

ВІТРОЕНЕРГЕТИКА ТА ОПРІСНЕННЯ ВОДИ

Отримано 13 сер. 2024 р.; рекомендовано до публікації 16 сер. 2024 р.
Доступно онлайн 01 жов. 2024 р.

Рибальченко В. А.¹

Автор для кореспонденції: Рибальченко Владислав,
e-mail: lemonua@gmail.com

¹ аспірант<https://orcid.org/0009-0009-3592-7897>

¹ Інститут відновлюваної енергетики НАН
України, м. Київ, Україна

З огляду на зростання попиту на прісну воду та необхідність мінімізації екологічного впливу, а також зменшення викидів CO₂ доцільним стає використання відновлюваних джерел енергії для опріснення морської та солонуватої води. Досліджується застосування вітроенергетичних систем для опріснення води. Метою роботи є оцінка можливостей інтеграції вітрової енергії в технологічні схеми опріснення. У роботі наведено огляд різних методів опріснення, зокрема термічні та мембранні технології. Особливу увагу приділено зворотному осмосу, який розглядається як найпридатніша технологія для поєднання з вітровою енергією. Окремо розглядаються аспекти енергозбереження та підвищення ефективності опріснювальних систем завдяки використанню пристроїв рекуперації енергії.

Проаналізовано різні конфігурації автономних вітроенергетичних систем опріснення води, їхні переваги й недоліки, а також особливості проектування цих систем та управління ними. Ключовим моментом є розгляд можливостей зберігання енергії та води для забезпечення стабільної роботи установок опріснення, зумовленої мінливістю в часі відновлюваної енергії. Зазначено, що комбінація вітрових і фотоелектричних установок є перспективним рішенням для опріснення в умовах відповідного клімату.

Підкреслюється важливість оптимізації компонентів систем для досягнення високої ефективності та надійності роботи в умовах коливань вітрової енергії, а також необхідність подальших досліджень для подолання технічних викликів.

Ключові слова: вітрова енергія, вода, зворотній осмос, мембрана, опріснення, рекуперація.

WIND ENERGY AND WATER DESALINATION

Received Aug. 13, 2024; accepted Sep. 16, 2024
Available online Oct. 01, 2024

Rybalchenko V. A.¹

Author for correspondence: Rybalchenko Vladyslav,
e-mail: lemonua@gmail.com

¹ Ph.D. student<https://orcid.org/0009-0009-3592-7897>

¹ Institute of Renewable Energy of the NAS of
Ukraine, Kyiv, Ukraine

In the conditions of growing demand for fresh water and the need to minimize the environmental impact, as well as reduce CO₂ emissions, it is appropriate to use renewable energy sources for desalination of sea and brackish water. The application of wind energy systems for water desalination is being studied. The aim of the work is to assess the possibilities of integrating wind energy into technological schemes of desalination.

The work provides an overview of various desalination methods, including thermal and membrane technologies. Special attention is paid to reverse osmosis, which is considered the most suitable technology for combining with wind energy. Aspects of energy saving and increasing the efficiency of desalination systems through the use of energy recovery devices are considered separately.

Different configurations of autonomous wind power water desalination systems, their advantages and disadvantages, as well as the design and management features of these systems are analyzed. A key point is to consider energy and water storage options to ensure the stable operation of desalination plants due to the time variability

of renewable energy. It is noted that the combination of wind and photovoltaic installations is a promising solution for desalination in the conditions of the appropriate climate.

The importance of optimization of system components to achieve high efficiency and reliability of operation in conditions of wind energy fluctuations is emphasized, as well as the need for further research to overcome technical challenges.

Key words: wind energy, water, reverse osmosis, membrane, desalination, recovery.

Вступ. Участь України в реалізації європейської програми «2×40 GW Green Hydrogen Initiative» [1] засвідчено у відповідному Меморандумі [2]. Зокрема, йдеться про спорудження 10 ГВт потужностей електролізерів для виробництва зеленого водню з використанням енергії вітроелектричних станцій (ВЕС) в Азово-Чорноморському регіоні. ВЕС можуть розміщуватись на морських акваторіях та узбережжі. Територіальні води України характеризуються значним потенціалом офшорної вітроенергетики, яка на сьогодні розвивається в світі стрімкими темпами [3]. Один з альтернативних варіантів постачання прісної води для функціонування електролізерів з електроживленням від офшорних ВЕС полягає у використанні опрісненої морської води. Спорудження в Україні 10 ГВт електролізерів для виробництва зеленого водню в обсязі 1,65 млн тонн на рік (зі споживанням підготовленої прісної води близько 24 млн м³/рік [4]) потребуватиме, за оцінками розробників водневої стратегії, побудови 40 ГВт встановленої потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [5]. Вітрова енергія може задовольнити високі потреби в енергії для опріснення, одночасно знижуючи витрати та викиди CO₂. Проте невідповідність між періодичною доступністю вітрових ресурсів і потребою в енергії для опріснення робить інтеграцію цих двох технологій критично важливою.

Мета роботи полягає у висвітленні поточного стану вітроенергетичного опріснення та наголошенні на технічних викликах, які необхідно подолати для забезпечення сталого джерела прісної води. У статті наведено огляд вітроенергетичних систем опріснення води з аналізом переваг і недоліків на основі теоретичних і експериментальних результатів, доступних у науковій літературі.

Вітроенергетика як життєздатний варіант енергозабезпечення процесів опріснення води. Обсяги використання вітрової енергії постійно зростають як на суші, так і на морі. У 2017 році на вітроенергетику припадало 18 % (1134 ТВт·год) світового та 30 % європейського виробництва електроенергії з ВДЕ [6]. Безпосереднє використання енергії вітру для опріснення води частково зменшило б навантаження на енергосистему, одночасно сприяючи вирішенню проблеми дефіциту води. Крім того, використання вітрової енергії замість альтернатив на основі викопного палива може зменшити вплив опріснення на довкілля до 75 % [7]. Фактично вітроенергетика є другою за частотою використанням технологією, після сонячних фотоелектричних панелей, для живлення опріснювальних установок [8].

Глобальний розподіл вітрових ресурсів робить вітрову енергію універсальним рішенням для різних потреб – від автономних систем енергозабезпечення у віддалених місцях, до потужних багатомегаватних вітроелектростанцій (ВЕС). Крім того, вітроенергетика має найнижчий рівень споживання води протягом усього свого життєвого циклу та виділяє найменше парникових газів на 1 кВт·год виробленої енергії у порівнянні з іншими джерелами енергії [9]. У 2012 році завдяки вітроенергетиці було заощаджено 387 млрд літрів води [10]. Отже, використання вітру для опріснення води є перспективним рішенням для сталого та довготривалого виробництва прісної води.

Різні технології відновлюваної енергетики, зокрема використання енергії вітру для опріснення води, були докладно розглянуті й описані у науковій літературі [9, 11–17]. Дослідження показують, що процеси опріснення води з використанням вітрової та сонячної енергії є поширеними технологіями, проте їх ефективність істотно залежить від розташування, наявності ресурсів та вартості енергії.

У дослідженнях [8, 18–20] розглядалася доцільність використання вітроенергетики для опріснення води з урахуванням економічного аналізу, технічних аспектів та ключових проблем інтеграції. Особливу увагу приділено необхідності вирішення питання переривчастості вітру. Збірку та опис патентів, що стосуються опріснення води за допомогою відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), можна знайти у [21].

Попри значну кількість досліджень та розробок, однією з ключових проблем залишається узгодження режимів роботи вітроелектричних установок (ВЕУ) та установок з опріснення води. Інакше кажучи, необхідно вирішити питання адаптації мінливості та періодичності генерації вітрової електроенергії [22–26] до потреб систем опріснення в різних часових масштабах, від річних змін до короткочасних секундних коливань, викликаних турбулентністю вітру. В цьому контексті особливо важливим стає використання резервних або проміжних накопичувачів води та електроенергії [24, 26], що забезпечують стабільність процесу опріснення.

Технології опріснення води. Основні технології опріснення води, з урахуванням виду необхідної вхідної енергії, представлено на рис. 1. Їх можна розділити на дві групи: термічні та мембранні [13]. Процеси опріснення, що потребують використання електричної або механічної енергії, більше годяться для поєднання з вітровими турбінами (ВТ). Робочі параметри для кожної технології опріснення наведено в табл. 1 [27, 28].

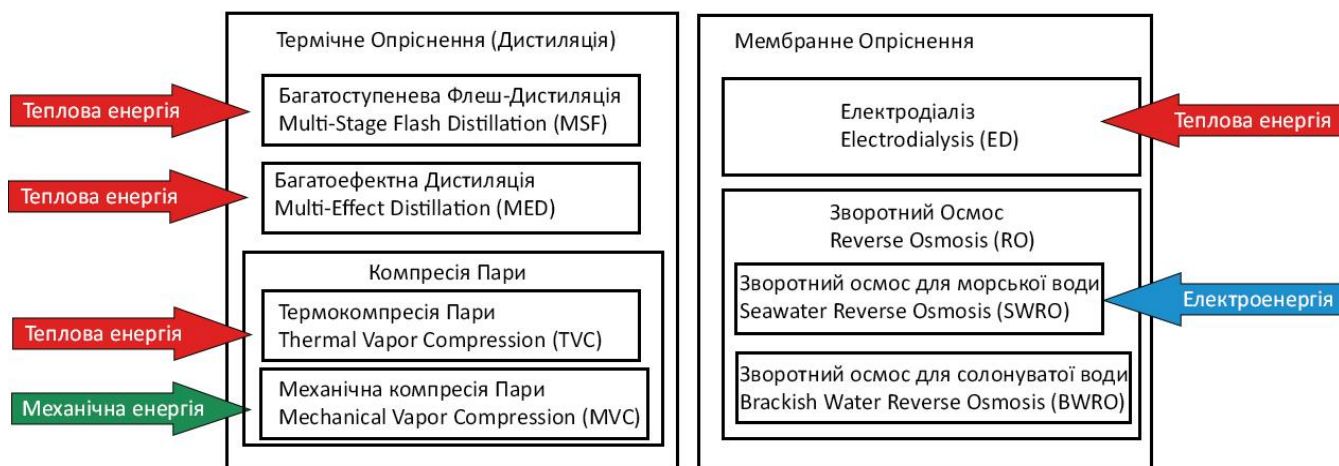


Рис. 1. Технології опріснення води та види необхідної вхідної енергії

Fig. 1. Desalination technologies and input energy types

Таблиця 1. Робочі параметри технологій опріснення

Table 1. Operating parameters of desalination technologies

Технологія опріснення	Вид енергії	Діапазон продуктивності, м ³ /добу	Температурний діапазон, °C	Коефіцієнт відновлення, %	Концентрація, ppm
MED	Теплова	2000–20 000	90–120	30–50	20 000–100 000
MSF	Теплова	40 000–75 000	90–110	20–30	20 000–10 000
TVC	Теплова	10 000–35 000	40–100	25–40	20 000–100 000
MVC	Механічна	100–3000	40–100	25–40	20 000–100 000
SWRO	Механічна	<1000–320 000	Навколишнє середовище	40–50	10 000–46 000
BWRO	Механічна	<1000–320 000	Навколишнє середовище	85–90	50–10 000
ED	Електрична	до 14 500	Навколишнє середовище	до 95	200–3000

