


Implementation of an Advanced Modern System for Seawater Desalination and Transportation: A Case Study of Chalus City

Koosha Aghazadeh¹, Reza Attarnejad^{2*} 

1. School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Professor, School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, PO. Box: 1417613131 Tehran, Iran.

Abstract

This article presents a comprehensive analysis of an innovative seawater desalination and transfer system, hereafter referred to as the "desalination pipeline system." This system seeks to provide an efficient solution for freshwater shortages, particularly in coastal regions. The proposed system is structured into three main stages: evaporation, transfer, and condensation. Each stage is intricately detailed, elucidating the processes and formulations involved, while underlining the system's remarkable capabilities in achieving high transfer speeds and substantial desalination capacities. Focusing on the specific context of Chalus—a coastal city in Iran—and the adjacent heights of Kelardasht, the study underscores the unique geographical and climatic conditions of the region. The interplay between the marine environment and the mountainous terrain creates a potential opportunity for harnessing seawater through an effective desalination process. By exploring various pipe diameters within the system, the research challenges the conventional wisdom that larger diameters are inherently better for maximizing freshwater output and operational efficiency. Contrary to these assumptions, the findings indicate that utilizing smaller diameter pipes can result in significantly higher vapor speeds. Nevertheless, it is crucial to regulate these speeds to prevent vapor velocities from surpassing the speed of sound, which could lead to inefficiencies and operational issues. The methodology employs pipelines with diameters of 1 meter and 2 meters for the transfer of vapor over a distance of 15 kilometers, transporting it from the Chalus area to Alam Kuh, which is situated at an elevation of 1,800 meters. This distance and elevation present unique challenges and opportunities, as they require precise engineering to ensure the effective movement of desalinated water. The study reveals that the efficiency of sub-atmospheric vapor transfer is primarily influenced by three key factors: pipe diameter, transfer distance, and the temperature difference between the seawater and the receiving mountain peaks. These findings provide critical insights into the design and operation of the desalination pipeline system. Specifically, the research quantifies the performance of the two pipe diameters under investigation. The results demonstrate that a 2-meter diameter pipe can produce an average of 3,950 cubic meters of freshwater daily, of which 2,950 cubic meters are effectively transferred to the higher altitude. In contrast, the 1-meter diameter pipe yields 850 cubic meters of water per day, with 710 cubic meters successfully transferred. These figures highlight the balance between pipe diameter and transfer efficiency, emphasizing that various configurations can still lead to the effective delivery of freshwater resources. This characteristic minimizes the need for extensive pre-treatment processes or additional energy inputs, making the operation both environmentally friendly and economically viable. In conclusion, the proposed desalination pipeline system offers a progressive approach to addressing freshwater shortages, presenting a cost-effective and efficient alternative to many existing desalination methods. By leveraging the unique geological and climatic conditions of the Chalus and Kelardasht region, this system not only maximizes the potential of seawater resources but also contributes to sustainable water management practices. Future studies could expand upon these findings, exploring long-term operational viability, environmental impacts, and potential scalability to further enhance the system's applicability in other regions facing water scarcity.

Review History

Received: Dec 29, 2024

Revised: Jul 4, 2025

Accepted: Nov 8, 2025


Keywords

seawater desalination
sub-atmospheric pressure
thermal distillation
water transfer
sustainability

* Corresponding Author Email: attarnjd@ut.ac.ir - ORCID: 0000-0003-1955-2887



معرفی سیستم نوین پیشرفته برای شیرین سازی آب دریا با استفاده از خط لوله نمک زدایی و انتقال بخار به منطقه هدف: مطالعه موردی برای شهر چالوس

کوشا آقازاده^۱، رضا عطارنژاد^{۲*} 

۱. دکتری تخصصی گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. استاد گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹. بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳. پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷.

