 2007. 289(1-2): p. 123-137.
- [28] Lu, Y.-Y., et al., *Optimum design of reverse osmosis seawater desalination system considering membrane cleaning and replacing*. Journal Of Membrane Science, 282(1-2): p. 7-13.
- [29] Lu, Y.-Y., et al., *Optimum design of reverse osmosis system under different feed concentration and product specification*. Journal Of Membrane Science, 2007. 287(2): p. 219-229.
- [30] Zhu, A., P.D. Christofides, and Y. Cohen, *Effect of Thermodynamic Restriction on Energy Cost Optimization of RO Membrane Water Desalination*. Ind. Eng. Chem. Res., 2009. 48: p. 6010-6021.
- [31] Mingheng, L., *Reducing specific energy consumption in Reverse Osmosis (RO) water desalination: An analysis from first principles*. Desalination, 2011. 276(1- 3): p. 128-135.
- [32] Avlonitis, S.A., D.A. Avlonitis, and T. Panagiotidis, *Experimental study of the specific energy consumption for brackish water desalination by reverse osmosis*. International Journal of Energy Research, 2010: p. n/a-n/a.
- [33] P. Poovanaesvaran, M.A.A., K. Sopian, N. Amin, M.I. Fadhel, M. Yahya, *Design aspects of small-scale photovoltaic brackish water reverse osmosis (PV-BWRO) system*. Desalination and Water Treatment, 2011. 27 p. 210-223.
- [34] Efraty, A., U.S. Patent 7,695,614 B2. 2010.
- [35] Zhu, A., P.D. Christofides, and Y. Cohen, *On RO Membrane and Energy Costs and Associated Incentives for Future Enhancements of Membrane Permeability*. Journal of membrane science, 2009. 344: p. 1--5.
- [36] Zhu, A., Rahardianto A. Christofides P. D. and Y. Cohen, *Reverse Osmosis Desalination with High Permeability Membranes - Cost Optimization and Research Needs*. Desalination and Water Treatment.
- [37] Fan, L.T., et al., *The optimal design of desalination systems*. Desalination, 1967. 3(2): p. 225-236.

- [38] Fan, L.T., et al., *Analysis and Optimization Of A Reverse Osmosis Water Purification System--part I. Process Analysis and Simulation*. Desalination, 1968. 5(3): p. 237-265.
- [39] Fan, L.T., et al., *Analysis and optimization of a reverse osmosis water purification system--part II. Optimization*. Desalination, 1969. 6(2): p. 131-152.
- [40] Hatfield, G.B. and G.W. Graves, *Optimization of a reverse osmosis system using nonlinear programming*. Desalination, 1970. 7(2): p. 147-177.
- [41] Geraldes, V., N.E. Pereira, and M.N. de Pinho, *Simulation and optimization of medium-sized seawater reverse osmosis processes with spiral-wound modules*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005. 44(6): p. 1897-1905.
- [42] Rautenbach, R. and W. Dahm, *Design And Optimization Of Spiral-Wound And Hollow Fiber RO-Modules*. Desalination, 1987. 65(1-3): p. 259-275.
- [43] Van der Meer, W.G.J. and J.C. van Dijk, *Theoretical optimization of spiral-wound and capillary nanofiltration modules*. Desalination, 1997. 113(2-3): p. 129-146.
- [44] Avlonitis, S., W.T. Hanbury, and M.B. Boudinar, *Spiral wound modules performance. An analytical solution, part I*. Desalination, 1991. 81(1-3): p. 191-208.
- [45] Boudinar, M.B., W.T. Hanbury, and S. Avlonitis, *Numerical simulation and optimisation of spiral-wound modules*. Desalination, 1992. 86(3): p. 273-290.
- [46] Avlonitis, S.A., K. Kouroumbas, and N. Vlachakis, *Energy consumption and membrane replacement cost for seawater RO desalination plants*. Desalination, 2003, 157(1-3): p. 151-158.
- [47] Spiegler, K.S. and Y.M. El-Sayed, *The energetics of desalination processes*. Desalination, 2001. 134(1-3): p. 109-128.
- [48] Lachish, U., *Optimizing the Efficiency of Reverse Osmosis Seawater Desalination*. urila.tripod.com/Seawater.htm, 2002.
- [49] Song, L., et al., *Performance limitation of the full-scale reverse osmosis process*. Journal of Membrane Science, 2003. 214(2): p. 239-244.
- [50] Song, L., et al., *Emergence of thermodynamic restriction and its implications for full-scale reverse osmosis processes*. Desalination, 2003. 155(3): p. 213-228.
- [51] Song, L. and K.G. Tay, *Performance prediction of a long crossflow reverse osmosis membrane*. Journal of Membrane Science, 2006. 281(1-2): p. 163-169.

- [52] Abderrahim, A., *Simulation and analysis of an industrial water desalination plant*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2005. 44(9): p. 999-1004.
- [53] Bartman, A.R., et al., *Minimizing energy consumption in reverse osmosis membrane desalination using optimization-based control*. Journal of Process Control, 2010. 20(10): p. 1261-1269.
- [54] Lu, Y., et al., *Optimum design of reverse osmosis system under different feed concentration and product specification*. Journal of Membrane Science, 2007. 287(2): p. 219-229.
- [55] Voros, N., Z.B. Maroulis, and D. Marinou-Kouris, *Optimization of reverse osmosis networks for seawater desalination*. Computers & Chemical Engineering, 1996. 20(Supplement 1): p. S345-S350.
- [56] Voros, N.G., Z.B. Maroulis, and D. Marinou-Kouris, *Short-cut structural design of reverse osmosis desalination plants*. Journal of Membrane Science, 1997. 127(1): p. 47-68.
- [57] Wessels, L.P., et al., *Innovative design of nano - and ultrafiltration plants*. Desalination, 1998. 119(1-3): p. 341-345.
- [58] Van der Meer, W.G.J., C.W. A. Averink, and J.C. van Dijk, *Mathematical model of nanofiltration systems*. Desalination, 1996. 105(1-2): p. 25-31.
- [59] Maskan, F., et al., *Optimal design of reverse osmosis module networks*. AIChE Journal, 2000. 46(5): p. 946-954.
- [60] See, H.J., V.S. Vassiliadis, and D.I. Wilson, *Optimisation of membrane regeneration scheduling in reverse osmosis networks for seawater desalination*. Desalination, 1999. 125(1-3): p. 37-54.
- [61] Van der Meer, W.G.J., M. Riemersma, and J.C. van Dijk, *Only two membrane modules per pressure vessel? Hydraulic optimization of spiral-wound membrane filtration plants*. Desalination, 1998. 119(1-3): p. 57-64.
- [62] Cardona, E., A. Piacentino, and F. Marchese, *Energy saving in two-stage reverse osmosis systems coupled with ultrafiltration processes*. Desalination, 2005. 184 (1-3): p. 125-137.

- [63] Noronha, M., V. Mavrov, and H. Chmiel, *Simulation model for optimisation of two-stage membrane filtration plants-minimising the specific costs of power consumption*. Journal of Membrane Science, 2002. 202(1-2): p. 217-232.
- [64] Sharif, et al., *A new theoretical approach to estimate the specific energy consumption of reverse osmosis and other pressure-driven liquid-phase membrane processes*. Vol. 3. 2009, L'Aquila, ITALIE: Desalination Publications. 9.
- [65] Malek, A., M.N.A. Hawlader, and J.C. Ho, *Design and economics of RO seawater desalination*. Desalination, 1996. 105(3): p. 245-261.
- [66] Abbas, A. and N. Al-Bastaki, *Modeling of an RO water desalination unit using neural networks*. Chemical Engineering Journal, 2005. 114(1-3): p. 139-143.
- [67] Avlonitis, S.A., M. Pappas, and K. Moutesidis, *A unified model for the detailed investigation of membrane modules and RO plants performance*. Desalination, 2007, 203(1-3): p. 218-228.
- [68] Avlonitis, S.A., *Optimization of the design and operation of seawater RO desalination plants*. Separation Science And Technology, 2005. 40(13): p. 2663-2678.
- [69] Villafafila, A. and I.M. Mujtaba, *Fresh water by reverse osmosis based desalination: simulation and optimisation*. Desalination, 2003. 155(1): p. 1-13.
- [70] Raluy, G., L. Serra, and J. Uche, *Life cycle assessment of MSF, MED and RO desalination technologies*. Energy, 2006. 31(13): p. 2361-2372.
- [71] Sassi, K.M. and I.M. Mujtaba, *Optimal design and operation of reverse osmosis desalination process with membrane fouling*. Chemical Engineering Journal, 2011. 171(2): p. 582-593.
- [72] Khayet, M., C. Cojocaru, and M. Essalhi, *Artificial neural network modeling and response surface methodology of desalination by reverse osmosis*. Journal Of Membrane Science, 2011. 368(1-2): p. 202-214.
- [73] Вороњец, Д., *Основи процесне хемије*, Друго издање, Машински факултет Универзитета у Београду, 1989, (YU ISBN 86-7083-115-5).
- [74] Baker, R., *Membrane Technology and Applications*, 2004, Second Edition, Wiley, Unated States.
- [75] Paul, D.R., *Reformulation of the solution-diffusion theory of reverse osmosis*, Journal of membrane Science, 2004, 241: p.371-381.

- [76] Mulder, M., *Basic Principles of Membrane Technology*. 1997: Kluwer Academic Publishers (Boston).
- [77] Manual, A., *Standard Practice for Standardizing Reverse Osmosis Performance Data*. ASTM international, 2000.
- [78] Arsović M., Topić R., Komatina M., Gojak M.: *Thermodynamical research of using solar energy for desalination of seawater*, Thermal Science Vol 19, No 5, 2015, pp.1709–1721.
- [79] Karode, S.K., *Laminar flow in channels with porous walls, revisited*. Journal of Membrane Science, 2001. 191(1-2): p. 237-241.
- [80] Zhu, A., P.D. Christofides, and Y. Cohen, *Minimization of energy consumption for a two-pass membrane desalination: Effect of energy recovery, membrane rejection and retentate recycling*. Journal of Membrane Science, 2009. 339(1-2): p. 126-137.
- [81] Zydney, A.L., *Stagnant film model for concentration polarization in membrane systems*. Journal of Membrane Science, 1997. 130(1-2): p. 275-281.
- [82] Bartman, A., *Control and Monitoring of Reverse Osmosis Water Desalination*. PhD Dissertation, University of California, Los Angeles, 2011.
- [83] Shrivastava, A., S. Kumar, and E.L. Cussler, *Predicting the effect of membrane spacers on mass transfer*. Journal Of Membrane Science, 2008. 323(2): p. 247-256.
- [84] Lin, N.H., et al., *Crystallization of calcium sulfate on polymeric surfaces*. Journal of Colloid and Interface Science, 2011. 356(2): p. 790-797.
- [85] Lin, N.H., et al., *Polymer surface nano-structuring of reverse osmosis membranes for fouling resistance and improved flux performance*. Journal of Materials Chemistry, 2010. 20(22): p. 4642-4652.
- [86] Kim, M.-m., et al., *Surface nano-structuring of reverse osmosis membranes via atmospheric pressure plasma-induced graft polymerization for reduction of mineral scaling propensity*. Journal Of Membrane Science, 2010. 354(1-2): p. 142-149.
- [87] M. M. Kim, G.T.L., N. H. Lin and Y. Cohen, *Fouling and scaling resistant surface nano-structured membrane*. Provisional Patent Application USA, 2008. No. 61/060,715.
- [88] Cadotte, J.E., et al., *A new thin-film composite seawater reverse osmosis membrane*. Desalination, 1980. 32(0): p. 25-31.

- [89] Jeong, B.-H., et al., *Interfacial polymerization of thin film nanocomposites: A new concept for reverse osmosis membranes*. Journal of Membrane Science, 2007. 294 (1-2): p. 1-7.
- [90] Доступно са: <http://www.nanoh2o.com/technology/competitive-comparison>. Посећен 11.12.2011. у 08.50ч.
- [91] Ferlita, R.R., *In Situ Biofiltration of Dissolved Organic Carbon in Reverse Osmosis Membrane Filtration, in Civil and Environmental Engineering 2011*, University of South Florida: Tampa.
- [92] Kumar, M., S.S. Adham, and W.R. Pearce, *Investigation of Seawater Reverse Osmosis Fouling and Its Relationship To Pretreatment Type*. Environmental Science & Technology, 2006. 40(6): p. 2037-2044.
- [93] Bartels, C.R., et al., *Design considerations for wastewater treatment by reverse osmosis*. Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research, 2005. 51(6-7): p. 473-482.
- [94] Yu Zhao, James S. Taylor, *Assessment of ASTM D 4516 for evaluation of reverse osmosis membrane performance*, Corporation, Tampa, FL, USA.
- [95] Vakili-Nezhaad, Z. Akbari. *A Case Study of Nanofiltration Using an Irreversible Thermodynamics-Based Model*, Department of Petroleum & Chemical Engineering, College of Engineering, Sultan Qaboos University, Oman, institute for Natioscience and Nanotechnology, University of Kashan, Kashan, Iran.
- [96] Станковић, Ј., Ралевић, Н.Р., Љубановић-Ралевић, И. 2002. *Статистика са применом у пољопривреди*, Треће издање, Универзитетски уџбеник, п.462. Савремена администрација, Београд. (ИСБН 86-387-0317-1)
- [97] Garg, H.P. 1987. *Advances in Solar Energy Technology*, vol. 3. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company.
- [98] Boer, K.W. 1990. *Survey of Semiconductor Physics*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- [99] Florida Solar Energy Center. 1991. *Photovoltaic system design*. FSEC-GP-31-86. Cocoa Beach, FL: Florida Solar Energy Center.
- [100] Nijs, j.et. al. 1997. *Energy payback time of crystalline Silicon solar modules*. In Adv. in Sol. Energy, vol. 11, Karl W. Boer, ed. Chapter 6, 291-327.

- [101] Post, H.N., and V.V. Risser. 1995. *Stand-Alone Photovoltaic Systems—A Handbook of Recommended Design Practices*. Albuquerque: Sandia National Lab. Report SAND-87-7023.
- [102] Taylor, M., and J. Kreider. 1998. *Solar Energy Applications*, 3rd ed. Boulder, CO: Univ. of Colorado Bookstore.
- [103] Dallas, S., Sumiyoshi N., Kirk, J., Matthew, K., Wilmot, N., et al. 2009. *Efficiency analysis of the Solarflow an innovative solar-powered desalination unit for treating brackish water*, *Renewable Energy*, 34, 2, pp. 397-400.
- [104] Charles, J.P., Bordure, G., Khoury, A., Miahle, P., et al. 1985. *Consistency of the double exponential model with physical mechanisms of conduction for a solar cell under illumination*, *Journal of Physics D:Applied Physics*, 11, 11, pp. 2261-2268.
- [105] *Insel – Integrated Simulation Software Language MTM data base*, Version 8.0, Insel Inc, 2012.
- [106] Belal Y., Wagdy R.A., et al. 2014. Optimum design of photovoltaic powered sea water desalination system, *International Journal of Scientific & Technology Research*, 12, 3, pp. 165-171.
- [107] Seema, S.S., Arun, M.I., Ismail, A.F., *A review on RO membrane technology: Developments and challenges*, *Desalination*, 2015. Vol. 368, pp. 10-26.
- [108] Roy, Y., Sharqawy, M.H., Lienhard, J.H., *Modeling of Flat-Sheet and Spiral-Wound Nanofiltration Configurations and Its Application in Seawater Nanofiltration*, *J. Membrane Sci.*, 2015. Vol. 493, pp. 630-642.
- [109] Aguinaldo, J.T., Arsovic, M., *Zero Liquid Discharge through Ultra High Lime Softening, Membrane and Thermal Processes*, *Global Water Intelligence Journal*, 2012. Vol 13, No 6, pp. 136-153.
- [110] Aguinaldo, J.T., Arsovic, M., *Integrated Chemical Precipitation and Ultrafiltration Treatment of Process Water*, *World Water Journal*, 2011. Vol 27, No 4, pp. 48-69.
- [111] Hongju, L., Hyunwook, R., Jun, H.L., Jong, O.K., Ju, D.L., Suhan, K., *An optimal design approach of gas hydrate and reverse osmosis hybrid system for seawater desalination*, *Desalination and water treatment*, 2015. Vol. 57, 19, pp. 9009-9017.
- [112] Bourouni, K., T. Ben M'Barek, and A. Al Taei, *Design and optimization of desalination reverse osmosis plants driven by renewable energies using genetic algorithms*. *Renewable Energy*, 2011. 36(3): p. 936-950.