Термічне опріснення, або дистиляція, передбачає зміну фаз фізичного стану води, коли відокремлення прісної води від солей здійснюється шляхом випаровування. Пара утворюється нагріванням солоної води, після чого вона конденсується для отримання прісної води. Основними технологіями дистиляції є багатоступенева флеш-дистиляція (MSF), багаторефектна дистиляція (MED) та компресія пари (VC). Процеси термічного опріснення відрізняються температурою і тиском, при яких досягається випаровування води. Тепло для утворення пари може надходити від теплової або механічної енергії.

У разі мембранного опріснення не відбувається фазових змін робочої рідини. Процес розділення базується на застосуванні напівпроникних мембран, які вибірково пропускають одні речовини, затримуючи інші. Найпоширенішими методами мембранного опріснення в поєднанні з вітровою енергією є електродіаліз (ED) та зворотний осмос (ЗО). Прямий осмос, зворотний елек-

тродіаліз і мембранна ємнісна деіонізація все ще перебувають на стадії розробки [27, 16, 17]. При застосуванні електродіалізу енергія подається у вигляді електроенергії. Установка ED складається з комірок, оснащених анодом і катодом, що розділені напівпроникними мембранами. Аніонні мембрани затримують катіони, тоді як катіонні мембрани утримують аніони. Іони, що містяться в солоній воді, притягуються до електродів з протилежним зарядом. Під час руху до електродів іони затримуються напівпроникними мембранами, що розташовані між ними, і в такий спосіб видаляються з живильної води, дозволяючи отримати прісну воду [28]. Однак ED обмежується опрісненням води з концентрацією солей до 5000 ppm. Для вищих концентрацій солей зазвичай надають перевагу технології ЗО.

Зворотний осмос заснований на використанні напівпроникних мембран, які відокремлюють молекули води з низьким вмістом солей від основного об'єму солоної

води. Для проникнення води через мембрану необхідно створити тиск, який перевищує осмотичний бар'єр [29]. Величина осмотичного бар'єра залежить від концентрації солей у живильній воді. Потрібно щонайменше 7 кПа (1 psi) на кожні 100 мг/л розчинених у воді солей [30]. Це означає, що для типової морської води з концентрацією солей 35 000 ppm необхідно створити тиск у межах 50–70 бар, що потребує значних витрат енергії. Обсяг отриманої прісної води становить приблизно 25–30 % початкового об'єму морської води. Оскільки тиск соляного концентрату (ропи) на виході з модуля 30 майже дорівнює тиску подачі на вході, його можна використати для відновлення частини енергії завдяки використанню пристроїв рекуперації енергії (ПРЕ), як показано на рис. 2.

Перші ПРЕ на заводах 30 були турбінного типу, як-от турбіни Френціса, Пельтона та турбонагнітач [31]. Ці

пристрої перетворювали гідравлічну енергію потоку ропи на електричну енергію та/або механічну для приводу основного насоса високого тиску або допоміжного насоса, тим самим знижуючи енергоспоживання. В разі використання ПРЕ-турбонагнітача тиск створюють у два етапи: спочатку головним насосом високого тиску, а потім насосом, вал якого пускається в роботу турбіною турбонагнітача. Можлива також окрема комбінація насоса та гідромотора, де турбіна безпосередньо надає руху насосу високого тиску.

З початку 2000 року застосовують ПРЕ з обмінником тиску [32], так звані ізобаричні камерні ПРЕ, які замінили турбінні пристрої у більшості сучасних заводів 30. Існують ізобаричні камери з роторним і поршневим приводом.

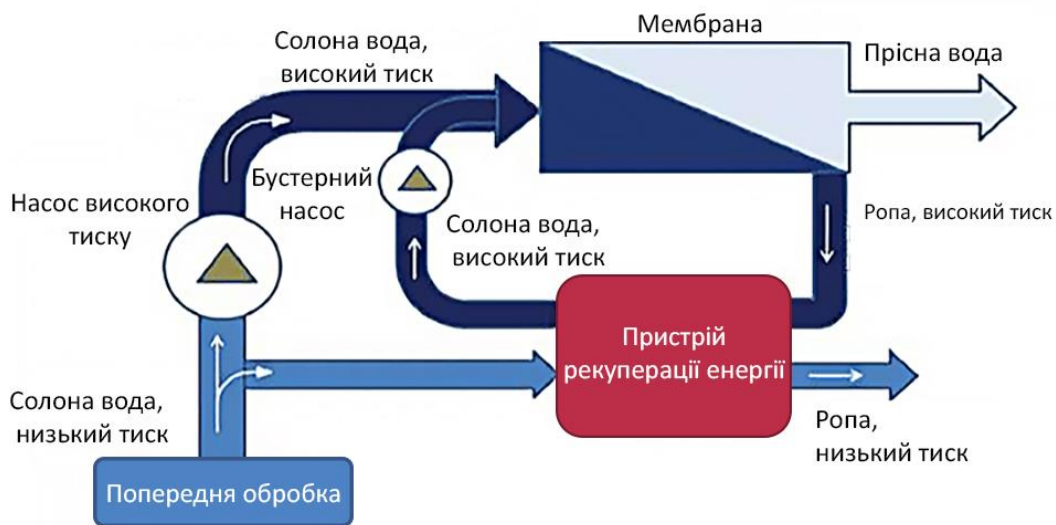


Рис. 2. Схема зворотного осмосу з пристроєм рекуперації енергії

Fig. 2. Reverse osmosis system with energy recovery device

У роторному ПРЕ концентрат з високим тиском на виході подається на ротор та обертає його. Ротор передає тиск від концентрату назад до солоної води на вході, зменшуючи в такий спосіб необхідну потужність зовнішнього джерела енергії для насосів. Переваги роторних ПРЕ – це компактніший розмір, довговічність і модульний дизайн, що дає змогу з'єднувати кілька пристроїв у паралельному режимі [33].

У поршневих ПРЕ тиск від концентрату на виході передається до подачі солоної води за допомогою поршневих механізмів. Поршневі ПРЕ мають менший відсоток витоку концентрату до подачі солоної води під час обміну тиском, нижчий рівень шуму та вищу стабільність роботи обладнання. Серед недоліків – складніша конструкція та необхідність частішого обслуговування через більшу кількість рухомих частин.

Енергетична ефективність пристроїв ПРЕ: для турбіни Френціса – на рівні 75 %, для турбонагнітача – 80 %, для турбіни Пельтона – 85 %. Ефективність ізобарич-

них камер – близько 95–97 %. Рівень питомого енергоспоживання для заводів 30, де встановлені різні ПРЕ, – на рівні 6 кВт·год/м³ при використанні турбін Франціса; 3,5–5,9 кВт·год/м³ – з турбінами Пельтона; 3,5–4,6 кВт·год/м³ – з поршневими ПРЕ та 3,0–5,3 кВт·год/м³ – з роторними ПРЕ [34]. Енергозбереження при використанні ПРЕ може становити від 25 до 40 %.

Технологія 30 застосовується для очищення як солонуватої, так і морської води. Багато експертів вважають, що 30 є найпридатнішою технологією опріснення води для використання енергії вітру. Опріснення за допомогою 30 потребує механічної енергії для нагнітання тиску морської води, що може бути забезпечено ВТ з прямим механіко-гідравлічним з'єднанням або за допомогою вітроелектричної установки та електронасоса.

Класифікація вітроенергетичних систем опріснення води наведена, згідно з [35], на рис. 3.