این مطالعه به بررسی انتقال بخار در فرایند نمک زدایی آب دریا پرداخته و هدف آن افزایش نرخ انتقال آب است. سیستم طراحی شده شامل سه مرحله اصلی تبخیر، انتقال و میعان می باشد. در این سیستم آب دریا بعد از تبدیل به بخار به واسطه اختلاف درجه حرارت یا فشار به سمت مقصد حرکت می کند. دستاوردهای اصلی این تحقیق شامل سرعت بالای انتقال و ظرفیت بالای سیستم شیرین سازی آب دریا می باشد. یافته ها نشان می دهند که سه عامل اصلی شامل قطر لوله، طول انتقال و اختلاف دما بر کارایی سیستم تأثیرگذار هستند. این تحقیق همچنین از لوله هایی با قطرهای ۱ و ۲ متر برای انتقال بخار از ارتفاعات علم کوه در نزدیکی چالوس با ارتفاع ۱۸۰۰ متر و فاصله ۱۵ کیلومتری استفاده کرده است. مطالعه موردی مذکور نشان می دهد که این فناوری می تواند به عنوان یک راهکار عملی و مقرون به صرفه برای تأمین آب در مناطق خشک و مرتفع مورد استفاده قرار گیرد. نتایج نشان می دهد که استفاده از لوله هایی با قطر مناسب، همراه با کنترل شرایط انتقال، می تواند محدودیت های موجود در سیستم های رایج را کاهش دهد و امکان انتقال پایدار آب را فراهم کند. مقایسه این سیستم با روش های رایج نمک زدایی مشابه نشان می دهد که کارایی بالاتر، هزینه عملیاتی کمتر و تأثیر زیست محیطی کاهش یافته که از جمله مزایای آن محسوب می شود. تحلیل ساختاری و ترمودینامیکی نشان داده است که افزایش راندمان انتقال بخار از طریق تنظیم فشار و دمای جریان می تواند تأثیر چشمگیری بر عملکرد سیستم داشته باشد. این اطلاعات می توانند به بهینه سازی طراحی و عملکرد سیستم های نمک زدایی مشابه در آینده کمک کنند.

کلمات کلیدی

نمک زدایی آب دریا

فشار زیر اتمسفر

مدیریت منابع آب

انتقال آب

پایداری سیستم

۱- مقدمه

واقعیت که منابع سنتی آب، مانند آب های زیرزمینی و سطحی، ناکافی شده اند، پیچیده تر شده است [2]. نمک زدایی به عنوان یکی از امیدوارکننده ترین راه حل ها شناخته شده است و این پتانسیل را دارد که آب خام را برای تولید فراهم کند. انتظار می رود در سال های آینده پروژه های نمک زدایی شاهد افزایش سرمایه گذاری ها و استقرار در مقیاس بزرگتر باشند که منجر به کاهش هزینه های

کمبود آب در بسیاری از نقاط جهان به یک مسئله مبرم تبدیل شده است. تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت شهری و شیوه های قدیمی مدیریت آب منجر به کمبود آب امروزی شده است [1]. بسیاری از مناطق در تلاش هستند تا دسترسی به آب آشامیدنی سالم و پاک را که نیاز را برآورده می کند، فراهم کنند، که با این

* رایانامه نویسنده مسئول: attanjid@ut.ac.ir - ORCID: 0000-0003-1955-2887

کپی رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می توانید این



مطلب را در هر قالب و رسانه ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

واحد و بهبود کارایی کلی می‌شود [3].

مهم‌ترین فرآیند نمک‌زدایی شامل تکنیک‌های مختلفی مانند اسمز معکوس (RO)، تقطیر است. در روش‌هایی که فاز آب را تغییر نمی‌دهند، کیفیت آب کمتر است. اسمز معکوس آب دریا (SWRO)، اسمز معکوس آب شور (BWRO)، اسمز جلو (FO)، الکترودیالیز (ED) و معکوس الکترودیالیز (EDR) یکی از روش‌های رایج شیرین‌سازی آب بدون تغییر فاز می‌باشد [4]. میانگین هزینه تولید ۱ مترمکعب آب نمک‌زدایی برای این سیستم‌ها به طور گسترده‌ای از ۰,۰۴۱-۰,۳۰۵ USD/m³ متغیر بوده است، با این حال، مازول‌های غشایی اسمز معکوس فعلی نمی‌توانند در فشار هیدرولیکی بسیار بالا کار کنند که معمولاً مربوط به شوری ۷۰۰۰۰ میلی گرم در لیتر از RO است. آب نمک خروجی در مقابل، تقطیر حرارتی یکی از بهترین راه‌ها برای تصفیه آب دریا و آب شور برای تبدیل آنها به آب آشامیدنی است [5, 6]. رایج‌ترین فرآیندهای نمک‌زدایی حرارتی عبارتند از فشرده‌سازی بخار مکانیکی (MVC)، نمک‌زدایی فلاش چند مرحله‌ای (MSF)، جوشاندن چند اثره (MEB)، نمک‌زدایی چنداثره (MED) و بخار خنک [7]. هزینه تقطیر آب در این روش‌ها بین ۰,۱۲۵ تا ۱,۱۱ دلار آمریکا در هر مترمکعب است، که این تفاوت هزینه‌ها بسته به مسائل مختلف مانند نوع فناوری، منابع انرژی، و شرایط محیطی کاهش یا افزایش می‌یابد و بر کارایی و اقتصادی بودن این روش‌ها تأثیر می‌گذارد [8].