- [113] Masafumi, S., Masahiro, Y., Tomoki, T., Taro, M., Mitsuru, H., Hideto, M., *Effect of operating conditions on osmotic-driven membrane performances of cellulose triacetate forward osmosis hollow fiber membrane*, Desalination, 2015. Vol. 362, pp. 34-42.
- [114] Wei, L.A., Abdul, W.M., Nidal, H., Choe, P.L., *A review on the applicability of integrated/hybrid membrane processes in water treatment and desalination plants*, Desalination, 2015. Vol. 363, pp. 2-18.
- [115] Warsinger, D.E, Swaminathan, J., Guillen, E., Arafat, H.A., Lienhard, J.H., *Scaling and Fouling In Membrane Distillation for Desalination Applications*, Desalination, 2015. Vol.356, pp. 294-313.
- [116] Maria, J.C., Silvia, A.B., Maria, C.V., *Fouling mechanisms of ultrafiltration membranes fouled with whey model solutions*, Desalination, 2014. Vol. 360, pp. 87-96.
- [117] Rahardianto, A., et al., *Diagnostic characterization of gypsum scale formation and control in RO membrane desalination of brackish water*. Journal Of Membrane Science, 2006. 279(1-2): p. 655-668.
- [118] Lee, K.P., T.C. Arnot, and D. Mattia, *A review of reverse osmosis membrane materials for desalination-Development to date and future potential*. Journal Of Membrane Science, 2011. 370(1-2): p. 1-22.
- [119] Zhu, A., P.D. Christofides, and Y. Cohen, *Energy Consumption Optimization of Reverse Osmosis Membrane Water Desalination Subject to Feed Salinity Fluctuation*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009. 48: p. 9581-9589.
- [120] Avlonitis, S., W.T. Hanbury, and M.B. Boudinar, *Spiral wound modules performance an analytical solution: Part II*. Desalination, 1993. 89(3): p. 227-246.
- [121] Peñate, B. and L. García-Rodríguez, *Current trends and future prospects in the design of seawater reverse osmosis desalination technology*. Desalination, 2012. 284(0): p. 1-8.
- [122] Khayet, M., et al., *Optimization of solar-powered reverse osmosis desalination pilot plant using response surface methodology*. Desalination, 2010. 261(3): p. 284-292.

ПРИЛОЗИ

1. Софтвер за статистичку обраду података

За статистичке прорачуне коришћен је софтвер *SPSS Ver. 20.0*. Коришћена је бесплатна верзија програма са ограниченим трајањем од 30 дана. Одговарајућим модулима за анализу грешака је могуће комплетно испитати модел процеса, утврдити одступања од унапред задатог скупа експерименталних података и формирати графичке дијаграме са свим релевантним величинама. Такође, програм поседује бројне статистичке методе за обраду података и анализу резултата.

2. Експериментални резултати запреминског протока пречишћене воде за мембранске модуле: *Nano H₂O QFX SW 75 ES, QFX SW 75 R и DOW SW 30*

Табела 1.а. Експериментални резултати запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул: QFX SW 75 ES

| Број експеримента | Трансмембрански притисак Δp (Pa) | Температура морске воде T_f (K) | Степен корисности процеса γ бездименз. | Концентрација соли морске воде C_f (mg/l) | Концентрација соли пречишћене воде C_p (mg/l) | Запремински проток пречишћ. воде добијен експериментом $Q_{p\text{пор}}$ ($l/m^2 \cdot h$) | Специфична потрошња енергије добијена експериментом SEC ($kWh/m^3/10^5 \cdot mg/l$) |
|-------------------|---|--------------------------------------|--|--|--|---|--|
| | | | | | | | |
| 1. | 4101381 | 297,2 | 0,469 | 32,847 | 641 | 14,457 | 0,841 |
| 2. | 4123263 | 297,1 | 0,470 | 33,307 | 655 | 14,547 | 0,828 |
| 3. | 4232205 | 294,3 | 0,468 | 32,232 | 554 | 14,459 | 0,884 |
| 4. | 4147420 | 294,9 | 0,459 | 32,807 | 603 | 14,179 | 0,868 |
| 5. | 4068611 | 295,1 | 0,454 | 32,901 | 620 | 14,234 | 0,860 |
| 6. | 4064485 | 295,2 | 0,454 | 32,917 | 616 | 14,233 | 0,859 |
| 7. | 4077009 | 295,7 | 0,449 | 33,642 | 678 | 13,977 | 0,850 |
| 8. | 4111818 | 295,5 | 0,452 | 33,516 | 651 | 14,163 | 0,857 |
| 9. | 4117320 | 295,8 | 0,453 | 33,674 | 652 | 14,260 | 0,855 |
| 10. | 4109083 | 295,9 | 0,452 | 33,762 | 660 | 14,220 | 0,858 |
| 11. | 4107467 | 296,2 | 0,453 | 33,966 | 675 | 14,241 | 0,852 |
| 12. | 4021236 | 297,0 | 0,447 | 34,547 | 766 | 13,759 | 0,824 |
| 13. | 4108162 | 296,8 | 0,454 | 34,512 | 723 | 14,276 | 0,835 |
| 14. | 4129374 | 296,9 | 0,454 | 34,688 | 721 | 14,275 | 0,834 |
| 15. | 4156524 | 296,9 | 0,454 | 34,724 | 707 | 14,308 | 0,832 |
| 16. | 4172867 | 297,0 | 0,453 | 34,899 | 714 | 14,309 | 0,833 |
| 17. | 4153742 | 297,1 | 0,453 | 34,936 | 726 | 14,271 | 0,831 |
| 18. | 4119956 | 298,2 | 0,454 | 35,526 | 789 | 14,247 | 0,813 |
| 19. | 4127285 | 298,1 | 0,455 | 35,423 | 769 | 14,321 | 0,817 |
| 20. | 4101747 | 297,8 | 0,452 | 35,193 | 781 | 14,133 | 0,810 |
| 21. | 4137610 | 297,1 | 0,455 | 34,664 | 729 | 14,296 | 0,823 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|---------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 22. | 4473167 | 298,7 | 0,487 | 36,073 | 760 | 16,122 | 0,809 |
| 23. | 4351890 | 298,5 | 0,476 | 36,140 | 802 | 15,469 | 0,801 |
| 24. | 4364008 | 298,1 | 0,476 | 36,193 | 790 | 15,467 | 0,801 |
| 25. | 4360157 | 298,6 | 0,476 | 36,840 | 856 | 15,459 | 0,782 |
| 26. | 4399086 | 298,2 | 0,476 | 36,504 | 804 | 15,512 | 0,798 |
| 27. | 4432880 | 297,2 | 0,475 | 35,935 | 754 | 15,472 | 0,818 |
| 28. | 4461783 | 296,5 | 0,474 | 35,636 | 724 | 15,596 | 0,839 |
| 29. | 4473636 | 297,3 | 0,473 | 35,946 | 769 | 15,407 | 0,830 |
| 30. | 4500907 | 296,9 | 0,474 | 35,730 | 739 | 15,811 | 0,840 |
| 31. | 4490218 | 297,3 | 0,474 | 35,935 | 758 | 15,445 | 0,833 |
| 32. | 4539694 | 295,6 | 0,476 | 34,495 | 690 | 15,711 | 0,869 |
| 33. | 4558503 | 295,9 | 0,475 | 34,144 | 669 | 15,852 | 0,879 |
| 34. | 4586323 | 296,6 | 0,477 | 34,715 | 704 | 16,098 | 0,868 |
| 35. | 4611217 | 296,6 | 0,475 | 35,375 | 719 | 16,167 | 0,866 |
| 36. | 4592369 | 297,4 | 0,477 | 35,821 | 749 | 15,558 | 0,847 |
| 37. | 4611095 | 298,1 | 0,476 | 38,601 | 925 | 16,420 | 0,780 |
| 38. | 4674657 | 298,2 | 0,476 | 39,069 | 976 | 16,478 | 0,788 |
| 39. | 4584164 | 298,2 | 0,475 | 38,860 | 961 | 16,348 | 0,800 |
| 40. | 5005070 | 299,5 | 0,504 | 38,945 | 992 | 18,244 | 0,803 |
| 41. | 5099053 | 298,2 | 0,507 | 38,501 | 935 | 18,071 | 0,821 |
| 42. | 5122394 | 298,2 | 0,506 | 38,109 | 886 | 18,098 | 0,838 |
| 43. | 5099142 | 299,0 | 0,507 | 37,507 | 869 | 18,539 | 0,843 |
| 44. | 5005924 | 301,6 | 0,508 | 38,490 | 967 | 18,879 | 0,806 |
| 45. | 5028068 | 300,0 | 0,508 | 38,831 | 972 | 18,487 | 0,803 |
| 46. | 5040961 | 300,7 | 0,507 | 39,269 | 995 | 18,722 | 0,798 |
| 47. | 5053277 | 301,2 | 0,506 | 39,450 | 996 | 18,891 | 0,802 |
| 48. | 5078686 | 301,2 | 0,505 | 38,810 | 942 | 19,065 | 0,814 |
| 49. | 4013969 | 301,9 | 0,506 | 34,502 | 1.028 | 15,122 | 0,720 |
| 50. | 3976387 | 301,8 | 0,510 | 34,090 | 989 | 14,987 | 0,713 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|---------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 51. | 3980765 | 301,1 | 0,499 | 33,830 | 957 | 14,785 | 0,733 |
| 52. | 3991627 | 300,6 | 0,498 | 33,325 | 909 | 14,743 | 0,745 |
| 53. | 3709737 | 303,3 | 0,463 | 31,682 | 836 | 14,322 | 0,783 |
| 54. | 3720758 | 303,1 | 0,463 | 31,300 | 807 | 14,325 | 0,794 |
| 55. | 3740106 | 303,0 | 0,464 | 31,179 | 797 | 14,387 | 0,804 |
| 56. | 3764727 | 302,6 | 0,463 | 30,974 | 781 | 14,356 | 0,820 |
| 57. | 3247391 | 302,3 | 0,435 | 28,033 | 682 | 12,328 | 0,835 |
| 58. | 4075569 | 286,2 | 0,469 | 28,623 | 460 | 12,335 | 0,954 |
| 59. | 3389434 | 301,8 | 0,417 | 32,330 | 908 | 12,657 | 0,791 |
| 60. | 3242862 | 299,4 | 0,470 | 27,431 | 729 | 11,769 | 0,818 |
| 61. | 4732709 | 301,2 | 0,473 | 40,256 | 1.094 | 17,611 | 0,779 |

Табела 1.6. Експериментални резултати запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул: QFX SW 75 R

| Број експеримента | Трансмембрански приписак Δp | Температура морске воде T_f | Степен корисности процеса Y | Концентрација соли морске воде C_f | Концентрација соли пречишћене воде C_p | Запремински проток пречишћ. воде добијен експериментом $Q_{p\text{пор}}$ | Специфична потрошња енергије добијена експериментом SEC |
|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--|--|---|
| | (Pa) | (K) | бездименз. | (mg/l) | (mg/l) | $(l/m^2 \cdot h)$ | $(kWh/m^3/10^5 \cdot mg/l)$ |
| <i>l</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> | <i>7</i> | <i>8</i> |
| 1. | 4398844 | 296,4 | 0,462 | 33,830 | 289 | 13,087 | 0,930 |
| 2. | 4400894 | 296,7 | 0,461 | 33,926 | 289 | 13,150 | 0,929 |
| 3. | 4423777 | 296,6 | 0,461 | 34,086 | 287 | 13,172 | 0,931 |
| 4. | 4371457 | 297,5 | 0,461 | 34,181 | 325 | 13,119 | 0,914 |
| 5. | 4384377 | 296,9 | 0,461 | 34,109 | 305 | 13,158 | 0,916 |
| 6. | 4404500 | 295,1 | 0,460 | 34,109 | 287 | 13,014 | 0,919 |
| 7. | 4423078 | 297,0 | 0,459 | 34,653 | 303 | 13,182 | 0,914 |
| 8. | 4419631 | 297,0 | 0,460 | 34,627 | 302 | 13,174 | 0,913 |
| 9. | 4425903 | 297,3 | 0,460 | 34,732 | 304 | 13,176 | 0,910 |
| 10. | 4392773 | 297,6 | 0,461 | 34,535 | 312 | 13,152 | 0,906 |
| 11. | 4383511 | 298,3 | 0,461 | 34,328 | 315 | 13,135 | 0,903 |
| 12. | 4397869 | 298,4 | 0,461 | 34,433 | 318 | 13,239 | 0,902 |
| 13. | 4437766 | 297,0 | 0,460 | 34,524 | 298 | 13,178 | 0,912 |
| 14. | 4442916 | 295,1 | 0,459 | 34,454 | 274 | 13,108 | 0,915 |
| 15. | 4500518 | 294,9 | 0,459 | 34,619 | 261 | 13,187 | 0,920 |
| 16. | 4523006 | 295,5 | 0,458 | 34,656 | 275 | 13,358 | 0,928 |
| 17. | 4538890 | 295,6 | 0,458 | 34,833 | 272 | 13,427 | 0,928 |
| 18. | 4600388 | 296,3 | 0,463 | 34,985 | 280 | 13,679 | 0,925 |
| 19. | 4620924 | 296,3 | 0,468 | 34,853 | 274 | 13,804 | 0,923 |
| 20. | 4616789 | 296,6 | 0,468 | 34,856 | 285 | 13,762 | 0,924 |
| 21. | 4630312 | 297,2 | 0,468 | 35,205 | 306 | 13,835 | 0,915 |
| 22. | 4670030 | 297,0 | 0,468 | 35,235 | 296 | 13,944 | 0,921 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|---------|-------|-------|--------|-----|--------|-------|
| 23. | 4679492 | 297,2 | 0,469 | 35,187 | 292 | 14,012 | 0,924 |
| 24. | 4672482 | 297,3 | 0,467 | 35,246 | 296 | 13,998 | 0,928 |
| 25. | 4631498 | 298,8 | 0,472 | 35,319 | 352 | 14,053 | 0,902 |
| 26. | 4634401 | 298,6 | 0,471 | 35,391 | 350 | 14,003 | 0,905 |
| 27. | 4663898 | 298,7 | 0,471 | 35,594 | 354 | 14,098 | 0,907 |
| 28. | 4841563 | 299,8 | 0,445 | 37,116 | 394 | 14,772 | 0,985 |