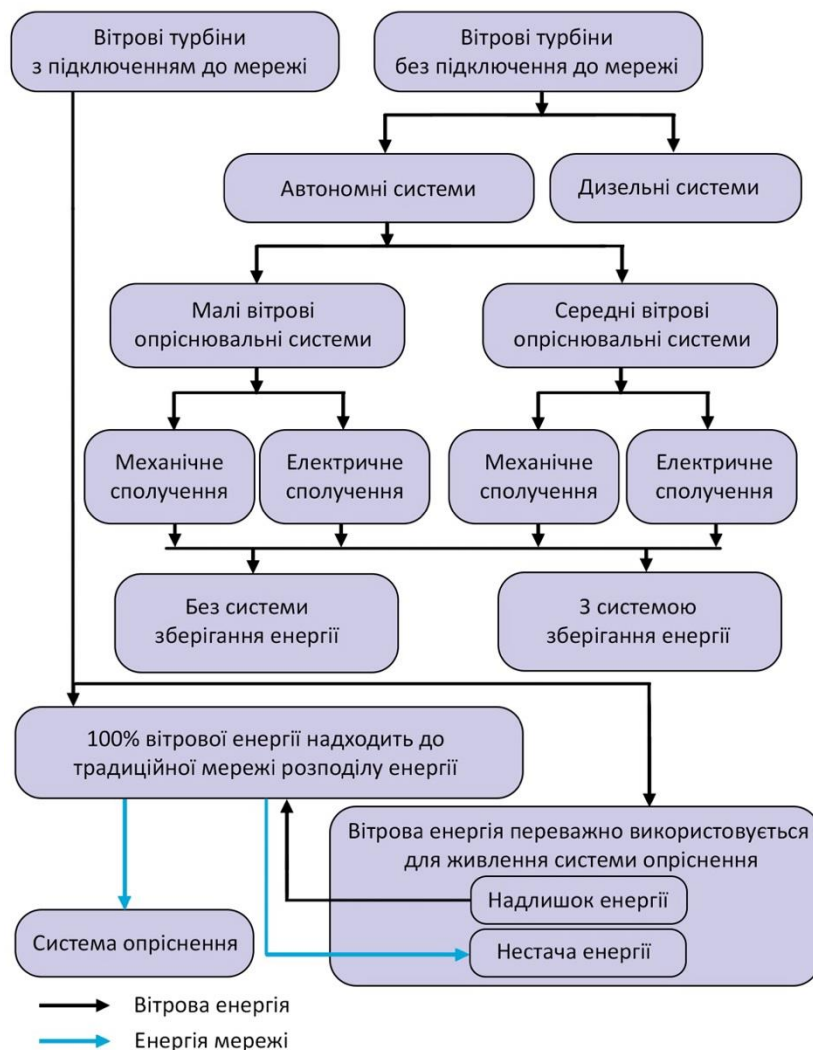


Рис. 3. Класифікація вітроенергетичних систем опріснення

Fig. 3. Classification of wind-driven desalination systems

Механіко-гідролічні вітроенергетичні системи опріснення. У таких системах ВТ механічно та гідролічно з'єднана із системою ЗО. Це забезпечує низку переваг: високу ефективність, міцність і надійність, що робить ці системи особливо привабливими для використання у віддалених місцевостях [36]. Зменшуються проміжні втрати енергії, оскільки виключається етап електричного перетворення, а відмова від генератора значно знижує вагу гондоли вітроустановки. У таких системах можуть використовуватися акумуляторні або напірні баки для зберігання води (енергії), а насос високого тиску може бути розташований у гондолі та безпосередньо підключений до ротора ВТ. Отже, швидкість роботи

насоса, а відповідно й обсяг виробництва води, залежить від швидкості вітру. Хоча ці системи все ще перебувають на стадії розвитку та орієнтовані на нішевий ринок, тестування і симуляції показують, що існує кілька операційних стратегій для подолання проблем нестабільності вітрової енергії та підвищення коефіцієнта відновлення. З розвитком цих технологій вони можуть стати багатонадійними та конкурентоспроможними у порівнянні з традиційними системами.

Огляд прототипів та концептів вітроенергетичних систем опріснення з механіко-гідролічним з'єднанням представлено в табл. 2.

Таблиця 2. Вітроенергетичні системи опріснення з прямим механіко-гідролічним з'єднанням

Table 2. Stand alone wind-driven desalination systems with direct mechanic–hydraulic connection

Посилання	Джерело енергії	Потужність, кВт	Технологія опріснення	Продуктивність, м³/добу	ПРЕ	Носій зберігання енергії	Обсяг зберігання енергії	Рік	Примітки
[36]	ВТ		BWRO	0,15–0,291	-	2 Акумулятори	36 л при 1100 кПа	1990	Пілот

Поси- лання	Джере- ло енер- гії	Потуж- ність, кВт	Техноло- гія опріс- нення	Продук- тивність, м³/добу	ПРЕ	Носій збері- гання енергії	Обсяг збе- ріган-ня енергії	Рік	Приміт- ки
[37]	Плавуча ВТ	5000	SWRO	33 000	PX	Гідропневма- тичний	6,5 МВт·год		Концепт
[38,39]	ВТ	1,2	BWRO	4		Гідропневма- тичний	0,3 м³	2005	Пілот
[40]	ВТ	600	SWRO/ MVC	2730/ 1400	-	Акумулятор	-	2004	Пілот
[41]	ВТ	60	SWRO	5–10	PX	-	-	2008	Пілот
[42]	ВТ	500	SWRO	600	iSave	-	-	-	Пілот

Вітроенергетична компенсація затрат електроенергії для опріснення води. Використання енергії вітру для виробництва електроенергії можна розділити на два основні напрями. Перший – це виробництво електроенергії на ВЕС з підключенням до промислової електромережі для компенсації енергозатрат на опріснення води. Другий – автономне енергозабезпечення опріснювальної установки безпосередньо від вітрової турбіни.

Підключення до електромережі дає змогу збалансувати потужність, яка подається на опріснювальну систему, з потужністю, необхідною для процесів опріснення. Електроенергія, що виробляється з мінливого вітрового ресурсу, надходить в промислову електромережу, а опріснювальна установка одержує стабільне постачання електроенергії від електромережі. Це

справедливо як для великих вітрових електростанцій, так і для окремих вітрових турбін. Отже, процес виробництва води стає повністю незалежним від локальних умов виробництва вітрової електроенергії та її доступності. Підключення до електромережі забезпечує стабільне електропостачання для опріснювальної установи, дозволяючи їй працювати в оптимальних умовах. Це особливо важливо для таких процесів, як 3О, які є чутливішими до змін і коливань умов роботи. Крім того, оптимізація роботи вітрових турбін і опріснювальної установки може здійснюватися майже незалежно одна від одної.

У табл. 3 наведено короткий огляд систем вітроенергетичної компенсації затрат електроенергії для опріснення води.

Таблиця 3. Приклади систем вітроенергетичної компенсації затрат електроенергії для опріснення води

Table 3. Examples of wind energy compensation systems for electricity costs for water desalination

Поси- лання	Дже- рело енергії	Потуж- ність	Технологія опріснен- ня	Продук- тивність, м³/добу	ПРЕ	Зберігання енергії	Запуск в експлуа- тацію	Примітка
[43]	ВТ + ме- режа	10 MBT	SWRO	5000	-	-	-	Економічний ана- ліз
[44]	ВТ + ме- режа	2,64 MBT	SWRO	5000	ERI	-	2002	Прототип
[45]	ВТ + ме- режа		SWRO		-	Гідравлічне сховище	-	Оптимізаційний аналіз
[46]	ВТ + со- нячні па- нелі + мережа	50 кВт + 60 м²	MVC		-	Оптиміза- ційна модель	-	Оптимізаційний аналіз
[47,48]	ВТ + со- нячні па- нелі + мережа	275 кВт + 50 кВт	SWRO	300	-	-		Прототип
[49]	ВТ + ме- режа	6–30 кВт	SWRO	24	-	-		Порівняння мере- жевого та автоно- много живлення

Як один з прикладів реалізації таких систем можна розглянути завод SWRO в Перті, Західна Австралія, який розпочав роботу в листопаді 2006 року. Електроенергію для роботи заводу постачає вітроелектростанція Eru Downs потужністю 80 МВт, яка здатна виробляти

270 ГВт·год електроенергії на рік для місцевої електромережі. Це повністю компенсує річне споживання електроенергії опріснювальним заводом, яке становить 180 ГВт·год [50].

Автономне вітроенергетичне забезпечення установок опріснення води. У багатьох випадках підключення системи опріснення води до промислової електромережі може бути недоступним, особливо у віддалених прибережних районах та острівних громадах. Через географічну ізоляцію або економічні обмеження будівництво електромережі та її інфраструктури може виявитися недоцільним. Водночас вітрова енергія у таких місцях часто є доступним і багатим ресурсом, який можна використовувати для автономного виробництва електроенергії.

В автономних вітроенергетичних системах генерована потужність може змінюватися в процесі експлуатації у співвідношенні 1:10 або більше, залежно від умов на місці [51]. Такі коливання потужності є проблемою для роботи опріснювальних установок, які розраховані на роботу в стабільних і відносно постійних умовах. Коливання потужності негативно впливають на термін служби компонентів і продуктивність опріснювальної установки, що так само може спричинити порушення взаємодії з ВЕС, як зазначено в [43, 46]. Тому стійкість і надійність вітроенергетичного забезпечення опріснювальних установок стають критично важливими аспектами під час проектування системи. Важливо ретельно підходити до вибору розмірів кожного компонента, щоб забезпечити потреби у виробництві води й електроенергії, мінімізувати перебої в роботі та зменшити інвестиційні й експлуатаційні витрати [52].

З метою запобігання перебоєм і згладжування коливань потужності вітроенергетичних установок використовують накопичувачі енергії та резервні системи електропостачання на базі дизельних генераторів. Детальні огляди систем зберігання енергії, інтегрованих з вітроенергетичними системами, наведені у [53, 54], а варіанти зберігання енергії для опріснення води за допомогою ВДЕ розглядаються у [55]. У [56] підсумовано основні характеристики систем зберігання енергії для вітроенергетики, зокрема з погляду енергетичної потужності, часу розрядки й вартості. Серед найважливіших переваг зберігання енергії для вітрової енергетики є зміщення навантаження у часі, регулювання та контроль, а також зменшення нестабільності генерованої потужності. Окрім потенціалу вітрових ресурсів, слід ретельно аналізувати можливість та тривалість відключення електричного навантаження. Зберігання енергії відіграє важливу роль у визначенні продуктивності системи та впливає на капітальні й експлуатаційні витрати.

Під час проектування невеликої автономної системи ключовим завданням є пошук оптимального компромісу між надійністю та складністю системи з урахуванням економічних обмежень. Інфілд [57] представив дослідження чутливості роботи автономної вітроенергетичної установки ЗО до таких параметрів, як швидкість вітру, ємність акумуляторної батареї та робочий тиск. У дослідженні опріснювальна установка працювала тільки

тоді, коли потужність, що забезпечувалася як вітрогенератором, так і системою акумуляторів, була достатньою для задоволення її потреб в електроенергії і робота у змінних умовах не допускалася. Обсяг виробленої води був пропорційний часу, протягом якого опріснювальна установка функціонувала. Час роботи залежав від середньої швидкості вітру, робочого тиску та ємності акумуляторів, які були налаштовані таким чином, щоб мінімізувати цикли ввімкнення та вимкнення установки ЗО. Автор дійшов висновку, що для автономних систем необхідні ретельні проєктні розрахунки, спрямовані на оптимальне узгодження компонентів системи, зокрема ВТ, опріснювача та ємності для зберігання енергії. Місцеві вітрові умови та ємність акумулятора впливають на вибір номінального робочого тиску опріснювача. Водночас оптимальна потужність опріснення залежить від середньої швидкості вітру на вибраній ділянці. Якщо система зберігання енергії недостатньо велика для повного згладжування коливань електричної потужності, опріснювальна установка працює в змінних умовах, які можуть бути далекими від оптимальних. У цьому разі вітроенергетична система опріснення повинна бути спроектована та керована так, щоб забезпечити роботу кожного компонента в межах його експлуатаційних можливостей.