در میان تکنیک‌های مختلف مورد استفاده در تقطیر آب دریا، بهره‌وری از روش بخار سرد در حال افزایش است. نمک‌زدایی با بخار سرد که به عنوان نمک‌زدایی حرارتی با دمای پایین نیز شناخته می‌شود، یک رویکرد ابتکاری است که از اصول تبخیر برای حذف محتوای نمک از آب دریا یا آب شور استفاده می‌کند [9]. برخلاف روش‌های نمک‌زدایی سنتی، که بیشتر بر مصرف انرژی بالا تکیه می‌کنند، فرآیندهای بخار خنک راه‌حلی با انرژی کارآمدتر و سازگار با محیط زیست ارائه می‌دهند. تقطیر با بخار خنک شامل حرارت دادن آب دریا تحت فشار کاهش یافته تا زمانی که تبخیر شود، سپس متراکم و جمع‌آوری بخار برای تولید آب شیرین است. در طول فرآیند، انتقال بخار نقش مهمی ایفا می‌کند. مطالعات متعددی در مورد نمک‌زدایی آب دریا به روش بخار سرد در قالب مقالات و پتنت‌ها موجود است [10-18].

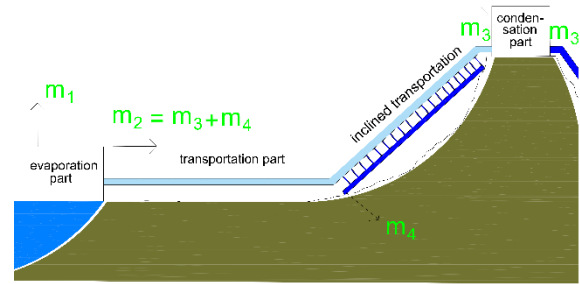
اگرچه زمینه قابل‌توجهی برای صرفه‌جویی در مصرف آب بدون تأثیر بر سطح خدمات آن وجود دارد، اما پاسخ اصلی به کمبود آب افزایش عرضه بوده است. این کار تا حد زیادی با انتقال آب از جاهایی که فراوان است به جاهایی که کمیاب است انجام می‌شود. انتقال آب شیرین به همان اندازه مهم است که نمک‌زدایی آب دریا مهم می‌باشد [10]. هزینه‌های انتقال آب از چند سنت در هر مترمکعب تا بیش از یک دلار متغیر است. هزینه یک ارتفاع عمودی ۱۰۰ متری تقریباً به اندازه یک جابه‌جایی افقی ۱۰۰ کیلومتری (۰,۰۵-۰,۰۶ دلار در مترمکعب) است. این امر انتقال آب شیرین شده را در ارتفاعات و داخل منطقه بسیار گران می‌کند. روش‌های سیستم‌های توزیع آب، سیستم‌های ثقلی، سیستم‌های پمپاژ و سیستم‌های ثقلی و پمپاژ ترکیبی می‌باشد [19, 20].

سیستم خط لوله آب‌شیرین‌کن بهبودیافته سیستمی مبتنی بر روش بخار سرد برای نمک‌زدایی آب دریا و انتقال بخار آب مقطر است. [21]. در سیستم خط لوله نمک‌زدایی، آب دریا در فشار زیر اتمسفر با استفاده از حداقل انرژی حرارتی تبخیر می‌شود. تفاوت بین دو انتهای لوله اجازه می‌دهد تا بخار از آب دریا یا اقیانوس به سمت بالای کوه حرکت کند. با رسیدن به قله کوه، بخار متراکم می‌شود و به دلیل آب و هوای سردتر به آب مایع تبدیل می‌شود. این سیستم از ارتفاع قابل توجه برای انتقال آب به مقصد مورد نظر بدون مصرف انرژی اضافی بهره می‌برد. سال‌های اخیر شاهد مطالعات متعددی با تمرکز بر امکان‌سنجی و کارایی بالای این روش بوده است.

برای اطمینان از انتقال بهینه بخار در طول مسیر باید چندین مرحله انجام شود. اینها شامل حصول اطمینان از نگهداری مناسب پمپ‌های خلاء برای جلوگیری از هرگونه نوسان در سطوح خلاء و طراحی محفظه‌های تبخیر و کندانسور برای ارائه انتقال حرارت کارآمد و حداکثر مساحت سطح برای انتقال بخار می‌باشد تا انتقال سریع و کارآمد بخار را تضمین کند [22]. انتقال بخار یکی از جنبه‌های مهم تقطیر خط لوله در طول نمک‌زدایی آب دریا است و بهینه‌سازی این فرآیند برای دستیابی به سطوح با بازده بالاتر بسیار مهم است. تحقیق و توسعه مستمر روشی حیاتی برای تولید آب شیرین از آب دریا است که راه حلی پایدار برای چالش‌های کمبود آب ارائه می‌کند [23].