Табела 1. в. Експериментални резултати запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул: DOW SW 30

| Број експеримента | Трансмембрански притисак ΔP | Температура морске воде T_f | Степен корисности процеса Y | Концентрација соли морске воде C_f | Концентрација соли пречишћене воде C_p | Запремински проток пречишћ. воде добијен експериментом $Q_{p\text{пор}}$ | Специфична потрошња енергије добијена експериментом SEC |
|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--|--|---|
| | (Pa) | (K) | бездименз. | (mg/l) | (mg/l) | (l/m ² · h) | (kWh/m ³ /10 ⁵ · mg/l) |
| 1 | | | | | | | |
| 1. | 4580896 | 299,6 | 0,472 | 35,398 | 291 | 15,050 | 0,888 |
| 2. | 4607605 | 299,5 | 0,471 | 35,441 | 278 | 15,112 | 0,891 |
| 3. | 4609032 | 299,0 | 0,471 | 35,328 | 270 | 15,039 | 0,895 |
| 4. | 4605526 | 299,2 | 0,472 | 35,365 | 284 | 15,037 | 0,887 |
| 5. | 4640430 | 298,7 | 0,470 | 35,468 | 272 | 15,144 | 0,898 |
| 6. | 4645575 | 299,4 | 0,472 | 35,709 | 299 | 15,201 | 0,882 |
| 7. | 4644975 | 299,4 | 0,471 | 35,596 | 290 | 15,206 | 0,891 |
| 8. | 4674721 | 299,5 | 0,472 | 35,603 | 288 | 15,328 | 0,893 |
| 9. | 5047982 | 298,9 | 0,496 | 36,229 | 282 | 16,514 | 0,896 |
| 10. | 5088825 | 298,7 | 0,496 | 36,313 | 272 | 16,627 | 0,899 |
| 11. | 5135894 | 298,5 | 0,495 | 36,508 | 263 | 16,768 | 0,912 |
| 12. | 5128096 | 299,2 | 0,496 | 36,666 | 287 | 16,814 | 0,895 |
| 13. | 5130229 | 298,8 | 0,495 | 36,611 | 278 | 16,798 | 0,900 |
| 14. | 5136086 | 299,0 | 0,496 | 36,635 | 281 | 16,829 | 0,902 |
| 15. | 5137312 | 299,0 | 0,496 | 36,677 | 289 | 16,819 | 0,898 |
| 16. | 5132596 | 299,3 | 0,495 | 36,703 | 289 | 16,839 | 0,893 |
| 17. | 5176724 | 298,8 | 0,496 | 36,742 | 278 | 16,937 | 0,901 |
| 18. | 5170381 | 297,5 | 0,496 | 36,419 | 255 | 16,752 | 0,912 |
| 19. | 5219306 | 296,0 | 0,494 | 36,081 | 218 | 16,748 | 0,928 |
| 20. | 5217094 | 298,4 | 0,495 | 36,597 | 261 | 17,156 | 0,911 |
| 21. | 5202261 | 298,2 | 0,495 | 36,369 | 255 | 16,959 | 0,911 |
| 22. | 5197258 | 298,9 | 0,496 | 36,439 | 269 | 17,021 | 0,915 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|---------|-------|-------|--------|-----|--------|-------|
| 23. | 5176347 | 298,9 | 0,496 | 36,415 | 277 | 16,876 | 0,915 |
| 24. | 5256611 | 301,0 | 0,494 | 37,037 | 313 | 17,486 | 0,917 |
| 25. | 5252379 | 300,5 | 0,495 | 37,149 | 329 | 17,398 | 0,901 |
| 26. | 5258635 | 300,4 | 0,495 | 37,101 | 325 | 17,456 | 0,904 |
| 27. | 5259232 | 300,3 | 0,495 | 37,074 | 332 | 17,412 | 0,906 |
| 28. | 5239402 | 301,9 | 0,495 | 37,338 | 378 | 17,531 | 0,892 |
| 29. | 5201865 | 300,1 | 0,495 | 37,205 | 358 | 17,176 | 0,898 |
| 30. | 5242154 | 301,7 | 0,494 | 37,578 | 382 | 17,697 | 0,908 |
| 31. | 5336323 | 300,0 | 0,493 | 37,535 | 343 | 17,703 | 0,917 |
| 32. | 5286575 | 299,1 | 0,490 | 37,719 | 371 | 17,390 | 0,913 |
| 33. | 5327189 | 299,8 | 0,493 | 37,780 | 366 | 17,561 | 0,914 |
| 34. | 5347534 | 300,0 | 0,494 | 37,673 | 348 | 17,659 | 0,919 |
| 35. | 5226057 | 301,2 | 0,494 | 37,485 | 399 | 17,398 | 0,897 |
| 36. | 5297903 | 300,7 | 0,493 | 37,561 | 372 | 17,581 | 0,915 |
| 37. | 5349252 | 300,4 | 0,492 | 37,567 | 354 | 17,637 | 0,924 |
| 38. | 5370486 | 301,3 | 0,492 | 37,747 | 380 | 17,911 | 0,930 |
| 39. | 5423220 | 301,1 | 0,491 | 37,715 | 363 | 18,074 | 0,939 |
| 40. | 5440200 | 301,3 | 0,490 | 37,721 | 367 | 18,179 | 0,943 |
| 41. | 5433998 | 302,4 | 0,491 | 37,948 | 399 | 18,279 | 0,941 |
| 42. | 5440887 | 301,6 | 0,490 | 37,908 | 391 | 18,260 | 0,941 |
| 43. | 5459053 | 302,4 | 0,490 | 37,879 | 386 | 18,371 | 0,944 |
| 44. | 5477359 | 303,8 | 0,489 | 37,850 | 393 | 18,672 | 0,948 |
| 45. | 5501700 | 303,8 | 0,488 | 37,850 | 393 | 18,786 | 0,956 |
| 46. | 5465718 | 301,9 | 0,488 | 37,881 | 399 | 18,331 | 0,957 |
| 47. | 5476053 | 301,8 | 0,487 | 37,900 | 397 | 18,357 | 0,956 |
| 48. | 5472816 | 300,8 | 0,486 | 37,593 | 376 | 18,221 | 0,966 |
| 49. | 5464612 | 301,2 | 0,485 | 37,246 | 367 | 18,297 | 0,977 |
| 50. | 3867096 | 304,2 | 0,480 | 28,746 | 464 | 13,146 | 0,911 |

3. Резултати запреминског протока пречишћене воде сопственог теоријског модела и теоријских модела аутора *Mulder, Taylor & Zhao* и *Vakili-Nezhaad* за мембранске модуле: *Nano H₂O QFX SW 75 ES, QFX SW 75 R* и *DOW SW 30*

Табела 2..а.Резултати запреминског протока пречишћене воде сопственог теоријског модела и теоријских модела аутора *Mulder, Taylor & Zhao* и *Vakili-Nezhaad* за мембрански модул: QFX SW 75 ES

| Број експеримента | Запремински проток пречишћене воде добијен експериментом $Q_{p\text{пор}}$ | Запремински проток пречишћене воде по сопственом теоријском моделу | Запремински проток пречишћене воде по теоријском моделу аутора <i>Mulder M.</i> | Запремински проток пречишћене воде по теоријском моделу аутора <i>Taylor & Zhao</i> | Запремински проток пречишћене воде по теоријском моделу аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> |
|-------------------|--|--|---|---|--|
| | l/m ² h | l/m ² h | l/m ² h | l/m ² h | l/m ² h |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1. | 14,457 | 14,473 | 14,961 | 14,627 | 15,343 |
| 2. | 14,547 | 14,508 | 15,033 | 14,637 | 15,420 |
| 3. | 14,459 | 14,355 | 15,484 | 13,877 | 15,864 |
| 4. | 14,179 | 14,167 | 15,140 | 13,829 | 15,526 |
| 5. | 14,234 | 13,921 | 14,833 | 13,631 | 15,219 |
| 6. | 14,233 | 13,923 | 14,816 | 13,651 | 15,202 |
| 7. | 13,977 | 14,054 | 14,845 | 13,883 | 15,238 |
| 8. | 14,163 | 14,130 | 14,983 | 13,904 | 15,376 |
| 9. | 14,260 | 14,205 | 15,000 | 14,039 | 15,394 |
| 10. | 14,220 | 14,198 | 14,965 | 14,060 | 15,360 |
| 11. | 14,241 | 14,255 | 14,954 | 14,187 | 15,350 |
| 12. | 13,759 | 14,071 | 14,604 | 14,165 | 15,006 |
| 13. | 14,276 | 14,370 | 14,941 | 14,440 | 15,343 |
| 14. | 14,275 | 14,463 | 15,018 | 14,551 | 15,422 |
| 15. | 14,308 | 14,549 | 15,122 | 14,620 | 15,527 |
| 16. | 14,309 | 14,628 | 15,181 | 14,723 | 15,587 |
| 17. | 14,271 | 14,594 | 15,106 | 14,729 | 15,512 |
| 18. | 14,247 | 14,667 | 14,959 | 15,039 | 15,370 |
| 19. | 14,321 | 14,687 | 14,990 | 15,049 | 15,400 |
| 20. | 14,133 | 14,517 | 14,897 | 14,789 | 15,305 |
| 21. | 14,296 | 14,523 | 15,051 | 14,641 | 15,454 |
| 22. | 16,122 | 16,104 | 16,310 | 16,655 | 16,727 |
| 23. | 15,469 | 15,585 | 15,839 | 16,061 | 16,257 |
| 24. | 15,467 | 15,536 | 15,885 | 15,915 | 16,304 |
| 25. | 15,459 | 15,617 | 15,852 | 16,128 | 16,277 |
| 26. | 15,512 | 15,686 | 16,012 | 16,094 | 16,434 |
| 27. | 15,472 | 15,623 | 16,158 | 15,803 | 16,576 |

| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 28. | 15,596 | 15,572 | 16,278 | 15,575 | 16,694 |
| 29. | 15,407 | 15,786 | 16,316 | 15,969 | 16,733 |
| 30. | 15,811 | 15,803 | 16,427 | 15,887 | 16,843 |
| 31. | 15,445 | 15,844 | 16,380 | 16,021 | 16,798 |
| 32. | 15,711 | 15,702 | 16,612 | 15,487 | 17,015 |
| 33. | 15,852 | 15,849 | 16,694 | 15,688 | 17,093 |
| 34. | 16,098 | 16,088 | 16,786 | 16,085 | 17,191 |
| 35. | 16,167 | 16,168 | 16,864 | 16,178 | 17,276 |
| 36. | 15,558 | 16,265 | 16,779 | 16,470 | 17,195 |
| 37. | 16,420 | 16,418 | 16,774 | 16,838 | 17,221 |
| 38. | 16,478 | 16,676 | 17,007 | 17,131 | 17,459 |
| 39. | 16,348 | 16,322 | 16,663 | 16,763 | 17,112 |
| 40. | 18,244 | 18,267 | 18,289 | 19,124 | 18,737 |
| 41. | 18,071 | 18,282 | 18,665 | 18,754 | 19,111 |
| 42. | 18,098 | 18,395 | 18,766 | 18,869 | 19,207 |
| 43. | 18,539 | 18,547 | 18,693 | 19,246 | 19,125 |
| 44. | 18,879 | 18,859 | 18,305 | 20,356 | 18,743 |
| 45. | 18,487 | 18,492 | 18,381 | 19,502 | 18,827 |
| 46. | 18,722 | 18,716 | 18,419 | 19,940 | 18,868 |
| 47. | 18,891 | 18,897 | 18,462 | 20,277 | 18,912 |
| 48. | 19,065 | 19,050 | 18,578 | 20,450 | 19,020 |
| 49. | 15,122 | 15,048 | 14,577 | 16,367 | 14,969 |
| 50. | 14,987 | 14,876 | 14,443 | 16,155 | 14,831 |
| 51. | 14,785 | 14,775 | 14,467 | 15,873 | 14,853 |
| 52. | 14,743 | 14,712 | 14,523 | 15,662 | 14,904 |
| 53. | 14,322 | 14,254 | 13,478 | 15,763 | 13,835 |
| 54. | 14,325 | 14,270 | 13,531 | 15,725 | 13,885 |
| 55. | 14,387 | 14,341 | 13,609 | 15,785 | 13,962 |
| 56. | 14,356 | 14,354 | 13,710 | 15,689 | 14,061 |
| 57. | 12,328 | 12,300 | 11,790 | 13,372 | 12,108 |
| 58. | 12,335 | 12,338 | 14,978 | 10,582 | 15,328 |
| 59. | 12,657 | 12,654 | 12,220 | 13,682 | 12,588 |
| 60. | 11,769 | 11,764 | 11,789 | 12,292 | 12,104 |
| 61. | 17,611 | 17,609 | 17,199 | 18,886 | 17,658 |

Табела 2.6. Резултати запреминског протока пречишћене воде сопственог теоријског модела и теоријских модела аутора *Mulder, Taylor & Zhao* и *Vakili-Nezhaad* за мембрански модул: *QFX SW 75 R*

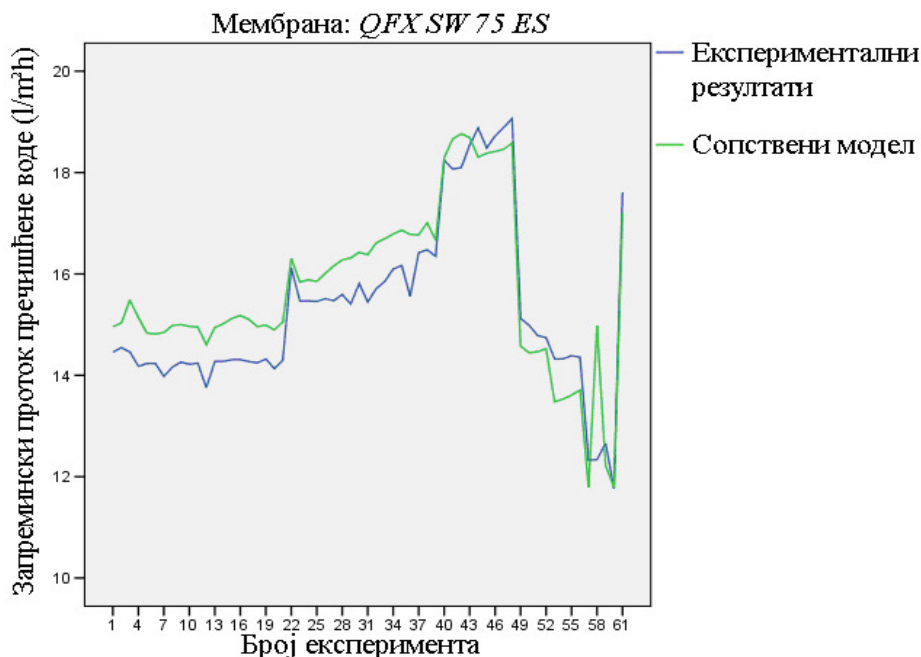
| Број експеримента | Запремински проток пречишћене воде добијен експериментом $Q_{p\text{ nor}}$ | Запремински проток пречишћене воде по сопственом теоријском моделу | Запремински проток пречишћене воде по теоријском моделу аутора <i>Mulder M.</i> | Запремински проток пречишћене воде по теоријском моделу аутора <i>Taylor & Zhao</i> | Запремински проток пречишћене воде по теоријском моделу аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> |
|-------------------|---|--|---|---|--|
| | l/m^2h | l/m^2h | l/m^2h | l/m^2h | l/m^2h |
| 1. | 13,087 | 13,071 | 13,504 | 12,876 | 13,840 |
| 2. | 13,150 | 13,107 | 13,508 | 13,002 | 13,844 |
| 3. | 13,172 | 13,171 | 13,579 | 13,051 | 13,917 |
| 4. | 13,119 | 13,081 | 13,406 | 13,211 | 13,744 |
| 5. | 13,158 | 13,064 | 13,450 | 13,011 | 13,788 |
| 6. | 13,014 | 12,955 | 13,515 | 12,395 | 13,856 |
| 7. | 13,182 | 13,186 | 13,563 | 13,171 | 13,906 |
| 8. | 13,174 | 13,172 | 13,552 | 13,146 | 13,895 |
| 9. | 13,176 | 13,218 | 13,570 | 13,280 | 13,914 |
| 10. | 13,152 | 13,145 | 13,467 | 13,295 | 13,808 |
| 11. | 13,135 | 13,239 | 13,442 | 13,553 | 13,780 |
| 12. | 13,239 | 13,249 | 13,486 | 13,658 | 13,825 |
| 13. | 13,178 | 13,181 | 13,614 | 13,207 | 13,956 |
| 14. | 13,108 | 13,075 | 13,632 | 12,532 | 13,976 |
| 15. | 13,187 | 13,232 | 13,816 | 12,617 | 14,162 |
| 16. | 13,358 | 13,360 | 13,888 | 12,904 | 14,233 |
| 17. | 13,427 | 13,420 | 13,935 | 13,001 | 14,282 |
| 18. | 13,679 | 13,672 | 14,132 | 13,440 | 14,479 |
| 19. | 13,804 | 13,750 | 14,201 | 13,528 | 14,548 |
| 20. | 13,762 | 13,759 | 14,188 | 13,630 | 14,534 |
| 21. | 13,835 | 13,848 | 14,224 | 13,884 | 14,572 |
| 22. | 13,944 | 13,952 | 14,352 | 13,922 | 14,701 |
| 23. | 14,012 | 14,014 | 14,384 | 14,070 | 14,732 |
| 24. | 13,998 | 14,001 | 14,360 | 14,088 | 14,708 |
| 25. | 14,053 | 13,997 | 14,225 | 14,574 | 14,572 |
| 26. | 14,003 | 13,996 | 14,233 | 14,474 | 14,580 |
| 27. | 14,098 | 14,096 | 14,324 | 14,607 | 14,673 |
| 28. | 14,772 | 14,776 | 14,865 | 15,672 | 15,228 |