Іноді для балансування попиту та пропозиції води вигідніше зберігати воду, ніж енергію. За наявності відповідних топографічних умов застосовуються гідроакумулявальні станції. У дослідженні [45] було запропоновано поєднання опріснення морської води з гідроакумулявальною станцією для острова Сан-Вісенте (Кабо-Верде) в Атлантичному океані. В цій системі надлишкова енергія, вироблена ВТ, частково використовується для виробництва прісної води, яка зберігається в нижньому резервуарі гідроакумулявальної станції, а решта надлишкової енергії використовується для перекачування прісної води з нижнього резервуара до верхнього. Гідроакумулявальна станція використовується для виробництва електроенергії в умовах слабого вітру.

У деяких випадках вітрова енергія є лише одним з компонентів системи енергозабезпечення опріснювальних установок на базі відновлюваних джерел енергії [58]. Зокрема, поєднання вітрових і фотоелектричних установок вважається перспективною комбінацією для опріснення води за відповідних кліматичних умов [47, 48]. Одним з прикладів такої комбінації є гібридна вітро-фотоелектрична станція для опріснення води в селі Мерсінін на острові Донукса, представлена в роботі Манолакосу та ін. [59]. Тут створена мікрогідрравлічна станція, в якій прісна вода перекачується з нижнього резервуара до верхнього, коли є надлишок виробництва електроенергії, а турбогенератор Пелтона використовується для рекуперації енергії. Бен Алі та інші [60] запропонували модульну систему зберігання енергії для компенсації змінної вхідної потужності, а також для управління коливаннями та перебоєми

в роботі установок на ВДЕ. У своєму прототипі опріснювача BWRO, що живиться від гібридної вітро-фотоелектричної станції, вони застосували модульну гідроаккумулявальну систему. Резервуари для солонуватої та прісної води виконують функції накопичувачів води й потенційної енергії. Система перекачування солонуватої води складається з кількох насосів, які можна комутувати для оптимального використання наявної енергії. Простота й модульність цієї конфігурації робить її особливо привабливою для використання в сільських регіонах. Проте автори підкреслюють складність і важливість правильного вибору розміру, проектування системи та управління нею. Використання комбінації ВДЕ підвищує складність системи, збільшує капітальні витрати і вартість питної води, тому проектування таких систем іноді потребує компромісу.

Для стабілізації умов енергозабезпечення технологічних схем опріснення від вітро-фотоелектричних установок використовуються також резервні системи електроживлення на основі дизель-генераторів. Як показано в роботі Хабалі та Салеха [61], така комбінація, у порівнянні з живленням за допомогою виключно дизель-генератора, сприяє зменшенню як викидів CO₂, так і витрат на виробництво води. При цьому витрати зменшуються зі збільшенням потужності ВТ та середньої річної швидкості вітру. До недоліків використання дизельних генераторів можна віднести: збільшення викидів, прив'язку вартості виробленої води до цін на дизельне паливо, які зростають у віддалених районах, а також необхідність регулярних поставок палива [62].

Короткий огляд автономних вітроенергетичних опріснювальних систем наведено в табл. 4, а схема можливих конфігурацій показана на рис. 4.

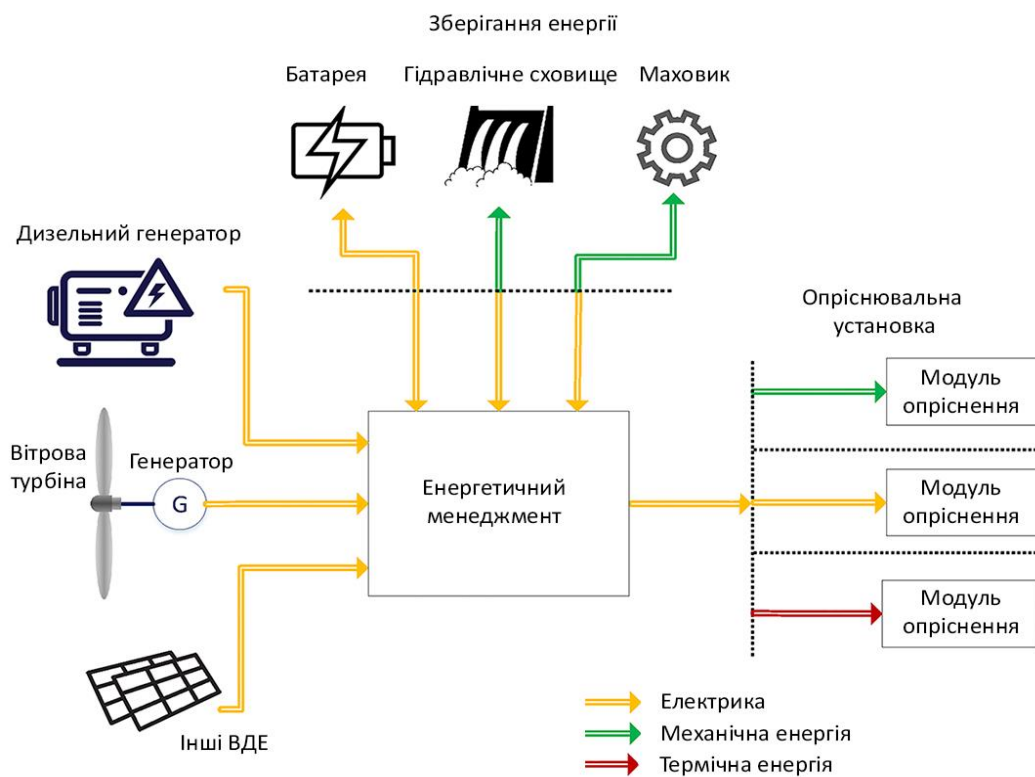


Рис. 4. Універсальна схема конфігурації автономних вітроенергетичних систем опріснення води

Fig. 4. Universal configuration scheme of autonomous wind energy water desalination system

Вітроенергетичні системи опріснення зі змінною потужністю. Іншим варіантом досягнення майже стабільних умов роботи з мінімальним розміром накопичувача енергії є використання модульної опріснювальної установки. Така установка може підвищити гнучкість системи, дозволяючи дискретно підлаштовувати навантаження до джерела живлення. Однак це вимагає частого вмикання та вимкнення опріснювача, що може негативно впливати на його компоненти. Наприклад, для установки ЗО періодичні перебої в роботі можуть призвести до швидшого зниження ефективності мембрани через ущіль-

нення, збільшення забруднення і концентраційної поляризації [78]. Пенате та ін. [66] провели моделювання роботи модульної опріснювальної установки, що працює від вітру, та порівняли її з установкою фіксованої потужності. У модульній SWRO потужність регулюється підключенням або відключенням частини блоків ЗО залежно від наявності вітру. Згідно з результатами моделювання, установка SWRO з поступовим нарощуванням потужності є більш універсальною, оскільки дає змогу підлаштовуватися під доступну кількість енергії, що забезпечує тривалішу роботу системи протягом року.

Таблиця 4. Приклади автономних вітроенергетичних опріснювальних систем

Table 4. Examples of stand-alone wind energy desalination system

Поси- лання	Дже- рело енергії	По- туж- ність, кВт	Технологія опріснення	Про- дуктив- ність, м³/добу	ПРЕ	Зберігання енергії	Обсяг збері- гання енергії	Запуск в екс- плуа- тацію	Примітки
[63]	ВТ + ме- режа + дизель	600– 2000	SWRO	180– 1400	Пор- шне- ві ERD	Маховик + кілька варі- антів	-	2007	Комерційна система
[64]	ВТ	100	SWRO	100			-	-	Пілотна уста- новка
[65]	ВТ + ди- зель	15– 22,5	SWRO/MVC	30	-	-		-	Техніко-еконо- мічне обґрун- тування
[59]	ВТ + со- нячна енергія	10– 400	SWRO	8,4		Акумулятори + мікрогідро- станція	100 Ач + резер- вуар	-	Інструмент моделювання
[57]	ВТ	5	SWRO	6,2	-	Батареї	125–1000 Ач		Пілотна уста- новка
[66]	ВТ	100– 300	SWRO	1000		Маховик/ба- тареї	1200 Ач		Пілотна уста- новка
[67]	ВТ	460	SWRO	72–192		Маховик/ба- тареї	125–1000 Ач		Пілотна уста- новка
[68]	ВТ	460	SWRO/ MVC/EDR	200/50 /72–192		Маховик		1999	Пілотна уста- новка
[69]	ВТ	15	SWRO	18		Батареї + су- перконденса- тор			Експеримента- льний тест
[60]	ВТ + со- нячна енергія	2 + 2	BWRO	7,2		Гідравлічне сховище	2,18– 4,36 м³		Експеримента- льний тест
[70]	ВТ	5400	BWRO	62 208		Батареї			Аналіз оптимі- зації
[71]	ВТ + со- нячна енергія	0,9 + 3,96	SWRO	3,12		Батареї	1800 Ач	2001	Пілотна уста- новка
[52]	ВТ	15–50	SWRO	18–96		Батареї		-	Моделювання та масштабу- вання
[72]	ВТ + со- нячна енергія	800 + 200	SWRO	4320		Гідравлічне сховище	40 000 м³ (480 кВт)		
[73]	ВТ	300	MVC	360	-	-	-	1993	
[74]	ВТ	26,43	SWRO	<96	-	-	-	2001	Експеримента- льний тест
[62]	ВТ	2,2	SWRO		Насос Кла- рка	-	-	2002	Моделювання
[75]	ВТ	30	SWRO	5–20		-	-		
[61]	ВТ	14–20	BWRO	22–33		-	-		Концептуаль- ний та дизайн економічний аналіз

Поси- лання	Дже- рело енергії	По- туж- ність, кВт	Технологія опріснення	Про- дуктив- ність, м³/добу	ПРЕ	Зберігання енергії	Обсяг збері- гання енергії	Запуск в екс- плуа- тацію	Примітки
[76]	ВТ + со- нячна енергія	6/2,5	BWRO	9/1,5		-	-		Пілотна уста- новка
[77]	ВТ	4–19	ERD	92,4		-	-		Пілотна уста- новка

Вплив частих увімкнень та вимкнень є одним із факторів, які враховуються при виборі компонентів та їх розмірів, як показано в дослідженні Кокласа та Папатанасіу [52]. В аналізі автономної опріснювальної установки ЗО з вітровим приводом було змодельовано річну роботу системи з урахуванням змін таких параметрів, як розмір ВТ, опріснювальної установки, акумуляторної батареї та операційної стратегії. Щодо продуктивності, то порівнюються річний обсяг виробництва води, кількість запусків і зупинок опріснювальної установки, а також відносні капітальні витрати й витрати на кубічний метр води. Збільшення потужності опріснювальної установки для підвищення виробництва води та зменшення частоти запусків і зупинок системи виявляється ефективнішим, ніж збільшення потужності вітрової електростанції. Натомість розмір акумуляторів має бути мінімальним, щоб забезпечити короткочасну роботу і промивання системи в умовах відсутності вітру. Автори припускають, що 2:1–3:1 є хорошим співвідношенням між потужністю ВТ і опріснювача, залежно від середньої швидкості вітру та кривої потужності турбіни.