بخش‌های متعددی تشکیل می‌شود. این فرآیند دارای ۳ قسمت اصلی تبخیر، انتقال و کندانس می‌باشد که به اختصار توضیح داده می‌شود و در قسمت بعدی به طور مفصل توضیح داده خواهد شد.

- قسمت تبخیر: در بخش تبخیر این سیستم، عمل بخار شدن آب دریا یا اقیانوس صورت می‌گیرد. در ابتدا قبل از انجام عمل تبخیر، در فشار زیر اتمسفر به منظور افزایش راندمان و خروج گازهای غیر قابل کندانس از آب دریا، آب دریا به مقدار زیادی هوازدایی خواهد شد. در هنگام عمل هوازدایی مقداری از آب دریا یا اقیانوس به حالت بخار در آمده که برای مصرف در محل استفاده می‌شود. در مرحله بعد آب‌های هوازدایی شده در مخزنی که فشار آن کمتر از فشار بخار آب هوزدا شده می‌باشد تبخیر می‌شود و بخارهای آب به منظور انتقال به محل مورد نظر از طریق لوله‌ای وارد مرحله بعد می‌شوند. گازهای موجود در آب دریا و بخارهای تولید شده در مرحله گاززدایی توسط لوله‌ای جداگانه برای مصرف خارج می‌شوند.
- قسمت انتقال: در این قسمت در ابتدا بخارهای تولید شده باید برای انتقال به مقصد آماده شوند. آماده شدن به این معنا می‌باشد که بخارهای تولید شده به دلیل تبخیر و هوازدایی در قسمت قبل قطعاً دمایی کمتر از محیط داشته و باید به اندازه‌ای که هم دما با محیط شوند به آنها گرما داده شود. به همین دلیل در قسمت آماده‌سازی بخار برای انتقال، افزایش راندمان و تداوم فرآیند باید انرژی اضافی‌ای به سیستم تزریق شود. بعد از عمل آماده‌سازی، بخارها توسط لوله‌ای به سمت محل کندانس حرکت می‌کنند. دلیل حرکت بخارها دمایی کمتر کندانسور نسبت به دمای این بخش می‌باشد. در قسمت انتقال افقی به دلیل هم دما بودن بخار با محیط میعان به ندرت رخ می‌دهد؛ اما با افزایش ارتفاع در قسمت انتقال، دمای هوا کاهش می‌یابد و به دلیل ادیاباتیک نبودن لوله بخار شروع به میعان می‌کند که توسط لوله‌هایی تحت نیروی ثقل جمع‌آوری می‌شوند.
- قسمت میعان: در این قسمت بخارهایی که از مرحله انتقال عبور کرده‌اند باید به مایع تبدیل شوند. برای انجام عمل کندانس در این مرحله از لوله‌هایی برای انتقال سرما از خارج اتاقک‌های میعان به داخل آن برای تبدیل بخارهای انتقال یافته به نوک کوه استفاده می‌شود. پس از تبدیل بخارها به آب به