Табела 2.в. Резултати запреминског протока пречишћене воде сопственог теоријског модела и теоријских модела аутора *Mulder, Taylor & Zhao* и *Vakili-Nezhaad* за мембрански модул: *DOW SW 30*

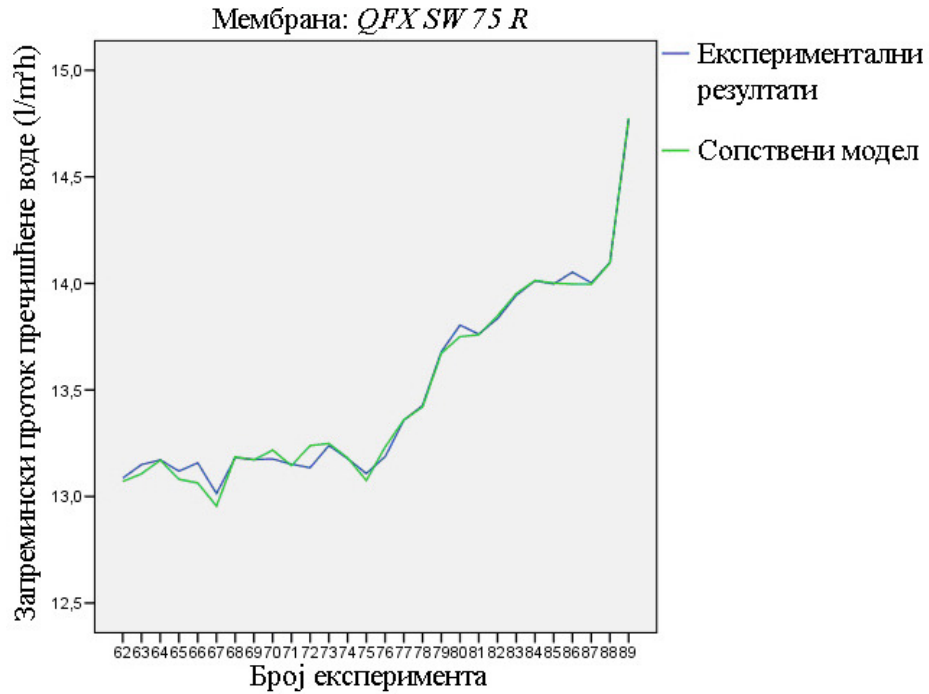
| Број експеримента | Запремински проток пречишћене воде добијен експериментом $Q_{p\ nor}$ | Запремински проток пречишћене воде по сопственом теоријском моделу | Запремински проток пречишћене воде по теоријском моделу аутора <i>Mulder M.</i> | Запремински проток пречишћене воде по теоријском моделу аутора <i>Taylor & Zhao</i> | Запремински проток пречишћене воде по теоријском моделу аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> |
|-------------------|---|--|---|---|--|
| | l/m ² h | l/m ² h | l/m ² h | l/m ² h | l/m ² h |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1. | 15,050 | 15,000 | 15,140 | 15,884 | 15,513 |
| 2. | 15,112 | 15,040 | 15,232 | 15,930 | 15,606 |
| 3. | 15,039 | 15,030 | 15,240 | 15,682 | 15,614 |
| 4. | 15,037 | 15,038 | 15,227 | 15,764 | 15,600 |
| 5. | 15,144 | 15,109 | 15,347 | 15,678 | 15,722 |
| 6. | 15,201 | 15,150 | 15,358 | 16,029 | 15,735 |
| 7. | 15,206 | 15,203 | 15,359 | 16,036 | 15,735 |
| 8. | 15,328 | 15,315 | 15,463 | 16,179 | 15,838 |
| 9. | 16,514 | 16,509 | 16,754 | 17,200 | 17,137 |
| 10. | 16,627 | 16,660 | 16,895 | 17,243 | 17,279 |
| 11. | 16,768 | 16,702 | 17,054 | 17,311 | 17,441 |
| 12. | 16,814 | 16,789 | 17,023 | 17,618 | 17,410 |
| 13. | 16,798 | 16,780 | 17,032 | 17,458 | 17,419 |
| 14. | 16,829 | 16,821 | 17,052 | 17,572 | 17,439 |
| 15. | 16,819 | 16,822 | 17,055 | 17,568 | 17,443 |
| 16. | 16,839 | 16,848 | 17,038 | 17,727 | 17,425 |
| 17. | 16,937 | 16,934 | 17,191 | 17,608 | 17,580 |
| 18. | 16,752 | 16,760 | 17,177 | 16,928 | 17,565 |
| 19. | 16,748 | 16,752 | 17,357 | 16,347 | 17,744 |
| 20. | 17,156 | 17,031 | 17,336 | 17,542 | 17,724 |
| 21. | 16,959 | 16,957 | 17,290 | 17,374 | 17,676 |
| 22. | 17,021 | 17,032 | 17,271 | 17,748 | 17,656 |
| 23. | 16,876 | 16,958 | 17,198 | 17,669 | 17,583 |
| 24. | 17,486 | 17,488 | 17,464 | 19,074 | 17,851 |
| 25. | 17,398 | 17,410 | 17,446 | 18,806 | 17,836 |
| 26. | 17,456 | 17,412 | 17,469 | 18,732 | 17,859 |
| 27. | 17,412 | 17,414 | 17,472 | 18,733 | 17,861 |
| 28. | 17,531 | 17,530 | 17,396 | 19,504 | 17,785 |
| 29. | 17,176 | 17,178 | 17,268 | 18,397 | 17,659 |
| 30. | 17,697 | 17,514 | 17,399 | 19,428 | 17,791 |
| 31. | 17,703 | 17,633 | 17,730 | 18,835 | 18,125 |
| 32. | 17,390 | 17,338 | 17,551 | 18,158 | 17,949 |
| 33. | 17,561 | 17,565 | 17,692 | 18,680 | 18,089 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 34. | 17,659 | 17,657 | 17,766 | 18,826 | 18,162 |
| 35. | 17,398 | 17,391 | 17,345 | 19,070 | 17,737 |
| 36. | 17,581 | 17,588 | 17,595 | 19,087 | 17,989 |
| 37. | 17,637 | 17,804 | 17,774 | 19,062 | 18,169 |
| 38. | 17,911 | 17,913 | 17,844 | 19,660 | 18,239 |
| 39. | 18,074 | 18,080 | 18,030 | 19,760 | 18,424 |
| 40. | 18,179 | 18,176 | 18,089 | 19,974 | 18,483 |
| 41. | 18,279 | 18,282 | 18,061 | 20,553 | 18,456 |
| 42. | 18,260 | 18,209 | 18,087 | 20,136 | 18,482 |
| 43. | 18,371 | 18,376 | 18,151 | 20,651 | 18,545 |
| 44. | 18,672 | 18,649 | 18,216 | 21,654 | 18,607 |
| 45. | 18,786 | 18,739 | 18,301 | 21,755 | 18,692 |
| 46. | 18,331 | 18,338 | 18,174 | 20,393 | 18,569 |
| 47. | 18,357 | 18,369 | 18,210 | 20,403 | 18,605 |
| 48. | 18,221 | 18,226 | 18,206 | 19,771 | 18,600 |
| 49. | 18,297 | 18,270 | 18,186 | 20,011 | 18,576 |
| 50. | 13,146 | 13,012 | 12,810 | 15,387 | 13,106 |

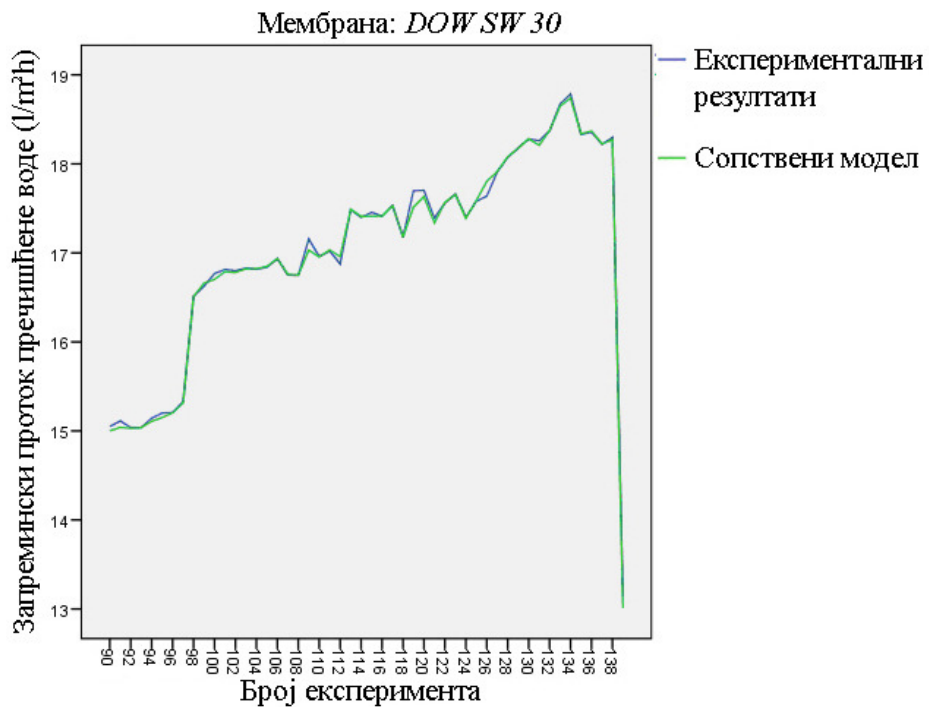
4. Упоредни приказ резултата теоријских модела и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембранске модуле *QFX SW 75 ES*: *Nano H₂O QFX SW 75 ES*, *QFX SW 75 R* и *DOW SW 30*



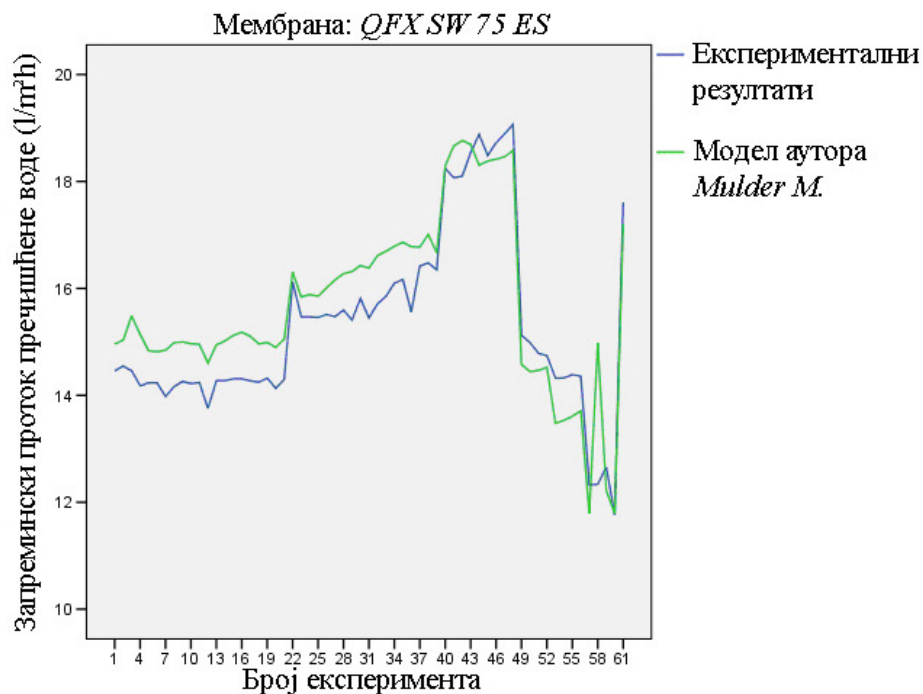
Слика 1.а. Упоредни приказ резултата сопственог теоријског модела и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 ES*



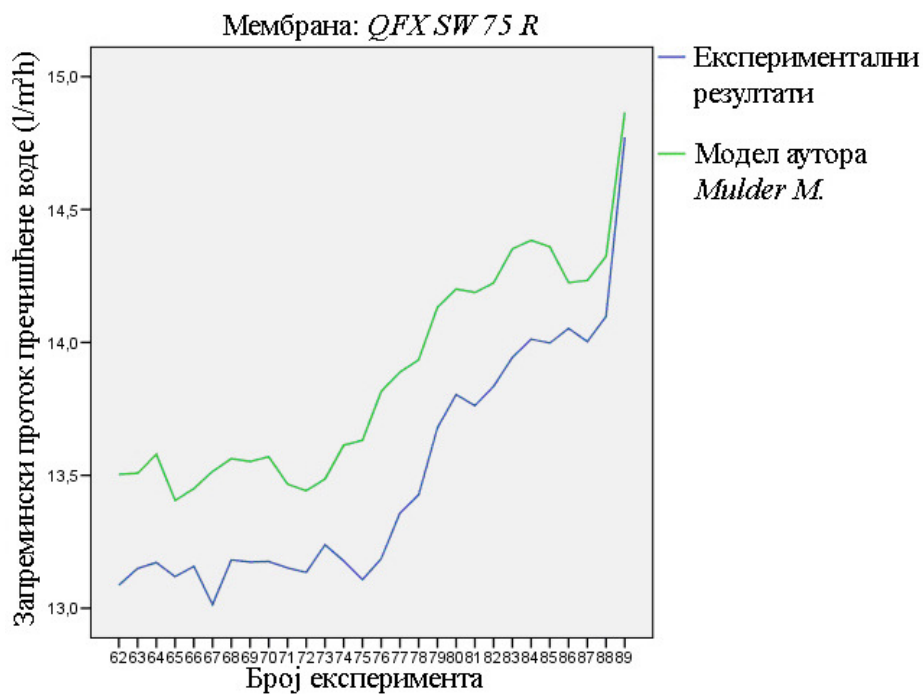
Слика 1.б. Упоредни приказ резултата сопственог теоријског модела и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 R*



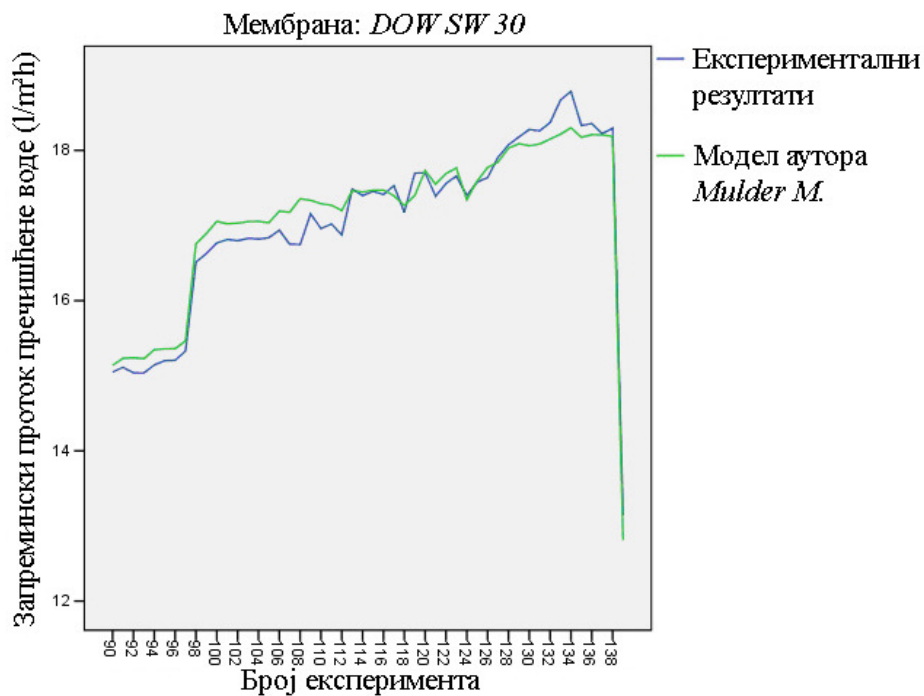
Слика 1.в. Упоредни приказ резултата сопственог теоријског модела и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *DOW SW 30*