З двох запропонованих операційних стратегій, одна з яких спрямована на максимізацію виробництва води, а інша – на мінімізацію запусків і зупинок системи з обов'язковою промивкою опріснювальної установки при кожній зупинці, остання виявилася ефективнішою, навіть якщо це означає зменшення обсягу виробленої води. Подібне дослідження було проведено у роботі Спіру та Анагностопулос [72], де розглядалася оптимальна конструкція і стратегія експлуатації автономної вітро-фотоелектричної опріснювальної установки. На відміну від системи, представленої в роботі Кокласа і Папатанасіу, в цьому разі акумуляторні батареї були замінені гідравлічною системою зберігання енергії.

У роботі [79] було змодельовано і порівняно три конфігурації енергоживлення на основі ВТ-акумуляторів, ВТ-фотоелектричних установок і ВТ-дизельних електростанцій. Результати були отримані для установки SWRO з продуктивністю 10 000 м³ на добу. Для кожної конфігурації електроживлення досліджувались режими роботи насосів SWRO зі змінним тиском та модульна установка в складі трьох ліній, що працюють незалежно одне від одного зі сталим значенням робочого тиску. В результаті було показано, що модульна установка SWRO має більшу тривалість роботи, але при цьому виробляє

менше або стільки ж води, скільки й установка зі змінною продуктивністю, а вартість води є вищою.

Для провінції Апар в Саудівській Аравії розглядалось декілька операційних стратегій експлуатації вітроенергетичної системи BWRO [70]: змінний або постійний режим роботи системи ЗО (змінний або фіксований робочий тиск), фіксована або змінна потужність системи ЗО (постійна або змінна кількість активних напірних резервуарів у будь-який момент часу), тип накопичувача енергії (акумуляторні батареї та гідравлічні накопичувальні резервуари). Було з'ясовано, що оптимізована установка з використанням накопичувальних резервуарів може забезпечити меншу вартість води та менш складну структуру установки. Крім того, використання змінного тиску подачі може допомогти в послабленні збурень, які виникають у вигляді переривчастості вітру, а використання фіксованого тиску живильної води на мембрану забезпечує передбачувану продуктивність. Однак це вимагає роботи установки на різних наборах мембран щогодини, що потребує додаткових систем автоматичного керування. Вартість води в разі використання накопичувальних резервуарів може становити лише 7,42 \$/м³, а в разі використання акумуляторної батареї – близько 19,7 \$/м³.

Висновки. Ефективність інтеграції вітрової енергії в технологічні схеми опріснення води залежить від здатності вибраної конфігурації опріснювальної станції максимально використовувати нестабільне генерування потужності вітроустановкою.

Найпридатнішою технологією опріснення води для використання енергії вітру є ЗО, який підходить для широкого діапазону зміни солоності води та продуктивності установок. Мембрани ЗО мають здатність функціонувати зі змінними параметрами потоку живильної води в межах безпечного робочого діапазону, визначеного постачальниками. Проте існують проблеми, пов'язані з можливим погіршенням якості та скороченням терміну експлуатації мембран у довгостроковій перспективі, які потребують подальшого дослідження.

Вітроенергетичні системи опріснення води, що безпосередньо підключені до промислової електромережі, забезпечують незалежну роботу як вітроенергетичних, так і опріснювальних установок, причому останні працюють у стабільних умовах експлуатації. Вони залишаються на

сьогодні найбільш сприятливою та економічно ефективною конфігурацією.

Для ефективного функціонування автономних вітроенергетичних систем опріснення води необхідно використовувати резервуари для зберігання води та енергії, резервні джерела електроживлення, а також впроваджувати змінну структуру технологічної схеми опріснення або мембрани зі змінними робочими параметрами.

У деяких випадках вітрова енергія є лише одним з компонентів системи енергозабезпечення опріснювальних установок на основі відновлюваних джерел енергії. Поєднання вітрових і фотоелектричних установок вважається перспективним рішенням для опріснення води за сприятливих кліматичних умов.

Вітроенергетичне опріснення має значний потенціал для економічно ефективного виробництва прісної води з низькими викидами CO₂.

ПОСИЛАННЯ

1. Van Wijk A., Chatzimarkakis J. Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative. Brussels: Hydrogen Europe. 40 p.
2. Memorandum of understanding between the European Union and Ukraine on a Strategic Partnership on Biomethane, Hydrogen and other Synthetic Gases. 02.02.2023. P. 8. https://energy.ec.europa.eu/memorandum-understanding-between-european-union-and-ukraine-strategic-partnership-biomethane_en
3. Книш К., Кудря С., Галабала М. Біла Книга 2021. Офшорна вітроенергетика та “зелений” водень: відкриття нових меж енергетичної потужності України. С. 14. https://www.asterslaw.com/ua/press_center/publications/white_paper_2021_off-shore_wind_energy
4. Philip Woods, Heriberto Bustamante, Kondo-Francois Aguey-Zinsou. The hydrogen economy Біла Книга 2021 Where is the water? Energy Nexus. Volume 7. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100123>
5. Підкоморна Ю. Міненерго завершило обговорення Водневої стратегії. 27 вересня 2022. – <https://mev.gov.ua/novyna/minenerho-zavershylo-obhovorennya-vodnevoyi-stratehiyi-yuliya-pidkomorna>
6. IRENA. Renewable Energy Statistics 2019; IRENA: Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2019; Volume 1, p. 348.
7. Raluy R. G.; Serra L., Uche J. Life cycle assessment of desalination technologies integrated with renewable energies. Desalination. 2005, 183, 81–93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.023>
8. Tzen E. Wind-Powered Desalination—Principles, Configurations, Design, and Implementation; Elsevier Inc.: Amsterdam, The Netherlands, 2018; pp. 91–139. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-815244-7.00003-9>
9. Panagopoulos A. Water-energy nexus: Desalination technologies and renewable energy sources. Environ. Sci. Pollut. Res. 2021, 28, 21009–21022. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-13332-8>
10. Koulouri A., Moccia J. Saving Water with Wind Energy; Technical Report; European Wind Energy Association: Brussels, Belgium, 2014.
11. García-Rodríguez L. Renewable energy applications in desalination: State of the art. Sol. Energy. 2003, 75, 381–393. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.005>
12. Kalogirou S. A. Seawater desalination using renewable energy sources. Prog. Energy Combust. Sci. 2005, 31, 242–281. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2005.03.001>
13. Kondili E. Hybrid Wind Energy Systems for Desalination; Woodhead Publishing Limited: Sawston, UK. 2010, pp. 506–535. <https://doi.org/10.1533/9781845699628.3.506>
14. Eltawil M. A., Zhengming Z., Yuan L. A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems. Renew. Sustain. Energy Rev. 2009, 13, 2245–2262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.011>
15. Abdelkareem M. A., El Haj Assad M., Sayed E. T. Sudan B. Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants. Desalination. 2018, 435, 97–113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.018>
16. Nassrullah H., Anis S. F., Hashaikeh R., Hilal N. Energy for desalination: A state-of-the-art review. Desalination. 2020, 491, 114569. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2020.114569>
17. Okampo E. J., Nwulu N. Optimisation of renewable energy powered reverse osmosis desalination systems: A state-of-the-art review. Renew. Sustain. Energy Rev. 2021, 140, 110712. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.110712>
18. García-Rodríguez L. Desalination by wind power. Wind Eng. 2004, 28, 453–463. <http://dx.doi.org/10.1260/0309524042886405>
19. Ma Q., Lu H. Wind energy technologies integrated with desalination systems: Review and state-of-the-art. Desalination. 2011, 277, 274–280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2011.04.041>
20. Kondili E., Kaldellis J. K. Wind Energy Based Desalination Processes and Plants. Technical Report Infrastructure. 2009. http://ikaros.teipir.gr/OPS/Archimedes/WRECX_wind_desal_Kondili.pdf
21. Al-Rawajfeh A., Jaber S., Etawi H. Desalination by renewable energy: A mini review of the recent patents. Hem. Ind. 2017, 71, 451–460. <http://dx.doi.org/10.2298/HEMIND160308008A>