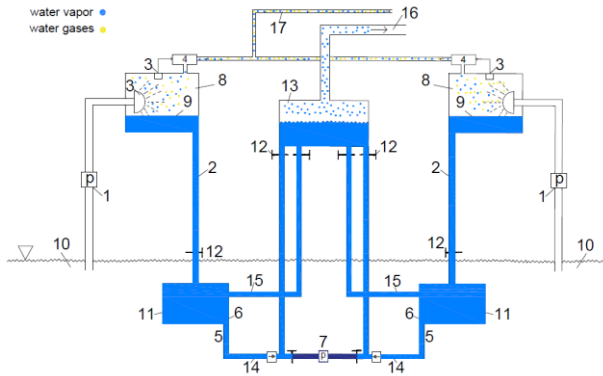
شکل ۱. شکل شماتیک قسمت هوازدایی و تبخیر

Fig. 1. Schematic diagram of the proposed system

در این تحقیق، امکان‌سنجی راه‌اندازی آزمایشی سیستم مورد بحث قرار گرفته است. با وجود مطالعات متعدد، هیچ آزمایش دقیقی در مورد این سیستم و انتقال آب تصفیه شده انجام نشده است. هدف، راه‌اندازی سیستم به گونه‌ای است تا به شبیه‌سازی دقیق شرایط دنیای واقعی دست پیدا کند. از ویژگی‌های قابل توجه این سیستم آزمایشی می‌توان به استفاده از آب تولید شده با کیفیت بالا، راندمان بالا، اعمال فشارهای مختلف زیر جوی برای ارزیابی سیستم و انتقال بخار اشاره کرد. نوآوری‌های اولیه این تحقیق با بهره‌گیری از فرآیندهای طبیعی و کم‌مصرف، کارایی را به شدت افزایش می‌دهند و هزینه‌ها را کاهش می‌دهند. ابتدا، با کاهش فشار و ارتفاع، دمای تبخیر آب شور در شرایط خلأ پایین آمده و مصرف انرژی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. سپس، بخار آب بدون نیاز به پمپ‌های برقی و به طور طبیعی، توسط لوله‌های عایق و نیروی اختلاف فشار و دما به سمت نقاط میعان هدایت می‌شود. در نوک کوه و هوای خنک محیط، بخار میعان شده و آب خالص تولید می‌شود، بدون نیاز به تجهیزات پیچیده یا پرهزینه. آب تولید شده نیز به صورت مستقیم و بدون هزینه اضافی به مناطق مختلف انتقال می‌یابد، بهره‌برداری از ارتفاعات طبیعی برای کاهش هزینه‌های انتقال و پمپاژ، و استفاده از نیروی طبیعی برای راه‌اندازی فرآیندها، همگی این سیستم را به یک راهکار پایداری و اقتصادی در مناطق خشک و کوهستانی بدل می‌کند. پتانسیل این سیستم برای تصفیه آب خانگی نیز آن را به عنوان یک رقیب قابل توجه برای تصفیه کننده‌های آب خانگی با استفاده از روش اسمز معکوس قرار می‌دهد.

۲- طرح کلی از سیستم خط لوله نمک‌زدایی

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود این سیستم از



شکل ۲. شکل شماتیک قسمت هوازدایی و تبخیر

Fig. 2. Schematic diagram of the de-aeration and evaporation section

- لوله مورد استفاده در مرحله انتقال تنها از یک لایه خارجی با ضخامت مشخص تشکیل شده است. فرض ضخامت ثابت و تک جداره بودن باعث ساده سازی محاسبات انتقال حرارت، کاهش پیچیدگی مکانیکی، یکنواختی در میعان بخار و بهینه سازی مصرف انرژی در سیستم های نمک زدایی خط لوله ای می شود.

۳-۲- قسمت تبخیر

در شکل (۲) قسمت تبخیر به صورت شماتیک نشان داده شده است که هوازدایی و تبخیر آب دریا در این مرحله صورت می گیرد. سازوکار این قسمت بدین صورت می باشد که آب دریا (۱۰) در ابتدا در لوله ای (۱) به سمت بالا پمپ می شود که مشخصات پمپ باید محاسبه شده باشد. آب دریا از طریق نازل های آب پخشان (۳) به درون محفظه ۸ که فشاری زیر اتمسفر دارد، پاشیده می شود. بخشی از آب پاشیده شده توسط نازل های پخشان در شرایط فشار زیر اتمسفر تبخیر شده که گرمای لازم برای تبخیر را از مابقی آب های اسپری شده می گیرد. بخار آب تولید شده به همراه سایر گازهای محلول در آب توسط پمپ (۴) به سمت مرحله بعدی هدایت می شوند تا بخار آب موجود کندانس شده و برای مصرف در محل آماده شوند. آب های اسپری شده باقی مانده به دلیل فشار پایین تانک و اسپری شدنشان بیشتر گاززدا می شود [23]. این آب از طریق لوله (۲) به تانک ذخیره (۱۱) متصل می شود و به سمت این مخزن در جریان می باشد. بعد از این کار آب گاززدا باید برای انجام عمل تبخیر وارد مخزن تبخیر (۱۳) شود. از آنجایی که مخزن تبخیر در شرایطی نزدیک به خلا و در حال

دلیل وجود ارتفاع، انرژی پتانسیل نسبتاً خوبی موجود می باشد که از این مهم می توان علاوه بر انتقال آب به محل مصرف با استفاده از نیروی وزن خود، در تولید انرژی الکتریکی نیز استفاده نمود؛ پس نیروگاه برقی برای بهره برداری و احیای قسمتی از انرژی مصرف شده در قسمت های قبل احداث می شود. در انتها نیز آب خام با افزودن مواد معدنی برای مصرف آماده می شود.

۳- معرفی سیستم و فرمول های مربوطه

در این قسمت ابتدا به فرض های موجود در این تحقیق پرداخته می شود و سپس در مورد هر یک از سه بخش موجود در سیستم به طور مفصل بحث خواهد شد و فرمول های مربوط به آن ارائه می شود.