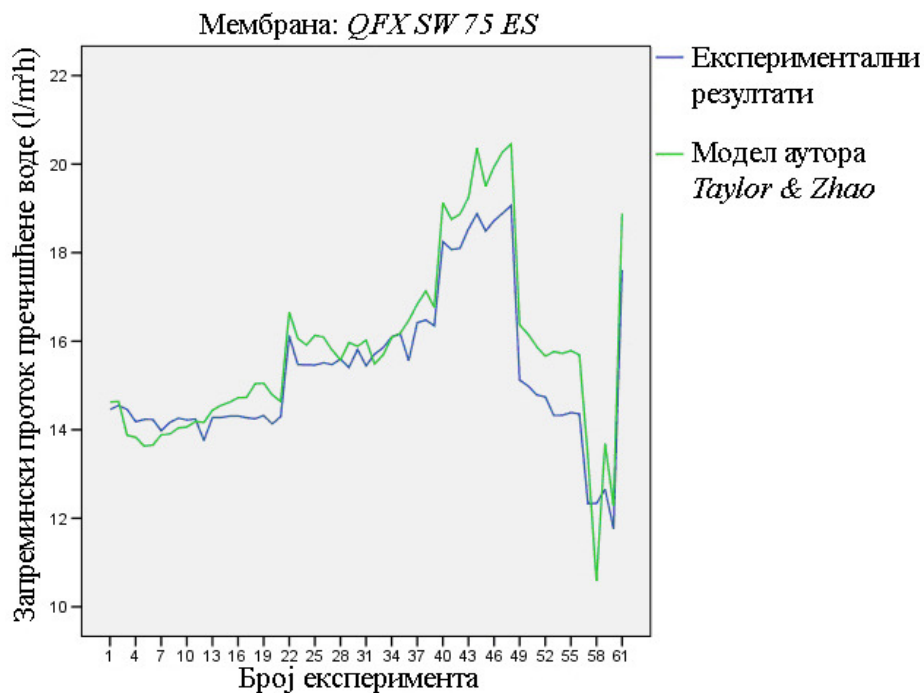
Слика 2.а. Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора *Mulder M.* и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 ES*



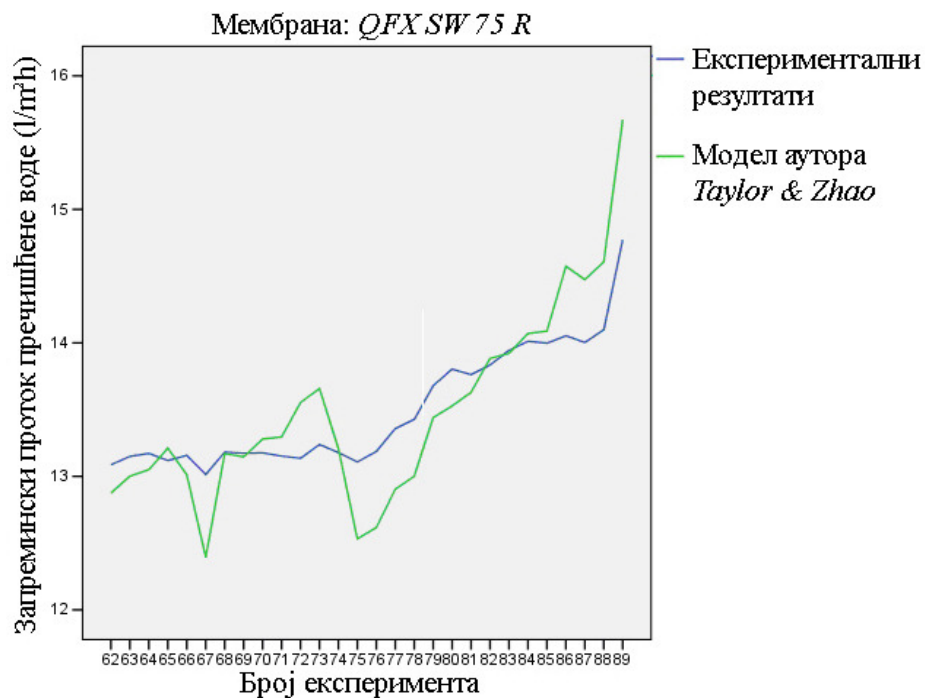
Слика 2.б. Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора *Mulder M.* и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 R*



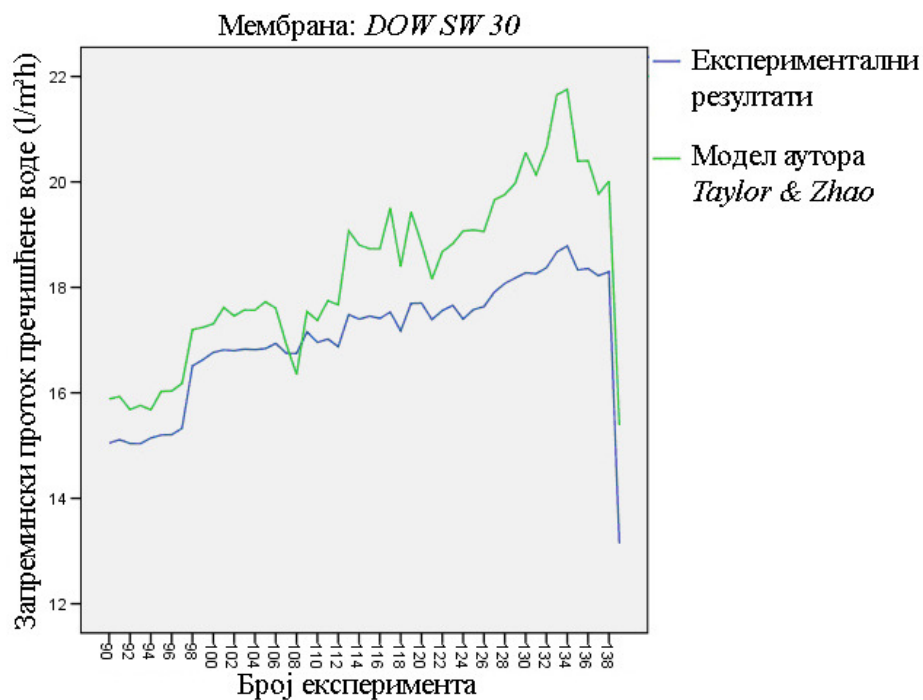
Слика 2.в. Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора *Mulder M.* и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *DOW SW 30*



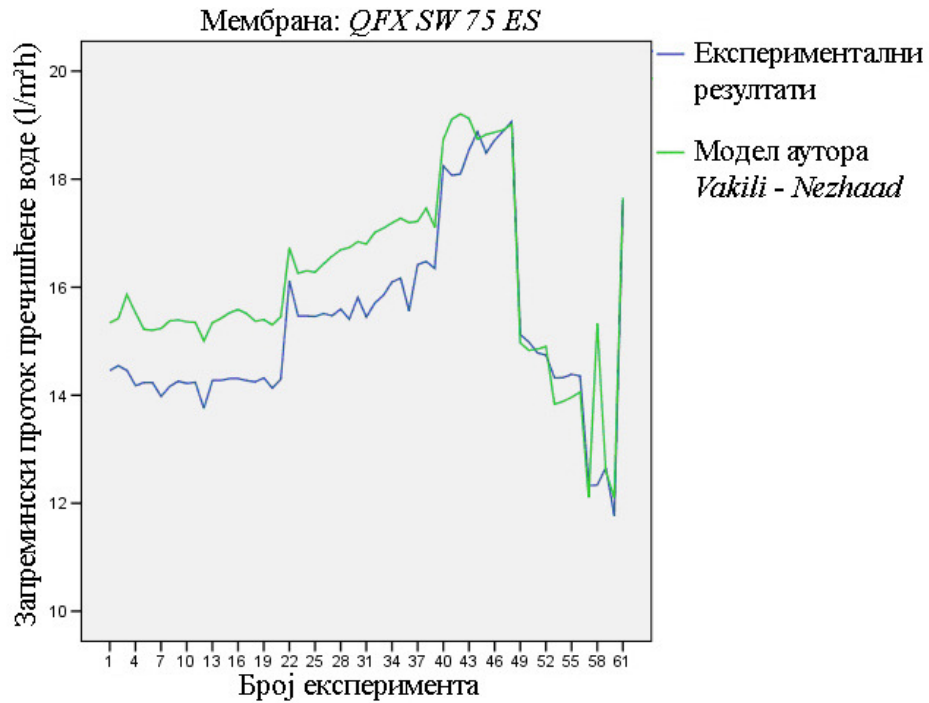
Слика 3.а. Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора *Taylor & Zhao* и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 ES*



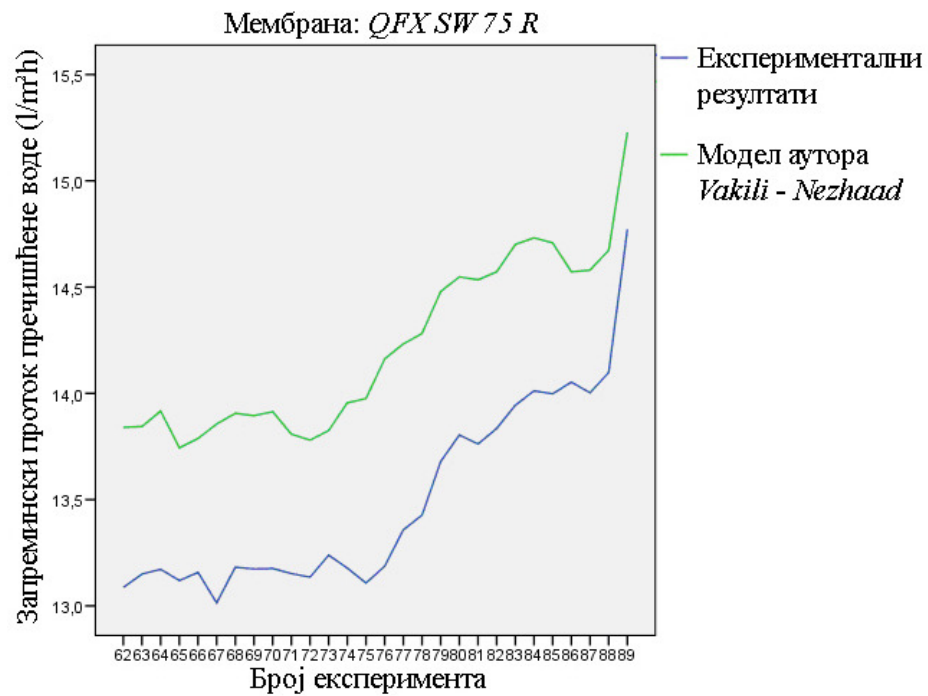
Слика 3.б. Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора *Taylor & Zhao* и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 R*



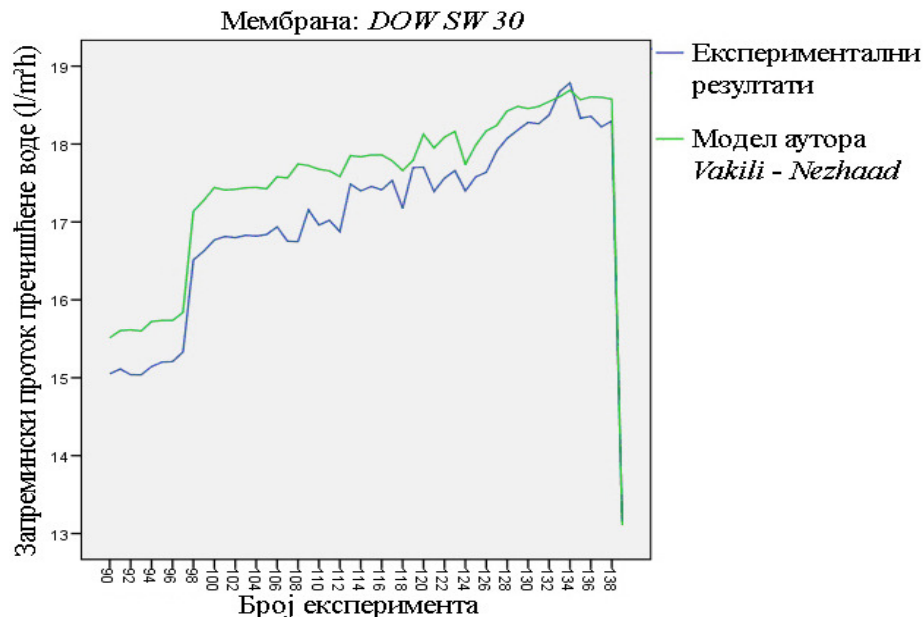
Слика 3.в. Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора *Taylor & Zhao* и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *DOW SW 30*



Слика 4.а. Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора *Vakili-Nezhaad* и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 ES*

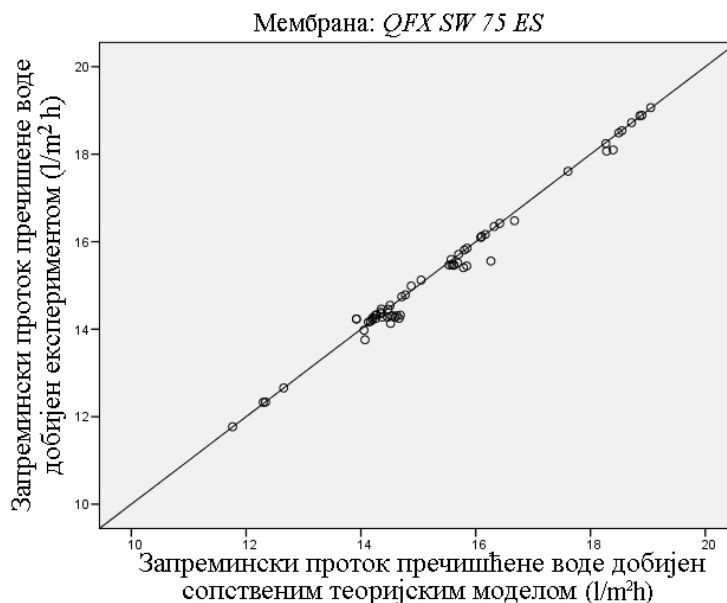


Слика 4.б. Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора *Vakili-Nezhaad* и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 R*

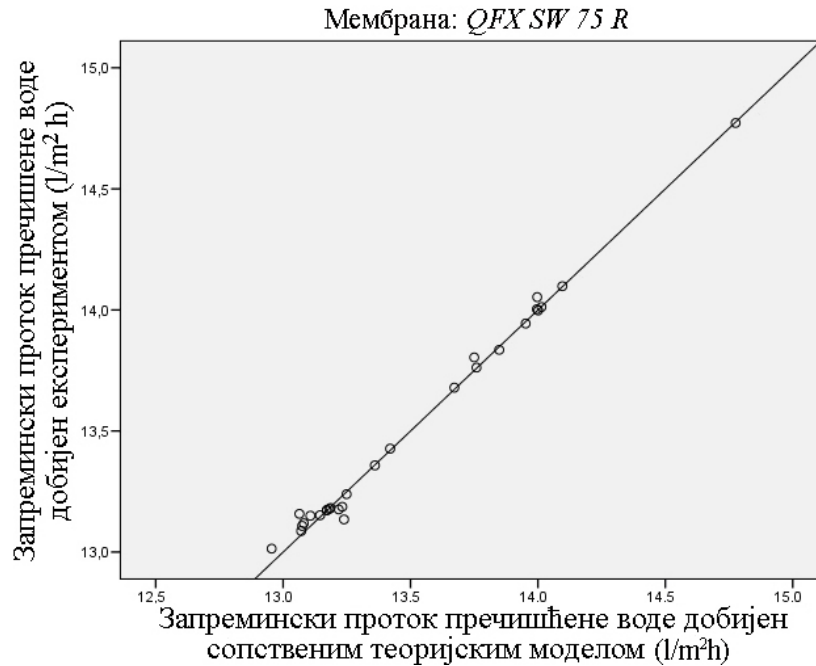


Слика 4.в. Упоредни приказ резултата теоријског модела аутора *Vakili-Nezhaad* и експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *DOW SW 30*