22. Васько П. Ф., Васько В. П. Динамика нагрузочных режимов работы ветроэлектрической установки, обусловленная порывами скорости ветра. Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. Будівельні конструкції, будівлі та споруди. 2001. 1(4). С. 140–144.
23. Васько П. Ф., Васько В. П., Даниленко О. І., Должук В. В. Експериментальні дослідження режимів генерування та споживання реактивної потужності серійною вітроелектричною установкою з асинхронним генератором. Відновлювана енергетика. 2008. № 1. С. 34–38.
24. Васько П. Ф., Мазуренко І. Л. Аналіз імовірнісних характеристик вітроелектричних станцій як джерела енергії для опріснення морської води в Азово-Чорноморському регіоні України. Енерготехнології та ресурсозбереження (Energy Technologies & Resource Saving, ISSN 2413-7723, eISSN 2664-3561). 2023. № 4. С. 42–56. DOI: 10.33070/etars.4.2023.04
25. Васько П. Ф., Вербовий А. П., Пазич С. Т. Реалізація стохастичної моделі поздовжньої складової швидкості вітру для задач вітроенергетики. Відновлювана енергетика. 2017. № 3. С. 54–61.
26. Vasko P., Verbovij A., Moroz A., Pazych S, Ibragimova M., Sahno L. Concept of Accumulation of Energy from Photovoltaic and Wind Power Plants by Means of Seawater Pumped Hydroelectric Energy Storage. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS), pp. 188–191. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764167
27. Curto D., Franzitta V., Guercio A. A review of the water desalination technologies. Appl. Sci. 2021, 11, 670. <http://doi.org/10.3390/app11020670>
28. Voutchkov N. Desalination Engineering: Planning and Design; McGraw Hill Professional: New York, NY, USA, 2012.
29. Qasim M., Badrelzaman M., Darwish N. N., Darwish N. A., Hilal N. Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. Desalination 2019, 459, 59–104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2019.02.008>
30. Guirguis M. J. Energy Recovery Devices in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants with Emphasis On Efficiency and Economical Analysis of Isobaric Versus Centrifugal Devices. Ph.D. Thesis, University of South Florida, Tampa, FL, USA, 2011.
31. Farooque A. M., Jamaluddin A. T. M., Al-Mobayed A. S. A., Qasim A. H. (2004). Comparative study of various energy recovery devices use in SWRO process. TR.3807/EVP 02005. doi: 10.1016/j.desal.2007.06.004
32. Urrea S. A., Reyes F. D., Suárez B. P., de la Fuente Bencomo J. A. Technical review, evaluation and efficiency of energy recovery devices installed in the Canary Islands desalination plants. Desalination. 2019. 450, 54–63. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916417314510>
33. Kim J., Park K., Yang D. R., Hong S. A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants. Appl. Energy. 2019, 254:113652. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113652
34. Peñate B., García-Rodríguez L. (Energy optimisation of existing SWRO (seawater reverse osmosis) plants with ERT (energy recovery turbines): technical and thermoeconomic assessment. Energy. 2011, 36, 613–626. doi: 10.1016/j.energy.2010.09.056
35. Gonzalez J., Cabera P., Carta J. Wind energy powered desalination systems, in: J. Kucera (Ed.), Desalination Water From Water. Wiley, Beverly, 2019, pp. 567–646. <https://doi.org/10.1002/9781119407874.ch14>
36. Robinson R., Ho G., Mathew K. Development of a reliable low-cost reverse osmosis desalination unit for remote communities. Desalination. 1992, 86, 9–26. [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(92\)80020-A](https://doi.org/10.1016/0011-9164(92)80020-A)
37. Cutajar C., Sant T., Buhagiar D., Farrugia R. N. Modelling of a hybrid floating wind, energy storage and desalination unit. In Proceedings of the 2019 Offshore Energy and Storage Summit, OSES. 2019, Brest, France, 10–12 July 2019, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1109/OSES.2019.8867170>
38. Liu C. C. K., Park J. W., Migita R., Qin G. Experiments of a prototype wind-driven reverse osmosis desalination system with feedback control. Desalination. 2002, 150, 277–287. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00984-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00984-0)
39. Liu C. C. Wind-Powered Reverse Osmosis Water Desalination for Pacific Islands and Remote Coastal Communities; Technical Report 128, Desalination and Water Purification Research and Development Program; US Department of the Interior, Bureau of Reclamation: Washington, DC, USA, 2009.
40. Witte T., Siegfriedsen S., El-Allawy M. WindDeSalter® Technology: Direct use of wind energy for seawater desalination by vapour compression or reverse osmosis. Desalination. 2003, 156, 275–279. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00358-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00358-8)
41. Heijman S. G. J., Rabinovitch E., Bos F., Olthof N., van Dijk J. C. Sustainable seawater desalination: Stand-alone small scale windmill and reverse osmosis system. Desalination. 2009, 248, 114–117. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.045>
42. Greco F., De Bruycker D., Velez-Isaza A., Diepeveen N., Jarquin-Laguna A. Preliminary design of a hydraulic wind turbine drive train for integrated electricity production and seawater desalination. J. Phys. Conf. Ser. 2020, 1618, 032015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1618/3/032015>

43. Dehmas D. A., Kherba N., Hacene F. B., Merzouk N. K., Merzouk M., Mahmoudi H., Goosen M. F. On the use of wind energy to power reverse osmosis desalination plant: A case study from Ténès (Algeria). *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2011, 15, 956–963.
44. Rybar A. S., Vodnar M., Vartolomei F. L., Rybar P. S. Experience with Renewable Energy Source and SWRO Desalination in Gran Canaria. In *Proceedings of the International Desalination Association World Congress*, SP05-100, Singapore, 11–16 September 2005, pp. 1–11.
45. Segurado R., Costa M., Duic N., Carvalho M. G. Integrated analysis of energy and water supply in islands. Case study of S. Vicente, Cape Verde. *Energy*. 2015, 92, 639–648. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.013>
46. Zejli D., Ouammi A., Sacile R., Dagdougui H., Elmidaoui A. An optimization model for a mechanical vapour compression desalination plant driven by a wind/PV hybrid system. *Appl. Energy*. 2011, 88, 4042–4054. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.031>
47. Kershman S. A., Rheinländer J., Gabler H. Seawater reverse osmosis powered from renewable energy sources-Hybrid wind/photovoltaic/grid power supply for small-scale desalination in Libya. *Desalination*. 2002, 153, 17–23. [http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)01089-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164(02)01089-5)
48. Kershman S. A. Hybrid wind/PV and conventional power for desalination in Libya—GECOL's facility for medium and small scale research at Ras Ejder. *Desalination*. 2005, 183, 1–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.021>
49. Gökçek M., Gökçek Ö. B. Technical and economic evaluation of freshwater production from a wind-powered small-scale seawater reverse osmosis system (WP-SWRO). *Desalination*. 2016, 381, 47–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2015.12.004>
50. Goosen M., Mahmoudi H., Ghaffour N., Sablani S. S. Application of Renewable Energies for Water Desalination. In *Desalination, Trends and Technologies*; IntechOpen: London, UK, 2011. <http://dx.doi.org/10.5772/14011>
51. Plantikow U. Wind-powered MVC seawater desalination-operational results. *Desalination*. 1999, 122, 291–299. [http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00049-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00049-1)
52. Koklas P. A., Papathanassiou S. A. Component sizing for an autonomous wind-driven desalination plant. *Renew. Energy*. 2006, 31, 2122–2139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2005.09.027>
53. Zhao H., Wu Q., Hu S., Xu H., Rasmussen C. N. Review of energy storage system for wind power integration support. *Appl. Energy*. 2015, 137, 545–553. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.103>
54. Sundararagavan S., Baker E. Evaluating energy storage technologies for wind power integration. *Sol. Energy*. 2012, 86, 2707–2717. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.06.013>
55. Gude V. G. Energy storage for desalination processes powered by renewable energy and waste heat sources. *Appl. Energy*. 2015, 137, 877–898. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.061>
56. Subiela V. J., Peñate B., García-Rodríguez L. Configurations of reverse osmosis plants with variable energy consumption for off-grid wind-powered seawater desalination: System modeling and water cost. *Desalin. Water Treat.* 2020, 180, 1–15. <http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2020.24991>
57. Infield D. Performance analysis of a small wind-powered reverse osmosis plant. *Sol. Energy*. 1997, 61, 415–421. [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00082-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00082-0)
58. Okampo E. J., Nwulu N. Optimisation of renewable energy powered reverse osmosis desalination systems: A state-of-the-art review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021, 140, 110712. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.110712>
59. Manolakos D., Papadakis G., Papantonis D., Kyritsis S. A simulation-optimisation programme for designing hybrid energy systems for supplying electricity and fresh water through desalination to remote areas Case study: The Merssini village, Donoussa island, Aegean Sea, Greece. *Energy*. 2001, 26, 679–704. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00026-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00026-3)
60. Ben Ali I., Turki M., Belhadj J., Roboam X. Systemic design and energy management of a standalone battery-less PV/Wind driven brackish water reverse osmosis desalination system. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2020, 42, 100884. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2020.100884>
61. Habali S. M., Saleh I. A. Design of stand-alone brackish water desalination wind energy system for Jordan. *Sol. Energy*. 1994, 52, 525–532. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)90660-2](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(94)90660-2)
62. Miranda M. S., Infield D. A wind-powered seawater reverse-osmosis system without batteries. *Desalination*. 2002, 153, 9–16. [http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)01088-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164(02)01088-3)
63. Paulsen K., Hensel F. Design of an autarkic water and energy supply driven by renewable energy using commercially available components. *Desalination*. 2007, 203, 455–462. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.04.021>
64. Vujčić R., Krneta M. Wind-driven seawater desalination plant for agricultural development on the islands of the County of Split and Dalmatia. *Renew. Energy*. 2000, 19, 173–183. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00029-4](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00029-4)