۳-۱- فرضیات اصلی

مفروضات اساسی برای چارچوب کلی محاسبه به شرح زیر

است:

- به دلیل پایین بودن فشار در تمامی مراحل رفتار گاز کاملاً ایده آل بوده است و از فرمول گاز ایده آل ($PV = nRT$) می توان استفاده نمود.
- در مرحله انتقال که اختلاف ارتفاع وجود ندارد لوله در تمامی مراحل با محیط هم دما بوده و از مقدار کم میعان به علت اندک اختلاف دمایی صرف نظر می شود. در انتقال های با افزایش ارتفاع نیز آب موجود در لوله بلافاصله جمع آوری می شود و مانع از دوفازی شدن جریان درون لوله می شود؛ پس جریان یکفازی فرض می شود.
- دمای محیط اطراف لوله به صورت خطی و متناسب با تغییرات ارتفاعی لوله عوض می شود.
- مسئله را به صورت پایا حل کرده و تغییرات پارامترها در واحد زمان ثابت در نظر گرفته می شود.
- با توجه به این نکته که گازها در سرعت های بالا رینولدزهای بزرگی را تولید می کنند و فشار درون لوله کمتر از اتمسفر می باشد و قطر لوله های انتقال بزرگ می باشد؛ پس اثر اصطکاک بسیار ناچیز می باشد در نتیجه از اثر کم اصطکاک صرف نظر شده است. در قسمت نتایج مشاهده می شود که فرض اولیه درست می باشد.

مقدار آب مورد نیاز تعیین می‌شود؛ ولی به هر مخزن تبخیر باید حتماً حداقل ۲ سیستم گاززدا وصل باشد که در هنگام تمیز شدن یک مخزن، عملیات تبخیر قطع نشود و مخزن دیگر وظیفه آبرسانی را انجام دهد. بخارهای تولید شده در مخزن تبخیر توسط لوله‌ای (۱۶) به مرحله بعدی منتقل می‌شوند تا برای انتقال آماده شوند. بخار آب و گازهای محلول که اکسیژن قسمت عمده آن گازها را تشکیل می‌دهد، برای بهره‌برداری و تأمین آب همان منطقه توسط لوله‌ای دیگر (۱۷) به مرحله بعد منتقل می‌شوند. دقت شود که قسمت تبخیر از چندین مخزن تبخیر تشکیل شده است و هر مخزن تبخیر نیز به چندین مخزن هوازدایی متصل شده است. زیرا وجود چندین مخزن تبخیر و مخزن هوا زدا سیستم را نسبت به اختلالات احتمالی، می‌کند و به منظور هماهنگ شدن قسمت تبخیر با سایر قسمت‌ها می‌باشد؛ زیرا نرخ تبخیر نباید حداکثر نرخ انتقال و تراکم بیشتر شود. در صورت بیشتر بودن نرخ تبخیر فشار در سیستم بالا می‌رود و راندمان سیستم پایین می‌آید. به همین دلیل باید نرخ تبخیر کنترل شود و کل سیستم به صورت یکپارچه عمل کند.

باتوجه به شکل (۲) معادله پیوستگی و معادله برنولی برای لوله اولیه (۱) و نازل‌های سیستم (۳) توسط معادلات ۱ و ۲ نوشته می‌شود.

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (1)$$

که A_1 مساحت لوله و A_2 مساحت نازل‌ها می‌باشد (m^2) و v سرعت می‌باشد (m/s).

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + h_l \quad (2)$$

به دلیل کم‌بودن فشار در محوطه (۸) بخشی از آب تبخیر می‌شود که به وسیله فرمول (۳) آب تبخیر شده محاسبه می‌شود.

$$m_t c(T_{sw} - T_{dw}) = m_1 \lambda \quad (3)$$

که در آن m_t مقدار آب پمپ شده در هر ثانیه، m_1 مقدار آب بخار شده در محفظه (۸)، T_{sw} دمای آب دریا، T_{dw} دمای آب گاززدا می‌باشد که متناظر با فشاری است که در محفظه ایجاد شده است. c ظرفیت گرمایی ویژه آب است که متناظر با دما و شوری آب دریا تعیین می‌شود و λ گرمای نهان تبخیر است که برحسب دما تعیین می‌شود. همین معادله را برای مخزن تبخیر نیز می‌نویسیم. به دلیل کم‌بودن فشار در مخزن تبخیر بخشی از آب تبخیر می‌شود که به وسیله فرمول (۴) آب تبخیر شده محاسبه می‌شود.

تبخیر می‌باشد پس آب از طریق لوله‌ای (۱۴) به سمت مخزن تبخیر می‌رود. توجه شود که میزان سرعت در این قسمت کنترل می‌شود. به دلیل فشار کمتر مخزن تبخیر از مخزن گاززدا و وجود افت در لوله، سطح آب در محوطه تبخیر نسبت به مخزن هوازدا متغیر است و بسته به شرایط موجود و مقدار آب مورد نیاز می‌تواند کمی بالاتر و یا پایین‌تر از سطح آب مخزن هوازدا قرار گیرد. آب به دلیل فشاری که در مخزن تبخیر وجود دارد تمایل دارد به دمای متناظر آن فشار دست یابد پس دمای آب شروع به کاهش می‌کند و در این هنگام مقداری از آب موجود در منبع تبخیر به واسطه این گرما به بخار تبدیل می‌شوند.