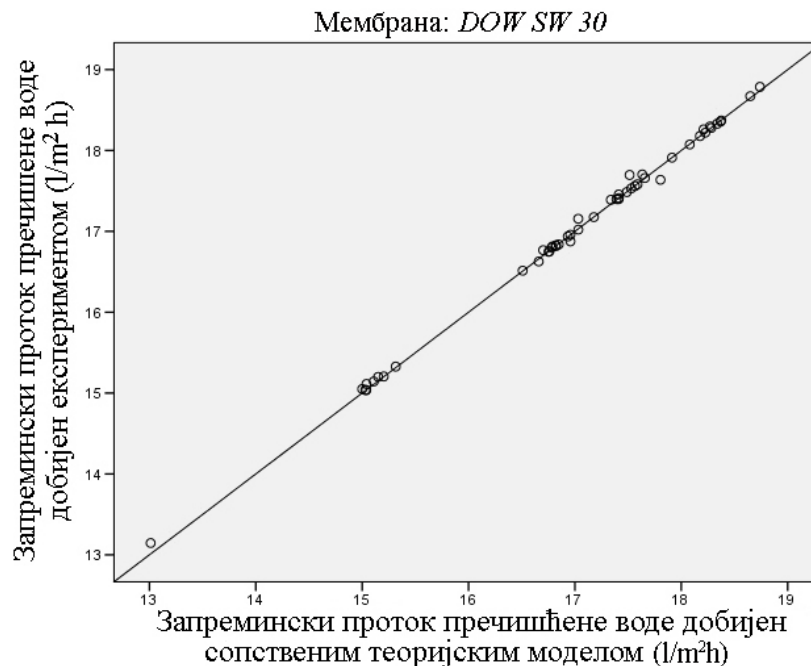
5. Упоредни приказ одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембранске модуле: *Nano H₂O QFX SW 75 ES*, *QFX SW 75 R* и *DOW SW 30*



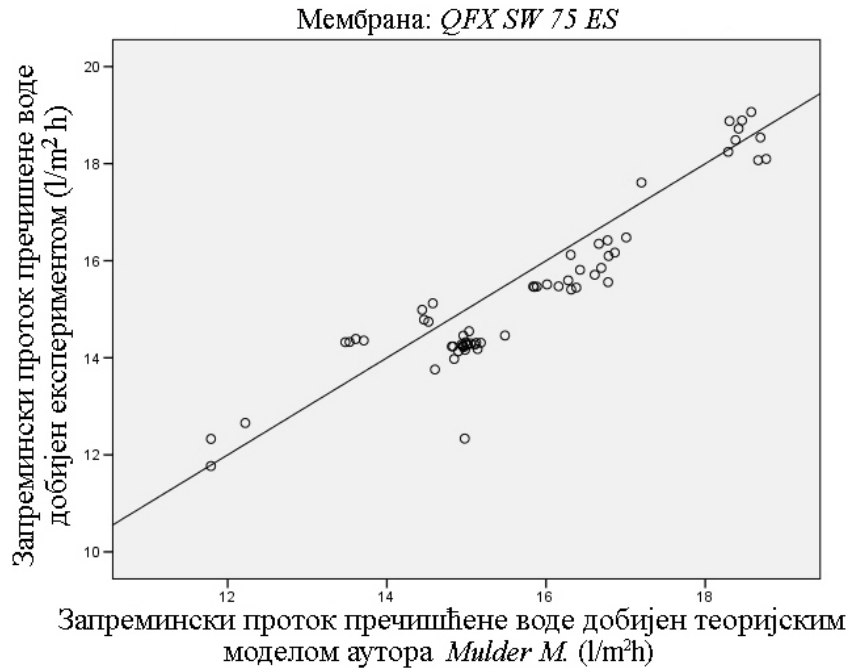
Слика 5.а. Упоредни приказ одступања резултата сопственог теоријског модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 ES*



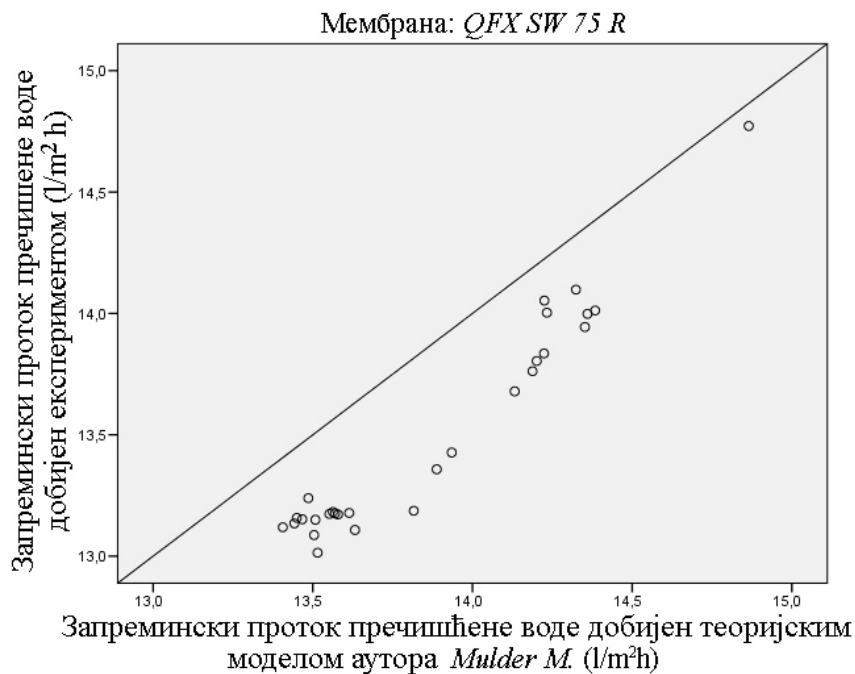
Слика 5.б. Упоредни приказ одступања резултата сопственог теоријског модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул QFX SW 75 R



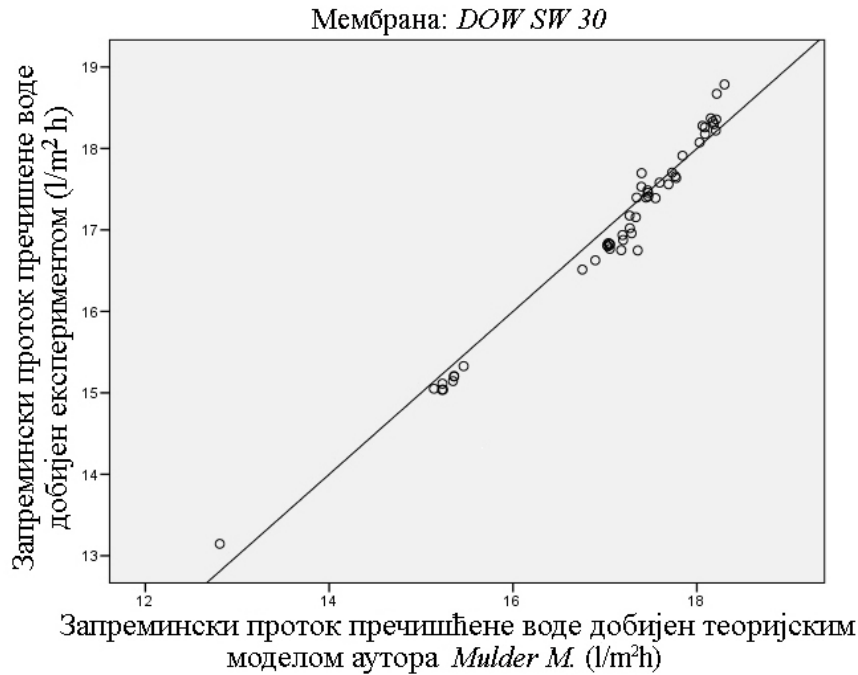
Слика.5.в. Упоредни приказ одступања резултата сопственог теоријског модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул DOW SW 30



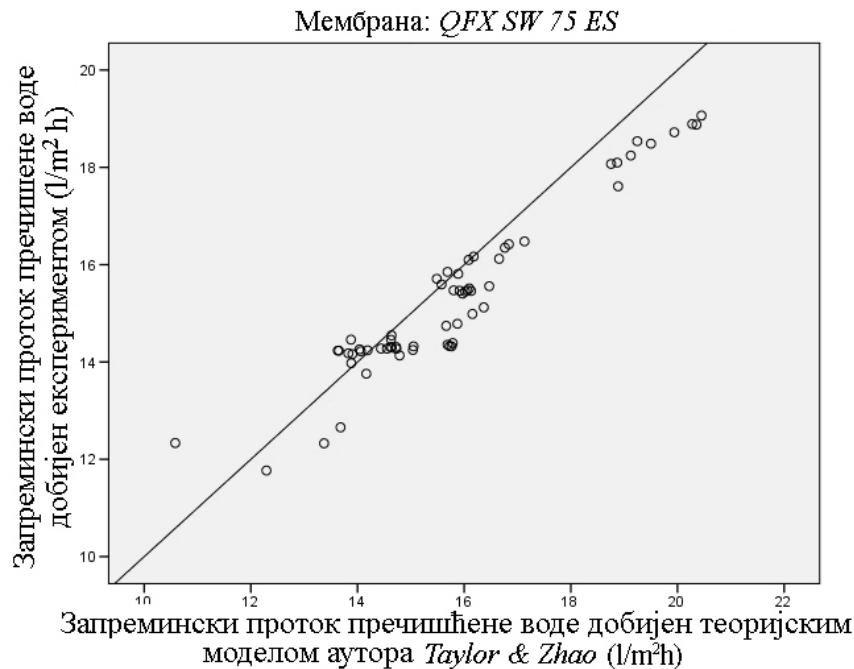
Слика 6.а. Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора *Mulder M.* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 ES*



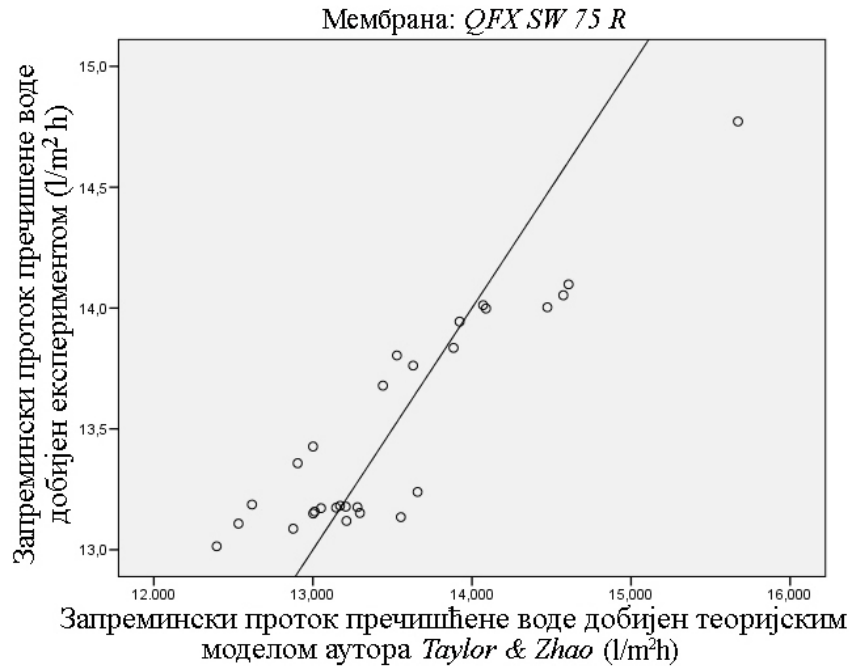
Слика 6.б. Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора *Mulder M.* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 R*



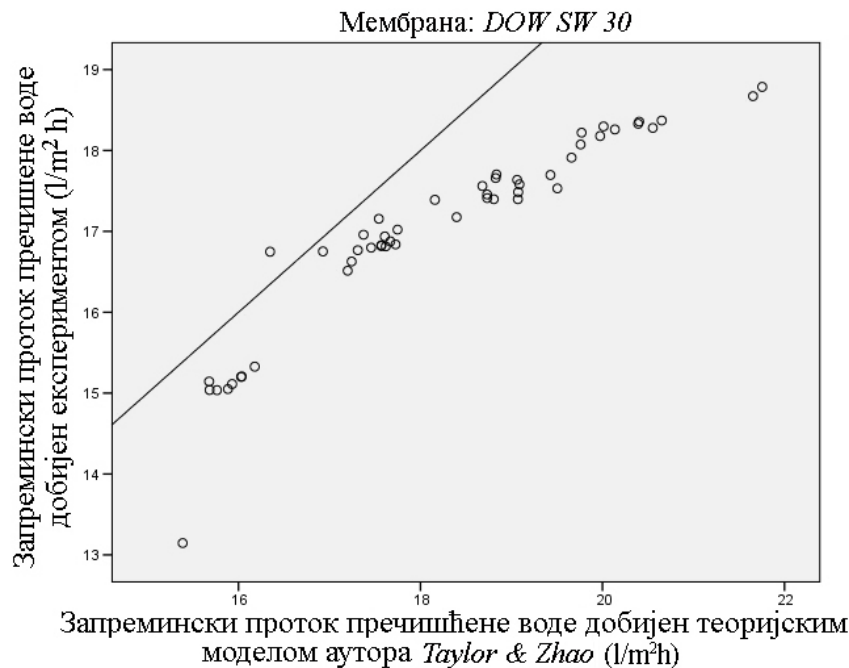
Слика 6.в. Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора *Mulder M.* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *DOW SW 30*



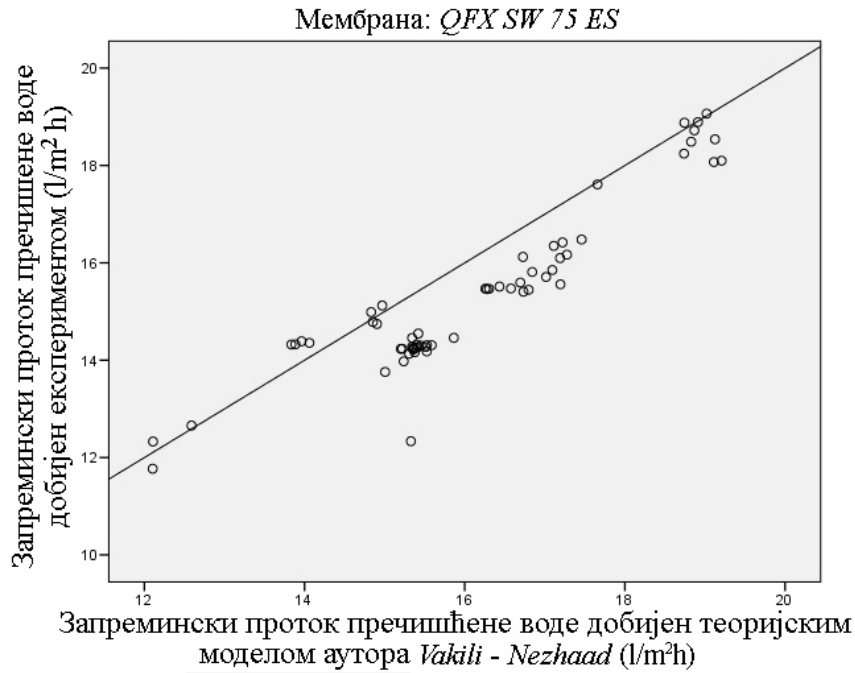
Слика 7.а. Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора *Taylor & Zhao* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 ES*



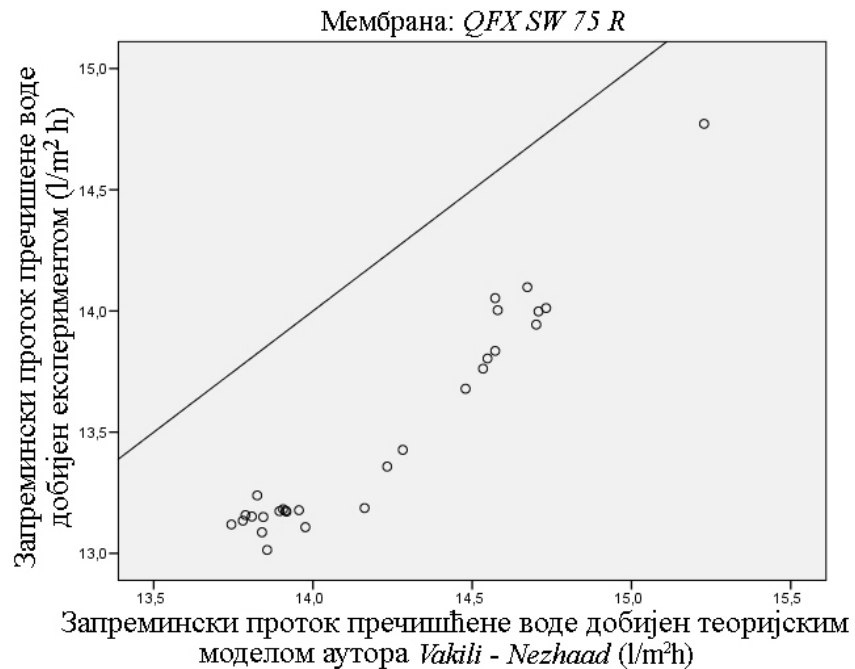
Слика 7.б. Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора *Taylor & Zhao* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 R*