65. Henderson C. R., Manwell J. F., McGowan J. G. A wind/diesel hybrid system with desalination for Star Island, NH: Feasibility study results. *Desalination*. 2009, 237, 318–329. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.07.054>
66. Peñate B., Castellano F., Bello A., García-Rodríguez L. Assessment of a stand-alone gradual capacity reverse osmosis desalination plant to adapt to wind power availability: A case study. *Energy*. 2011, 36, 4372–4384. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.005>
67. Carta J. A., González J., Subiela V. Operational analysis of an innovative wind-powered reverse osmosis system installed in the Canary Islands. *Sol. Energy*. 2003, 75, 153–168. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00247-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00247-0)
68. Carta J. A., González J., Subiela V. The SDAWES project: An ambitious R and D prototype for wind-powered desalination. *Desalination*. 2004, 161, 33–48. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(04\)90038-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(04)90038-0)
69. Carta J. A., González J., Cabrera P., Subiela V. J. Preliminary experimental analysis of a small-scale prototype SWRO desalination plant, designed for continuous adjustment of its energy consumption to the widely varying power generated by a stand-alone wind turbine. *Appl. Energy*. 2015, 137, 222–239. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.093>
70. Ali E., Bumazza M., Eltamaly A., Mulyono S., Yasin M. Optimization of wind driven ro plant for brackish water desalination during wind speed fluctuation with and without battery. *Membranes*. 2021, 11, 77. <https://doi.org/10.3390/membranes11020077>
71. Tzen E., Theofiloyianako, D., Kologios Z. Autonomous reverse osmosis units driven by RE sources experiences and lessons learned. *Desalination*. 2008, 221, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.048>
72. Spyrou I. D., Anagnostopoulos J. S. Design study of a stand-alone desalination system powered by renewable energy sources and a pumped storage unit. *Desalination*. 2010, 257, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.02.033>
73. Plantikow U. Wind-powered MVC seawater desalination- operational results. *Desalination*. 1999, 122, 291–299. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00049-1)
74. de la Nuez Pestana I., Latorre F. J. G., Espinoza C. A., Gotor A. G. Optimization of RO desalination systems powered by renewable energies. Part I: Wind energy. *Desalination*. 2004, 160, 293–299. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(04\)90031-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(04)90031-8)
75. Neris A. S., Giannakopoulou, G. B., Vovos N. A. Autonomous wind turbine supplying a reverse osmosis desalination unit. *Wind Eng.* 1995, 19, 325–346.
76. Peterse, G., Fries S., Mohn J., Müller A. Wind and solar-powered reverse osmosis desalination units—Description of two demonstration projects. *Desalination*. 1979, 31, 501–509. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)88553-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)88553-7)
77. Veza J. M., Peat B., Castellano F. Electrodialysis desalination designed for wind energy (on-grid tests). *Desalination*. 2001, 141, 53–61. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00388-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00388-5)
78. Dimitriou E., Boutikos P., Mohamed E. S., Koziel S., Papadakis G. Theoretical performance prediction of a reverse osmosis desalination membrane element under variable operating conditions. *Desalination*. 2017, 419, 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.06.001>
79. Subiela V. J., Peñate B., García-Rodríguez L. Design recommendations and cost assessment for off-grid wind-powered-seawater reverse osmosis desalination with medium-size capacity. *Desalin. Water Treat.* 2020, 180, 16–36. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25013>

REFERENCE

1. Van Wijk A., Chatzimarkakis J. Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative. Brussels: Hydrogen Europe, 40 p.
2. Memorandum of understanding between the European Union and Ukraine on a Strategic Partnership on Biomethane, Hydrogen and other Synthetic Gases. 02.02.2023. P. 8. https://energy.ec.europa.eu/memorandum-understanding-between-european-union-and-ukraine-strategic-partnership-biomethane_en
3. Knysh K., Kudria S., Halabala M. Bila Knyha 2021. Ofshorna vitroenerhetyka ta “zelenyj” voden': vidkryttia novykh mezh enerhetychnoi potuzhnosti Ukrainy. C. 14. https://www.asterslaw.com/ua/press_center/publications/white_paper_2021_offshore_wind_energy [Offshore wind energy and 'green' hydrogen: opening new frontiers of Ukraine's energy capacity].
4. Philip Woods, Heriberto Bustamante, Kondo-Francois Aguey-Zinsou. The hydrogen economy – Where is the water? *Energy Nexus*. Volume 7. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100123>
5. Pidkomorna Yu. Minenerho zavershylo obhovorennia Vodnevoi stratehii. 27 veresnia 2022. <https://mev.gov.ua/novyna/minenerho-zavershylo-obhovorennia-vodnevoyi-stratehiyi-yuliya-pidkomorna> [Ministry of Energy completed the discussion of the Hydrogen Strategy].
6. IRENA. Renewable Energy Statistics 2019; IRENA: Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2019; Volume 1, p. 348.
7. Raluy R. G.; Serra L., Uche J. Life cycle assessment of desalination technologies integrated with renewable energies. *Desalination*. 2005, 183, 81–93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.023>
8. Tzen, E. Wind-Powered Desalination—Principles, Configurations, Design, and Implementation; Elsevier Inc.:

- Amsterdam, The Netherlands, 2018, pp. 91–139. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-815244-7.00003-9>
9. Panagopoulos A. Water-energy nexus: Desalination technologies and renewable energy sources. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021, 28, 21009–21022. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-13332-8>
 10. Koulouri A., Moccia J. Saving Water with Wind Energy; Technical Report; European Wind Energy Association: Brussels, Belgium, 2014.
 11. García-Rodríguez L. Renewable energy applications in desalination: State of the art. *Sol. Energy.* 2003, 75, 381–393. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.005>
 12. Kalogirou S. A. Seawater desalination using renewable energy sources. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2005, 31, 242–281. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2005.03.001>
 13. Kondili, E. Hybrid Wind Energy Systems for Desalination; Woodhead Publishing Limited: Sawston, UK, 2010; pp. 506–535. <https://doi.org/10.1533/9781845699628.3.506>
 14. Eltawil M. A., Zhengming Z., Yuan L. A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2009, 13, 2245–2262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.011>
 15. Abdelkareem M. A., El Haj Assad M., Saye E. T., Sudan B. Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants. *Desalination.* 2018, 435, 97–113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.018>
 16. Nassrullah H., Anis S. F., Hashaikeh R., Hilal N. Energy for desalination: A state-of-the-art review. *Desalination.* 2020, 491, 114569. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2020.114569>
 17. Okampo E. J., Nwulu N. Optimisation of renewable energy powered reverse osmosis desalination systems: A state-of-the-art review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021, 140, 110712. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.110712>
 18. García-Rodríguez L. Desalination by wind power. *Wind Eng.* 2004, 28, 453–463. <http://dx.doi.org/10.1260/0309524042886405>
 19. Ma Q., Lu H. Wind energy technologies integrated with desalination systems: Review and state-of-the-art. *Desalination.* 2011, 277, 274–280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2011.04.041>
 20. Kondili E., Kaldellis J. K. Wind Energy Based Desalination Processes and Plants. Technical Report Infrastructure. 2009. http://ikaros.teipir.gr/OPS/Archimedes/WRECX_wind_desal_Kondili.pdf
 21. Al-Rawajfeh A., Jaber S., Etawi H. Desalination by renewable energy: A mini review of the recent patents. *Hem. Ind.* 2017, 71, 451–460. <http://dx.doi.org/10.2298/HEMIND160308008A>
 22. Vas'ko P. F., Vas'ko V. P. Динамика нахрузочных режимов работы ветроэлектрической установки, обусловленная порывами скорости ветра. *Вісник Донбас'кої державної академії будівництва і архітектури. Будівлі та інфраструктури.* 2001. 1(4). С. 140–144 [Dynamics of load regimes of wind power plants caused by wind speed gusts].
 23. Vas'ko P. F., Vas'ko V. P., Danylenko O. I., Doliuk V. V. Експериментальні дослідження режимів генерування та споживання реактивної потужності серійної вітроелектричної установки з асинхронним генератором. *Відновлювана енергетика.* 2008. № 1. С. 34–38. [Experimental studies of the generation and consumption modes of reactive power by a series wind turbine with an asynchronous generator].
 24. Vas'ko P. F., Mazurenko I. L. Analiz imovirnisnykh kharakterystyk vitroelektrychnykh stantsiy yak dzhерela enerhii dlia oprisnennia mors'koi vody v Azovo-Chornomors'komu rehioni Ukrainy. *Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia (Energy Technologies & Resource Saving, ISSN 2413-7723, eISSN 2664-3561).* 2023. № 4. С. 42–56. DOI: 10.33070/etars.4.2023.04 [Analysis of the probabilistic characteristics of wind power plants as a source of energy for seawater desalination in the Azov-Black Sea region of Ukraine].
 25. Vas'ko P. F., Verbovyj A. P., Pazych S. T. Realizatsiia stokhastychnoi modeli pozdovzhn'oi skladovoi shvydkosti vitru dlia zadach vitroenerhetyky. *Відновлювана енергетика.* 2017. № 3. С. 54–61. [Implementation of a stochastic model of the longitudinal component of wind speed for wind energy tasks].
 26. Vasko P., Verbovyj A., Moroz A., Pazych S., Ibragimova M., Sahno L. Concept of Accumulation of Energy from Photovoltaic and Wind Power Plants by Means of Seawater Pumped Hydroelectric Energy Storage. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS), pp. 188–191. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764167
 27. Curto D., Franzitta V., Guercio A. A review of the water desalination technologies. *Appl. Sci.* 2021, 11, 670. <http://doi.org/10.3390/app11020670>
 28. Voutchkov N. Desalination Engineering: Planning and Design; McGraw Hill Professional: New York, NY, USA, 2012.
 29. Qasim M., Badrelzaman M., Darwish N. N., Darwish N. A., Hilal N. Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. *Desalination.* 2019, 459, 59–104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2019.02.008>