دمای آب کاهش یافته به دلیل ارتباط با مخزن ذخیره و تفاوت دمای موجود تمایل دارد که از طریق لوله‌ای (۱۵) به مخزن قبلی بیاید، وهم دما با سایر آنها شود. به دلیل اینکه اطراف مخزن و لوله‌های ارتباط دو مخزن را آب دریا تشکیل داده‌اند دمای آب کاهش یافته، دمای از دست رفته خود را به وسیله گرمای موجود در آب دریا دست می‌آورد. آب دوباره گرم شده دوباره به مخزن تبخیر می‌آید. این پروسه تا زمانی ادامه دارد که شوری آب تا شاخص شوری تعیین شده برای اقیانوس یا دریای مورد نظر، بالا رود. این عمل به این خاطر است که این درجه شوری مشکلی برای محیط زیست ایجاد نکند. حالت دوم زمانی می‌باشد که به نمک و سایر مواد موجود در آب دریا نیاز باشد. در این حالت عمل تبخیر بیشتر انجام گرفته و پروسه طولانی‌تر می‌شود. باید توجه داشت که با افزایش شوری عمل تبخیر با کاهش سرعت مواجه می‌شود؛ زیرا با افزایش شوری دمای تبخیر نیز تغییر می‌کند و به دمای آب موجود نزدیک می‌شود که هرگز نباید میزان شوری به حدی برسد که دمای تبخیر آب در مخزن تبخیر با دمای آب در منبع ذخیره مساوی شود و همیشه باید کمتر از آن باشد. در هر دو حالت نیاز به قطع سیستم و جمع‌آوری نمک و آب باقی مانده مخزن ذخیره می‌باشد. به همین علت از چندین سیستم گاززدایی استفاده می‌شود. هرچه تعداد مخازن تبخیر و سیستم‌های گاززدا بیشتر باشد به انرژی کمتری برای تبخیر آب نیازمندیم.

این تحقیق فرض را به بازگشت آب دریا به اقیانوس گذاشته؛ پس زمانی که شوری آب به مقدار مورد نظر رسید تمامی شیرهای (۱۲) مرتبط با مخزن ذخیره بسته می‌شوند و آب شور توسط پمپ به بیرون هدایت می‌شود. تعداد مخزن‌های هوازدا و تبخیر برحسب

قسمت بعدی انتقال از یک خط لوله تشکیل یافته که این خط لوله، چگالنده را به سیستم متصل می‌نماید. در موردهایی مثل بندرعباس - گنو انتقال در ابتدا به صورت افقی رخ می‌دهد و هیچ اختلاف ارتفاعی وجود ندارد دما در محیط و داخل لوله تقریباً ثابت مانده و کاهش دما و فشار بسیار جزئی می‌باشد؛ اما در مواردی که در هنگام انتقال، اختلاف ارتفاع وجود دارد و یا به کوه مورد نظر می‌رسیم با بالا رفتن خط لوله از کوه، افت فشار رخ می‌دهد و دمای بخار نیز پایین می‌آید. هنگامی که در لوله عمل میعان رخ می‌دهد گرمایی که از بخار گرفته می‌شود به سمت دیواره‌های لوله حرکت می‌کند و آن را در دمایی برابر با دمای بخار آب نگه دارد. از آنجاکه در تجهیزات، فقط بخار آب وجود دارد، فشاری که درون لوله وجود دارد برابر با فشار معادل دمای اطراف لوله می‌باشد که این اتفاق بیانگر تعادل پایدار سیستم می‌باشد و بخار تمایل دارد به صورت اشباع باقی بماند در نتیجه سیستم در برابر هر تغییری که پیش آید سعی خواهد نمود که به وضعیت پایدار خود تغییر می‌کند. اگر فشار بالا رود یا دما کاهش یابد، بخار اضافی بلافاصله میعان می‌شود که رخ دادن عمل میعان به منظور حفظ وضعیت تعادل سبب می‌شود که فشار درون لوله کاهش یابد. اگر فشار کم شود یا دما افزایش یابد بخار به حالت غیراشباع در آمده و فشار درون لوله بالا می‌رود، از آنجایی که سیستم خواهان رسیدن خود به وضعیت پایدار است این افزایش فشار را با تبخیر آب مایع موجود در لوله جبران می‌کند. به عنوان نتیجه می‌توان گفت که دمای بهره‌برداری، خود را با شرایط کلیه قسمت‌های دستگاه هماهنگ می‌کند. این امر به میزان بسیار زیادی باعث سهولت شرایط شده و کاهش هزینه‌ها را به دنبال خواهد داشت.