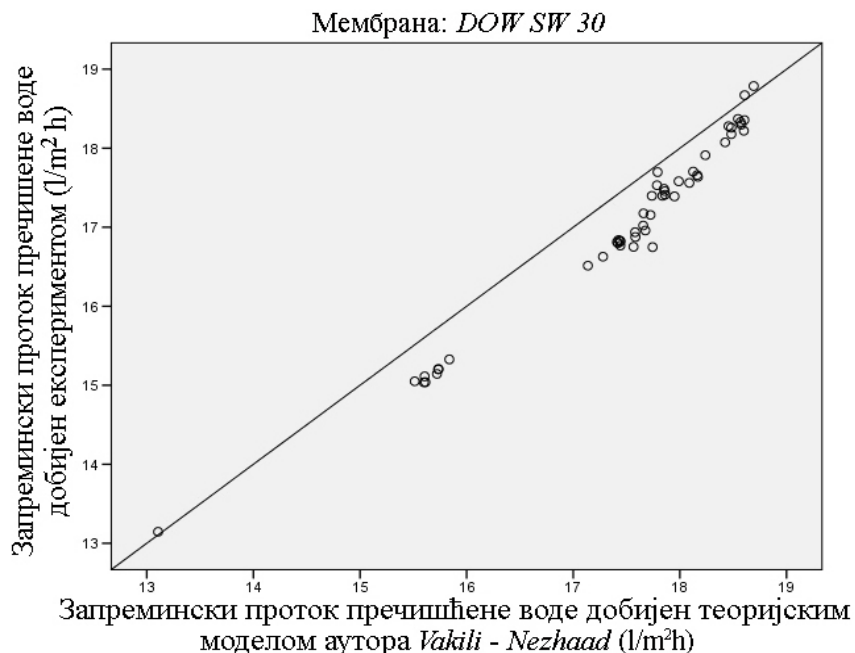
Слика 7.в. Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора *Taylor & Zhao* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *DOW SW 30*



Слика 8.а. Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора *Vakili-Nezhaad* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 ES*



Слика 8.б. Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора *Vakili-Nezhaad* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 R*



Слика 8.в. Упоредни приказ одступања резултата теоријског модела аутора *Vakili-Nezhaad* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *DOW SW 30*

6. Израчуната одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембранске модуле: *Nano H₂O QFX SW 75 ES, QFX SW 75 R* и *DOW SW 30*

Табела 3.а. Израчуната збирна одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за све мембранске модуле *QFX SW 75 ES, QFX SW 75 R* и *DOW SW 30*

| Дескриптивна статистика одступања за мембранске модуле <i>QFX SW 75 ES, QFX SW 75 R</i> и <i>DOW SW 30</i> | | | | | |
|--|-----------------------|---------|----------|-----------------|-----------------------|
| | Број експерименталних | Минимум | Максимум | Средња вредност | Стандардна девијација |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Одступања резултата сопственог модела од експерименталних резултата | 139 | -0,31 | 0,71 | 0,0251 | 0,12976 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|-----|-------|------|--------|---------|
| Одступања резултата модела аутора <i>Mulder</i> од експерименталних резултата | 139 | -0,84 | 2,64 | 0,2650 | 0,46502 |
| Одступања резултата модела аутора <i>Taylor&Zhao</i> од експерименталних резултата | 139 | -1,75 | 2,98 | 0,6530 | 0,76724 |
| Одступања резултата модела аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> од експерименталних резултата | 139 | -0,49 | 2,99 | 0,6507 | 0,46753 |
| Укупан број експеримената | 139 | | | | |

Табела 3.б. Израчуната одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул *QFX SW 75 ES*

| Дескриптивна статистика одступања за мембрански модул <i>QFX SW 75 ES</i> | | | | | |
|--|--------------------|---------|----------|-----------------|-----------------------|
| | Број експеримената | Минимум | Максимум | Средња вредност | Стандардна девијација |
| Одступања резултата сопственог модела од експерименталних резултата | 61 | -0,31 | 0,71 | 0,0725 | 0,17870 |
| Одступања резултата модела аутора <i>Mulder</i> од експерименталних резултата | 61 | -0,84 | 2,64 | 0,3789 | 0,63306 |
| Одступања резултата модела аутора <i>Taylor&Zhao</i> од експерименталних резултата | 61 | -1,75 | 1,48 | 0,4900 | 0,63141 |
| Одступања резултата модела аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> од експерименталних резултата | 61 | -0,49 | 2,99 | 0,7833 | 0,63617 |
| Укупан број експеримената | 61 | | | | |

Табела 3.в.Израчуната одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул *QFX SW 75 R*

| Дескриптивна статистика одступања за мембрански модул <i>QFX SW 75 R</i> | | | | | |
|--|-----------------------|---------|----------|-----------------|-----------------------|
| | Број експерименталних | Минимум | Максимум | Средња вредност | Стандардна девијација |
| Одступања резултата сопственог модела од експерименталних резултата | 28 | -0,09 | 0,10 | -0,0067 | 0,03686 |
| Одступања резултата модела аутора <i>Mulder</i> од експерименталних резултата | 28 | 0,09 | 0,63 | 0,3729 | 0,11630 |
| Одступања резултата модела аутора <i>Taylor&Zhao</i> од експерименталних резултата | 28 | -0,62 | 0,90 | -0,0062 | 0,36752 |
| Одступања резултата модела аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> од експерименталних резултата | 28 | 0,46 | 0,98 | 0,7170 | 0,11507 |
| Укупан број експерименталних | 28 | | | | |

Табела 3.г.Израчуната одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул *DOW SW 30*

| Дескриптивна статистика одступања за мембрански модул <i>DOW SW 30</i> | | | | | |
|---|-----------------------|----------|----------|-----------------|-----------------------|
| | Број експерименталних | Минимум | Максимум | Средња вредност | Стандардна девијација |
| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> |
| Одступања резултата сопственог модела од експерименталних резултата | 50 | -0,18 | 0,17 | -0,0148 | 0,05059 |
| Одступања резултата модела аутора <i>Mulder</i> од експерименталних резултата | 50 | -0,49 | 0,61 | 0,0656 | 0,21783 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|----|-------|------|--------|---------|
| Одступања резултата модела аутора <i>Taylor&Zhao</i> од експерименталних резултата | 50 | -0,40 | 2,98 | 1,2210 | 0,69618 |
| Одступања резултата модела аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> од експерименталних резултата | 50 | -0,09 | 1,00 | 0,4517 | 0,21901 |
| Укупан број експеримената | 50 | | | | |

Табела 4.а.Израчуната апсолутна одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул *QFX SW 75 ES*

| Дескриптивна статистика апсолутних одступања за мембрански модул <i>QFX SW 75 ES</i> | | | | | |
|--|--------------------|---------|----------|-----------------|-----------------------|
| | Број експеримената | Минимум | Максимум | Средња вредност | Стандардна девијација |
| Апсолутна одступања резултата сопственог модела од експерименталних резултата | 61 | 0,00 | 0,71 | 0,1205 | 0,15005 |
| Апсолутна одступања резултата модела аутора <i>Mulder</i> од експерименталних резултата | 61 | 0,02 | 2,64 | 0,6403 | 0,36030 |
| Апсолутна одступања резултата модела аутора <i>Taylor&Zhao</i> од експерименталних резултата | 61 | 0,01 | 1,75 | 0,6566 | 0,45223 |
| Апсолутна одступања резултата модела аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> од експерименталних резултата | 61 | 0,02 | 2,99 | 0,8628 | 0,52115 |
| Укупан број експеримената | 61 | | | | |

Табела 4.б.Израчуната апсолутна одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул *QFX SW 75 R*

| Дескриптивна статистика апсолутних одступања за мембрански модул <i>QFX SW 75 R</i> | | | | | |
|--|---------------------------------|---------|----------|-----------------|-----------------------|
| | Број експерименталних резултата | Минимум | Максимум | Средња вредност | Стандардна девијација |
| Апсолутна одступања резултата сопственог модела од експерименталних резултата | 28 | 0,00 | 0,10 | 0,0238 | 0,02862 |
| Апсолутна одступања резултата модела аутора <i>Mulder</i> од експерименталних резултата | 28 | 0,09 | 0,63 | 0,3729 | 0,11630 |
| Апсолутна одступања резултата модела аутора <i>Taylor&Zhao</i> од експерименталних резултата | 28 | 0,01 | 0,90 | 0,2779 | 0,23453 |
| Апсолутна одступања резултата модела аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> од експерименталних резултата | 28 | 0,46 | 0,98 | 0,7170 | 0,11507 |
| Укупан број експерименталних резултата | 28 | | | | |

Табела 4.в.Израчуната апсолутна одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за мембрански модул *DOW SW 30*

| Дескриптивна статистика апсолутних одступања за мембрански модул <i>DOW SW 30</i> | | | | | |
|---|---------------------------------|----------|----------|-----------------|-----------------------|
| | Број експерименталних резултата | Минимум | Максимум | Средња вредност | Стандардна девијација |
| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> |
| Апсолутна одступања резултата сопственог модела од експерименталних резултата | 50 | 0,00 | 0,18 | 0,0303 | 0,04297 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|----|------|------|--------|---------|
| Апсолутна одступања резултата модела аутора <i>Mulder</i> од експерименталних резултата | 50 | 0,01 | 0,61 | 0,1867 | 0,12761 |
| Апсолутна одступања резултата модела аутора <i>Taylor&Zhao</i> од експерименталних резултата | 50 | 0,18 | 2,98 | 1,2370 | 0,66666 |
| Апсолутна одступања резултата модела аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> од експерименталних резултата | 50 | 0,04 | 1,00 | 0,4597 | 0,20140 |
| Укупан број експеримената | 50 | | | | |

Табела 5.а. Приказ фреквентности одступања резултата сопственог теоријског модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сва 3 мембранска модула

| Табеларни приказ фреквентности одступања резултата сопственог теоријског модела од експерименталних резултата | | | | |
|---|------|-------------|----------|---------------------|
| | Број | Кумулативни | Процент | Кумулативни процент |
| $-0,500000 < x \leq -0,025000$ | 2 | 2 | 1,43885 | 1,4388 |
| $-0,250000 < x \leq 0,000000$ | 73 | 75 | 52,51799 | 53,9568 |
| $0,000000 < x \leq 0,250000$ | 54 | 129 | 38,84892 | 92,8058 |
| $0,250000 < x \leq 0,500000$ | 9 | 138 | 6,47482 | 99,2806 |
| $0,500000 < x \leq 0,750000$ | 1 | 139 | 0,71942 | 100,0000 |

Табела 5.б. Приказ фреквентности одступања резултата теоријског модела аутора *Mulder* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сва 3 мембранска модула

| Табеларни приказ фреквентности одступања резултата теоријског модела аутора <i>Mulder</i> од експерименталних резултата | | | | |
|---|------|-------------|----------|---------------------|
| | Број | Кумулативни | Процент | Кумулативни процент |
| $-1,000000 < x \leq 0,000000$ | 33 | 33 | 23,74101 | 23,7410 |
| $0,000000 < x \leq 1,000000$ | 103 | 136 | 74,10072 | 97,8417 |
| $1,000000 < x \leq 2,000000$ | 2 | 138 | 1,43885 | 99,2806 |
| $2,000000 < x \leq 3,000000$ | 1 | 139 | 0,71942 | 100,0000 |

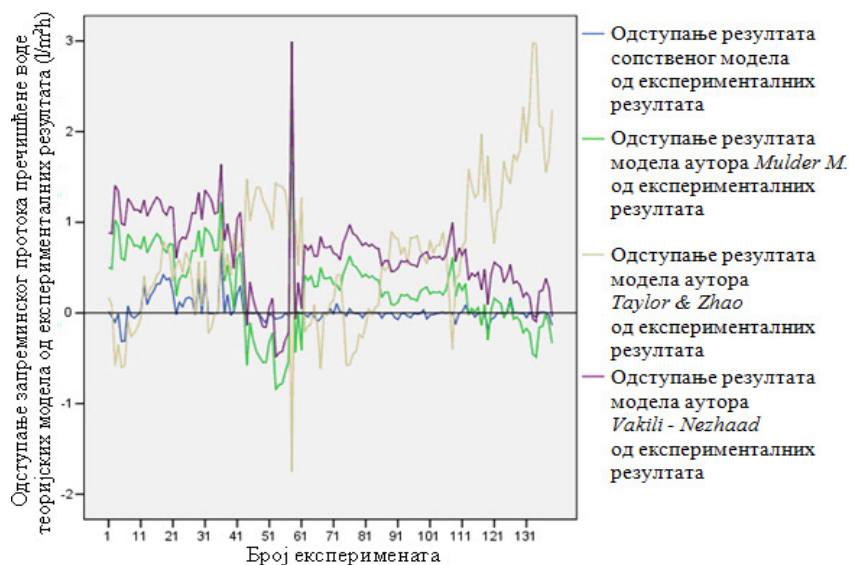
Табела 5.в. Приказ фреквентности одступања резултата теоријског модела аутора *Taylor & Zhao* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сва 3 мембранска модула

| Табеларни приказ фреквентности одступања резултата теоријског модела аутора <i>Taylor & Zhao</i> од експерименталних резултата | | | | |
|--|------|-------------|----------|---------------------|
| | Број | Кумулативни | Процент | Кумулативни процент |
| $-2,00000 < x \leq -1,00000$ | 1 | 1 | 0,71942 | 0,7194 |
| $-1,00000 < x \leq 0,00000$ | 29 | 30 | 20,86331 | 21,5827 |
| $0,00000 < x \leq 1,00000$ | 68 | 98 | 48,92086 | 70,5036 |
| $1,00000 < x \leq 2,00000$ | 34 | 132 | 24,46043 | 94,9640 |
| $2,00000 < x \leq 3,00000$ | 7 | 139 | 5,03597 | 100,0000 |

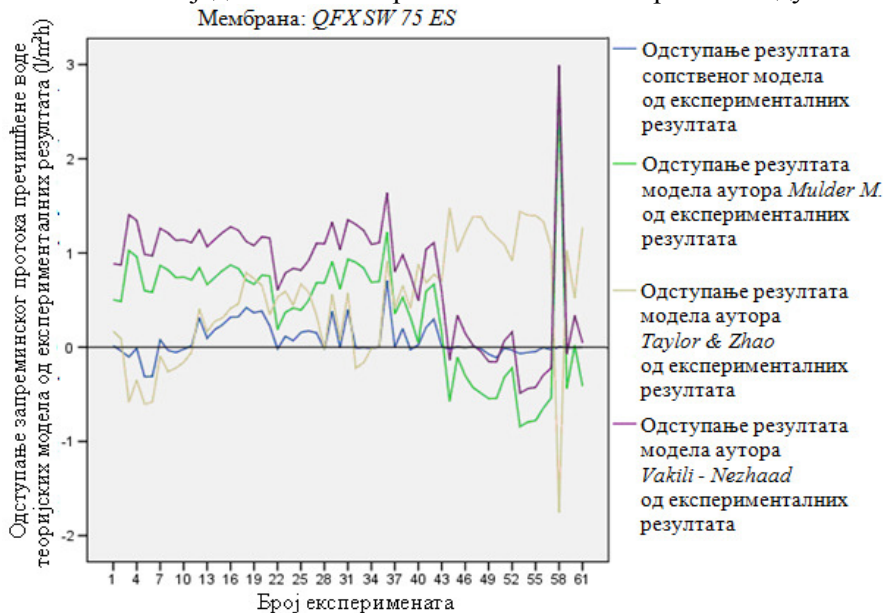
Табела 5.г. Приказ фреквентности одступања резултата теоријског модела аутора *Vakili-Nezhaad* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сва 3 мембранска модула

| Табеларни приказ фреквентности одступања резултата теоријског модела аутора <i>Vakili-Nezhaad</i> од експерименталних резултата | | | | |
|---|------|-------------|----------|---------------------|
| | Број | Кумулативни | Процент | Кумулативни процент |
| $-1,00000 < x \leq 0,00000$ | 13 | 13 | 9,35252 | 9,3525 |
| $0,00000 < x \leq 0,00000$ | 96 | 109 | 69,06475 | 78,4173 |
| $1,00000 < x \leq 2,00000$ | 29 | 138 | 20,86331 | 99,2806 |
| $2,00000 < x \leq 3,00000$ | 1 | 139 | 0,71942 | 100,0000 |