30. Guirguis M. J. Energy Recovery Devices in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants with Emphasis On Efficiency and Economical Analysis of Isobaric Versus Centrifugal Devices. Ph.D. Thesis, University of South Florida, Tampa, FL, USA, 2011.
31. Farooque A. M., Jamaluddin A. T. M., Al-Mobayed A. S. A., Qasim A. H. (2004). Comparative study of various energy recovery devices use in SWRO process. TR.3807/EVP 02005. doi: 10.1016/j.desal.2007.06.004
32. Urrea S. A., Reyes F. D., Suárez B. P., de la Fuente Bencomo J. A. Technical review, evaluation and efficiency of energy recovery devices installed in the Canary Islands desalination plants. *Desalination*. 2019, 450, 54–63. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916417314510>
33. Kim J., Park K., Yang, D. R., Hong S. A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants. *Appl. Energy*. 2019, 254:113652. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113652
34. Peñate B., García-Rodríguez L. Energy optimisation of existing SWRO (seawater reverse osmosis) plants with ERT (energy recovery turbines): technical and thermoeconomic assessment. *Energy*. 2011, 36, 613–626. doi: 10.1016/j.energy.2010.09.056
35. Gonzalez J., Cabera P., Carta J. Wind energy powered desalination systems, in: J. Kucera (Ed.), *Desalination Water From Water*, Wiley, Beverly, 2019, pp. 567–646. <https://doi.org/10.1002/9781119407874.ch14>
36. Robinson R., Ho G., Mathew K. Development of a reliable low-cost reverse osmosis desalination unit for remote communities. *Desalination*. 1992, 86, 9–26. [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(92\)80020-A](https://doi.org/10.1016/0011-9164(92)80020-A)
37. Cutajar C., Sant T., Buhagiar D., Farrugia R. N. Modeling of a hybrid floating wind, energy storage and desalination unit. In *Proceedings of the 2019 Offshore Energy and Storage Summit, OSES*. 2019, Brest, France, 10–12 July 2019, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1109/OSES.2019.8867170>
38. Liu C. C. K., Park J. W., Migita R., Qin G. Experiments of a prototype wind-driven reverse osmosis desalination system with feedback control. *Desalination*. 2002, 150, 277–287. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00984-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00984-0)
39. Liu C. C. Wind-Powered Reverse Osmosis Water Desalination for Pacific Islands and Remote Coastal Communities; Technical Report 128, Desalination and Water Purification Research and Development Program; US Department of the Interior, Bureau of Reclamation: Washington, DC, USA, 2009.
40. Witte T., Siegfriedsen S., El-Allawy M. WindDeSalter® Technology: Direct use of wind energy for seawater desalination by vapour compression or reverse osmosis. *Desalination*. 2003, 156, 275–279. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00358-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00358-8)
41. Heijman S. G. J., Rabinovitch E., Bos F., Olthof N. van Dijk J. C. Sustainable seawater desalination: Stand-alone small scale windmill and reverse osmosis system. *Desalination*. 2009, 248, 114–117. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.045>
42. Greco F., De Bruycker D., Velez-Isaz, A. Diepeveen N., Jarquin-Laguna A. Preliminary design of a hydraulic wind turbine drive train for integrated electricity production and seawater desalination. *J. Phys. Conf. Ser.* 2020, 1618, 032015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1618/3/032015>
43. Dehma D. A., Kherb N., Hacene F. B., Merzouk N. K., Merzouk M., Mahmoudi H., Goose M. F. On the use of wind energy to power reverse osmosis desalination plant: A case study from Ténès (Algeria). *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2011, 15, 956–963.
44. Rybar A. S., Vodna, M., Vartolomei F. L., Rybar P. S. Experience with Renewable Energy Source and SWRO Desalination in Gran Canaria. In *Proceedings of the International Desalination Association World Congress, SP05-100*, Singapore, 11–16 September 2005, pp. 1–11.
45. Segurado R., Costa M., Duic N., Carvalho M. G. Integrated analysis of energy and water supply in islands. Case study of S. Vicente, Cape Verde. *Energy*. 2015, 92, 639–648. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.013>
46. Zejli D., Ouammi A., Sacile R., Dagdougui H., Elmidaou, A. An optimization model for a mechanical vapour compression desalination plant driven by a wind/PV hybrid system. *Appl. Energy*. 2011, 88, 4042–4054. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.031>
47. Kershman S. A., Rheinländer J., Gabler H. Seawater reverse osmosis powered from renewable energy sources—Hybrid wind/photovoltaic/grid power supply for small-scale desalination in Libya. *Desalination*. 2002, 153, 17–23. [http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)01089-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164(02)01089-5)
48. Kershman S. A. Hybrid wind/PV and conventional power for desalination in Libya—GECOL's facility for medium and small scale research at Ras Ejder. *Desalination*. 2005, 183, 1–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.021>
49. Gökçek M., Gökçek Ö. B. Technical and economic evaluation of freshwater production from a wind-powered small-scale seawater reverse osmosis system (WP-SWRO). *Desalination*. 2016, 381, 47–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2015.12.004>
50. Goosen M., Mahmoudi H., Ghaffour N., Sablani S. S. Application of Renewable Energies for Water Desalination. In *Desalination, Trends and Technologies*. IntechOpen: London, UK, 2011. <http://dx.doi.org/10.5772/14011>
51. Plantikow U. Wind-powered MVC seawater desalination – operational results. *Desalination*. 1999, 122, 291–299. [http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00049-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00049-1)

52. Koklas P. A., Papathanassiou S. A. Component sizing for an autonomous wind-driven desalination plant. *Renew. Energy*. 2006, 31, 2122–2139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2005.09.027>
53. Zhao H., Wu Q., Hu S., Xu, H., Rasmussen C. N. Review of energy storage system for wind power integration support. *Appl. Energy*. 2015, 137, 545–553. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.103>
54. Sundararagavan S., Baker E. Evaluating energy storage technologies for wind power integration. *Sol. Energy*. 2012, 86, 2707–2717. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.06.013>
55. Gude V. G. Energy storage for desalination processes powered by renewable energy and waste heat sources. *Appl. Energy*. 2015, 137, 877–898. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.061>
56. Subiela V. J., Peñate B., García-Rodríguez L. Configurations of reverse osmosis plants with variable energy consumption for off-grid wind-powered seawater desalination: System modeling and water cost. *Desalin. Water Treat.* 2020, 180, 1–15. <http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2020.24991>
57. Infield D. Performance analysis of a small wind-powered reverse osmosis plant. *Sol. Energy*. 1997, 61, 415–421. [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00082-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00082-0)
58. Okampo E. J., Nwulu N. Optimisation of renewable energy powered reverse osmosis desalination systems: A state-of-the-art review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021, 140, 110712. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.110712>
59. Manolakos D., Papadakis G., Papantonis D., Kyritsis S. A simulation-optimisation programme for designing hybrid energy systems for supplying electricity and fresh water through desalination to remote areas Case study: The Merssini village, Donoussa island, Aegean Sea, Greece. *Energy*. 2001, 26, 679–704. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00026-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00026-3)
60. Ben Ali I., Turki M., Belhadj J., Roboam X. Systemic design and energy management of a standalone battery-less PV/Wind driven brackish water reverse osmosis desalination system. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2020, 42, 100884. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2020.100884>
61. Habali S. M., Saleh I. A. Design of stand-alone brackish water desalination wind energy system for Jordan. *Sol. Energy*. 1994, 52, 525–532. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)90660-2](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(94)90660-2)
62. Miranda M. S., Infield D. A wind-powered seawater reverse-osmosis system without batteries. *Desalination*. 2002, 153, 9–16. [http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)01088-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164(02)01088-3)
63. Paulsen K., Hensel F. Design of an autarkic water and energy supply driven by renewable energy using commercially available components. *Desalination*. 2007, 203, 455–462. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.04.021>
64. Vujčić R., Krneta M. Wind-driven seawater desalination plant for agricultural development on the islands of the County of Split and Dalmatia. *Renew. Energy*. 2000, 19, 173–183. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00029-4](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00029-4)
65. Henderson, C.R.; Manwell, J.F.; McGowan, J.G. A wind/diesel hybrid system with desalination for Star Island, NH: Feasibility study results. *Desalination* 2009, 237, 318–329. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.07.054>
66. Peñate B., Castellano F., Bello. A., García-Rodríguez L. Assessment of a stand-alone gradual capacity reverse osmosis desalination plant to adapt to wind power availability: A case study. *Energy*. 2011, 36, 4372–4384. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.005>
67. Carta J. A., González J., Subiela V. Operational analysis of an innovative wind-powered reverse osmosis system installed in the Canary Islands. *Sol. Energy*. 2003, 75, 153–168. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00247-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00247-0)
68. Carta J. A., González J., Subiela V. The SDAWES project: An ambitious R and D prototype for wind-powered desalination. *Desalination*. 2004, 161, 33–48. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(04\)90038-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(04)90038-0)
69. Carta J. A., González J., Cabrera P., Subiela V. J. Preliminary experimental analysis of a small-scale prototype SWRO desalination plant, designed for continuous adjustment of its energy consumption to the widely varying power generated by a stand-alone wind turbine. *Appl. Energy*. 2015, 137, 222–239. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.093>
70. Ali E., Bumazza M., Eltamaly A., Mulyono S., Yasin M. Optimization of wind driven ro plant for brackish water desalination during wind speed fluctuation with and without battery. *Membranes*. 2021, 11, 77. <https://doi.org/10.3390/membranes11020077>
71. Tzen E., Theofilloyianako, D., Kologios Z. Autonomous reverse osmosis units driven by RE sources experiences and lessons learned. *Desalination*. 2008, 221, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.048>
72. Spyrou I. D., Anagnostopoulos J. S. Design study of a stand-alone desalination system powered by renewable energy sources and a pumped storage unit. *Desalination*. 2010, 257, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.02.033>
73. Plantikow U. Wind-powered MVC seawater desalination – operational results. *Desalination*. 1999, 122, 291–299. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00049-1)
74. de la Nuez Pestana I., Latorre F. J. G., Espinoza C. A., Gotor A. G. Optimization of RO desalination systems powered by renewable energies. Part I: Wind energy.

-
- Desalination. 2004, 160, 293–299. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(04\)90031-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(04)90031-8)
75. Neris A. S., Giannakopoulos G. B., Vovos N. A. Autonomous wind turbine supplying a reverse osmosis desalination unit. *Wind Eng.* 1995, 19, 325–346.
76. Petersen G., Frie S., Mohn J., Müller A. Wind and solar-powered reverse osmosis desalination units—Description of two demonstration projects. *Desalination*. 1979, 31, 501–509. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)88553-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)88553-7)
77. Veza, J.M.; Peate B.; Castellano, F. Electrodialysis desalination designed for wind energy (on-grid tests). *Desalination* 2001, 141, 53–61. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00388-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00388-5)
78. Dimitriou E., Boutikos P., Mohamed E. S., Koziel S., Papadakis G. Theoretical performance prediction of a reverse osmosis desalination membrane element under variable operating conditions. *Desalination*. 2017, 419, 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.06.001>
79. Subiela V. J., Peñate, B., García-Rodríguez L. Design recommendations and cost assessment for off-grid wind-powered-seawater reverse osmosis desalination with medium-size capacity. *Desalin. Water Treat.* 2020, 180, 16–36. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25013>