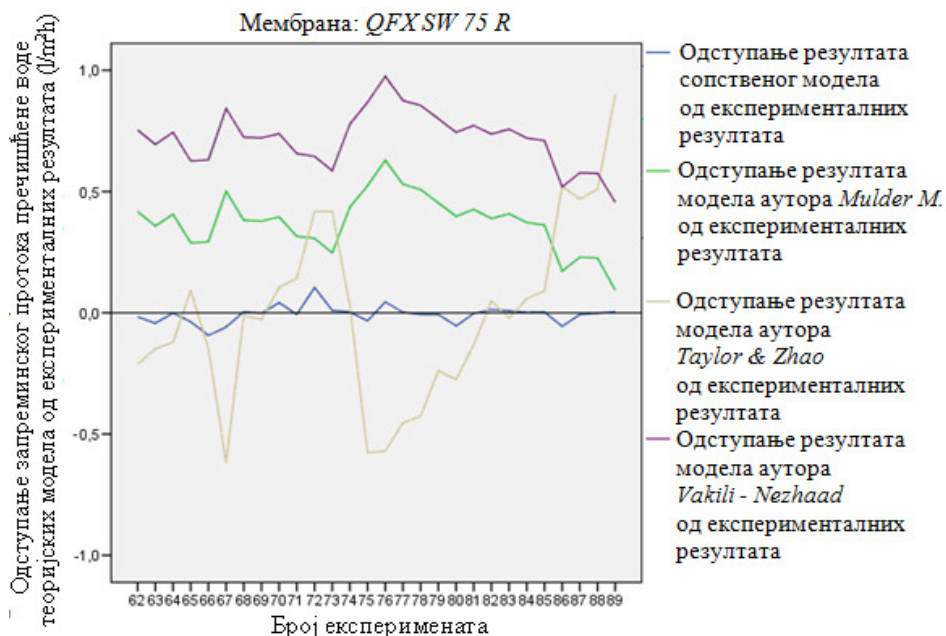
7. Збирни дијаграми одступања резултата теоријских модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембранске модуле: Nano H₂O QFX SW 75 ES, QFX SW 75 R и DOW SW 30



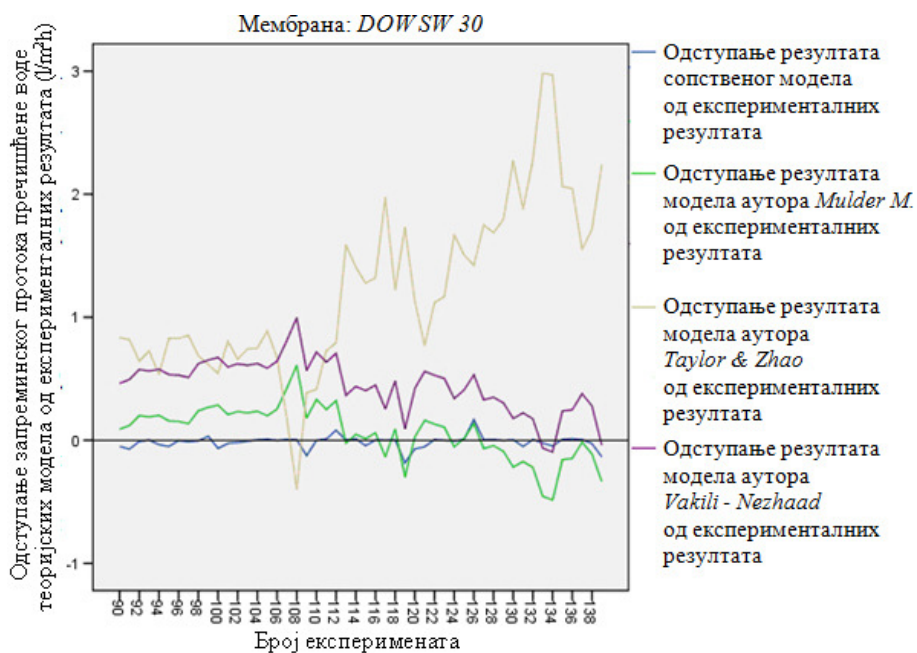
Слика 9.а. Збирни дијаграм одступања резултата сопственог теоријског модела и теоријских модела аутора *Mulder M.*, *Taylor & Zhao* и *Vakili-Nezhaad* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за сва 3 мембранска модула



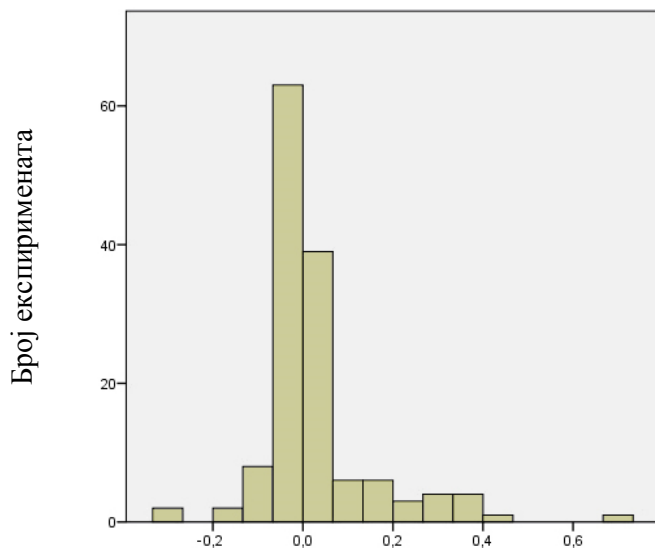
Слика 9.б. Збирни дијаграм одступања резултата сопственог теоријског модела и теоријских модела аутора *Mulder M.*, *Taylor & Zhao* и *Vakili-Nezhaad* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 ES*



Слика 9.в. Збирни дијаграм одступања резултата сопственог теоријског модела и теоријских модела аутора *Mulder M.*, *Taylor & Zhao* и *Vakili-Nezhaad* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *QFX SW 75 R*

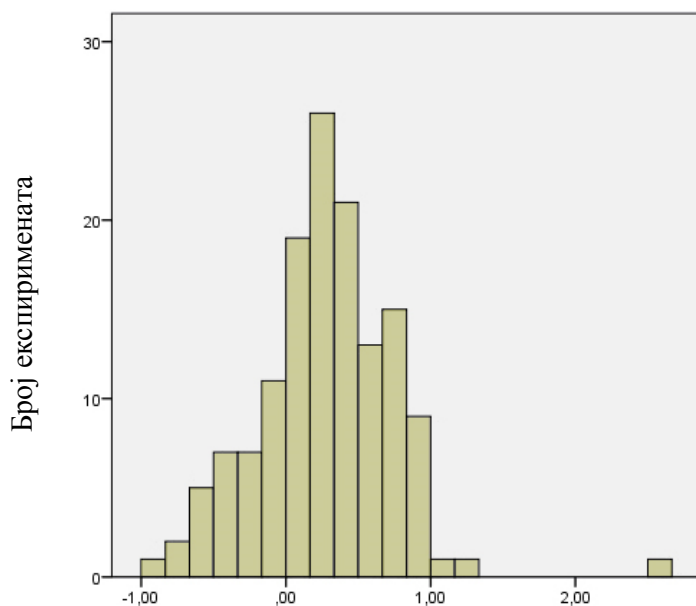


Слика 9.г. Збирни дијаграм одступања резултата сопственог теоријског модела и теоријских модела аутора *Mulder M.*, *Taylor & Zhao* и *Vakili-Nezhaad* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сваки појединачни експеримент за мембрански модул *DOW SW 30*



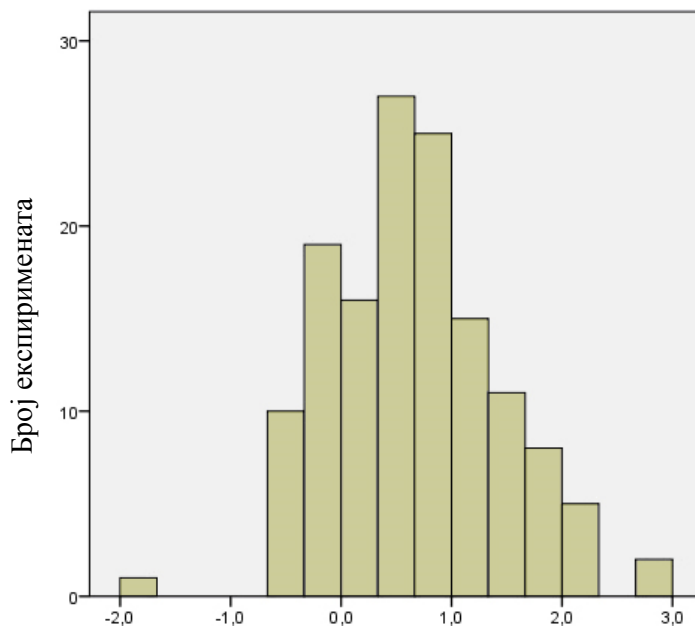
Одступање запреминског протока пречишћене воде сопственог теоријског модела од експерименталних резултата [l/m²h]

Слика 9.д. Дијаграм фреквентности одступања резултата сопственог теоријског модела од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сва 3 мембранска модула



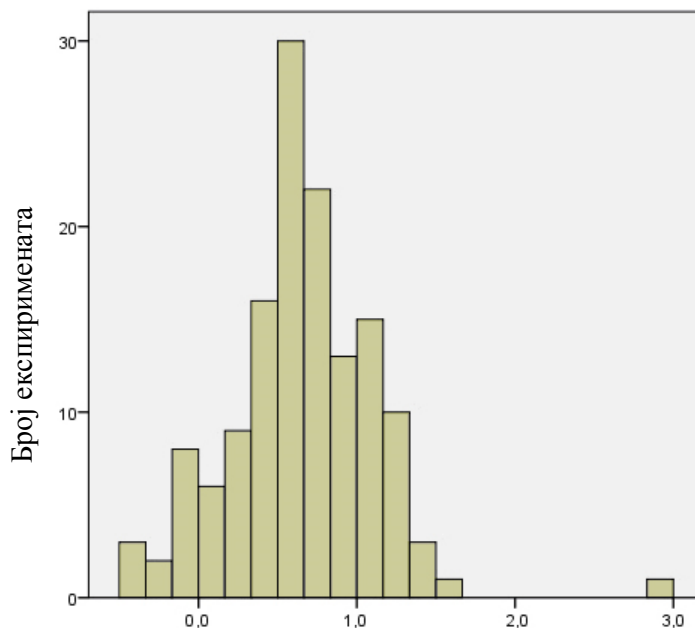
Одступање запреминског протока пречишћене воде теоријског модела аутора *Mulder M.* од експерименталних резултата [l/m²h]

Слика 9.ђ. Дијаграм фреквентности одступања резултата теоријског модела аутора *Mulder M.* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сва 3 мембранска модула



Одступање запреминског протока пречишћене воде теоријског модела аутора *Taylor & Zhao* од експерименталних резултата [l/m²h]

Слика 9.е. Дијаграм фреквентности одступања резултата теоријског модела аутора *Taylor & Zhao* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сва 3 мембранска модула



Одступање запреминског протока пречишћене воде теоријског модела аутора *Vakili - Nezhaad* од експерименталних резултата [l/m²h]

Слика 9.ж. Дијаграм фреквентности одступања резултата теоријског модела аутора *Vakili - Nezhaad* од експерименталних резултата запреминског протока пречишћене воде за сва 3 мембранска модула

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Име и презиме: Марјан Р. Арсовић

Датум рођења: 26. 06. 1979.

Место рођења: Аранђеловац, Србија

Школовање:

1986. – 1994. Основна школа „Светолик Ранковић” у Аранђеловцу.
1994. – 1998. Техничка школа „Милета Николић” у Аранђеловцу.
Био је ђак генерације.
1998. – 2003. Студије на Машинском факултету Универзитета у Београду,
Одсек за производно машинство.
10. 10. 2003. Одбраћен дипломски рад под називом: „Пројектовање и анализа
технолошког процеса израде подскопа вакуум пресе”, са
оценом 10 (десет), код ментора проф. др Бојана Бабића на
Машинском факултету Универзитета у Београду, Одсек за
производно машинство.
2003. – 2006. Постдипломске студије на Машинском факултету Универзитета у
Београду, Одсек за производно машинство.
03. 04. 2006. Одбраћен магистарски рад на тему: „Развој и примена
дијамантских алата у технологији обраде мермера и гранита“ на
Машинском факултету Универзитета у Београду, код ментора
проф. др Љубодрага Тановића, Одсек за производно машинство
2008. – 2009. Похађа и полаже специјалистичке курсеве у области технологија
праде вода, на *University of St. Petersburg, Florida* у Сједињеним
Америчким Државама.
2009. Похађа и полаже специјализовани курс за статичке и диманичке
прорачуне посуда под притиском, применом софтвера *Caesar II* у
оквиру института *COADE, Huston, Texas* у Сједињеним
Америчким Државама.
2008. – 2010. Похађа и полаже специјалистичке курсеве у области технологија
Праде вода у оквиру научно-истраживачког института
компаније „*Doosan Hydro Technology*”, *Tampa, Florida*, Сједињене
Америчке Државе.
2013. Пријављена докторска дисертација на Машинском факултету
Универзитета у Београду.

Кретање у послу:

2004. – 2006. Стипендиста Министарства за науку и заштиту животне средине Републике Србије. Ангажован на истраживачким пројектима при Центру за нове технологије, Машинског факултета у Београду.
2007. – 2008. Научни истраживач у институту за истраживање и развој технологија прераде воде, компаније „*Doosan Hydro Technology*”, *Tampa, Florida*, Сједињене Америчке Државе. Ангажован је на 4 научно-истраживачка пројекта у области унапређења технологија десалинизације и реверзибилне осмозе воде.
2009. – 2016. Менаџер инжењерско развојног одељења компаније „*Doosan Hydro Technology*”, *Tampa, Florida* у Сједињеним Америчким Државама. Руководио је на шест технолошко развојних међународних пројеката у области десалинизационих технологија прераде воде. Учествовао је у изради више од 20 међународних инжењерских пројеката у области технологија прераде индустријске воде и воде за пиће.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Потписани-а Марјан Р. Арсовић
број индекса _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Термодинамички процеси одстрањивања соли из морске воде

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, 02. Јуна 2016.

Потпис докторанда

Марјан Арсовић

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И
ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ДОКТОРСКОГ РАДА**

Име и презиме аутора Марјан Р. Арсовић
Број индекса _____
Студијски програм Докторске академске студије
Наслов рада Термодинамички процеси одстрањивања соли из морске воде
Ментор проф. др Мирко Коматина

Потписани/а Марјан Р. Арсовић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 02. Јуна 2016.

Потпис докторанда

Марјан Арсовић

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Термодинамички процеси одстрањивања соли из морске воде

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство - некомерцијално - без прераде
4. Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
5. Ауторство - без прераде
6. Ауторство - делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на следећем листу).

У Београду, 02. Јуна 2016.

Потпис докторанда

Марјан Арсовић

1. **Ауторство.** Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство - некомерцијално.** Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство - некомерцијално - без прераде.** Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима.** Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство - без прераде.** Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство - делити под истим условима.** Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.