آبی که احتمال دارد در اثر میعان به وجود آید، باید به صورت ثقلی جمع‌آوری شود. زیرا تشکیل قطرات درشت آب که نزدیک به سرعت صوت در حال حرکت می‌باشند، می‌توانند به لوله و سیستم خسارت وارد کنند به همین دلیل باید آبی که میعان می‌شود جمع‌آوری شود. به همین دلیل از لوله‌هایی مانند شکل (۴) استفاده می‌شود که ارتفاعی حدود ۱۳ متر یا بیشتر دارند دلیل آن این است که در هنگام جمع‌آوری این آب‌ها خلأ سیستم از بین نرود و هنگام باز شدن شیرها فشار خارج سیستم مانع از تخلیه کامل آب درون لوله می‌شود و مقدار آب تخلیه شده تقریباً با مقدار آب‌های موجود در ارتفاعی بیش از ۱۰ متر برابر می‌باشد.

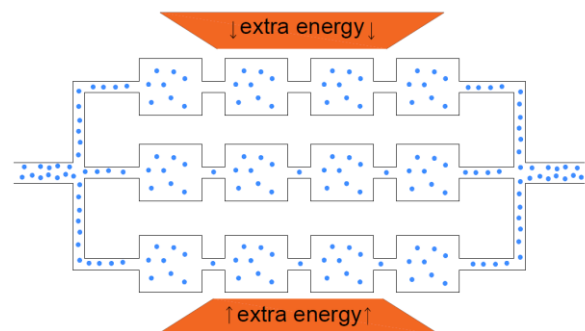
$$m_{dw}c(T_{sw} - T_{s1}) = m_2\lambda \quad (4)$$

که در معادله فوق m_{dw} مقدار آب گاززدا در هرنائیه m_2 مقدار آب بخار شده برای انتقال، T_{dw} دمای آب گاززدا و T_{s1} دمای بخار آب تولیدی در مخزن تبخیر می‌باشد که متناظر با فشاریست که در محفظه ایجاد شده است. c ظرفیت گرمایی ویژه آب است و λ گرمای نهان تبخیر است. همچنین کاهش فشار در مخزن تبخیر نیز از فرمول (۵) به دست می‌آید.

$$\Delta P_e = \frac{\sqrt{2\pi(P_e/\rho_e)}(m_2/A_e)}{\alpha_e\{1 - (1/2)(P_e/\rho_e\lambda)\}} \quad (5)$$

۳-۳- قسمت انتقال

در ابتدای مرحله انتقال نیاز است که بخار موجود با دمایی برابر با محیط وارد لوله انتقال شود به همین دلیل بخار آب باید تا دمای محیط گرم شود. این امر علاوه بر تداوم فرآیند در سیستم، به انتقال آب نیز کمک می‌کند؛ زیرا هنگامی که آب وارد لوله انتقال می‌شود بدون اینکه میعان شود به مسیر خود ادامه دهد و در قسمت‌هایی هم به علت تغییرات جزئی کاهش دما امکان میعان وجود دارد که مشکلی پیش نمی‌آید و در زمان‌هایی که دمای خارج بیشتر شود مقدار بسیار جزئی‌ای از آب‌ها تبخیر شده که در ادامه توضیح داده می‌شود. بالا بردن دمای بخار علاوه بر اینکه فایده هم دما شدن با محیط را دارد به افزایش سرعت بخار نیز کمک می‌کند به همین علت ما برای افزایش سرعت بخار طی چندین مرحله بخار را گرم می‌کنیم. همان‌طور که در شکل (۳) نیز مشاهده می‌شود. بخش حرارت دادن به بخار همانند بخش تبخیر در محل دریا از چندین قسمت تشکیل شده است تا موجب تقویت سیستم شود.



شکل ۳. آماده‌سازی بخار آب برای انتقال

Fig. 3. Preparing water vapor for transfer

کندانس شده و بخار خروجی مساوی می‌باشد.

معادله مومنتوم: با نوشتن معادله مومنتوم برای المان نشان داده شده در شکل بالا رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$\rho u u A|_x - \rho u u A|_{x+\Delta x} + PA|_x - PA|_{x+\Delta x} - \tau_w s \Delta x - \rho g \sin(\alpha) A \Delta x = \frac{\partial}{\partial t} (\rho A u \Delta x) \quad (7)$$

با ساده‌سازی رابطه بالا و با توجه به فرضیات اولیه و ثابت بودن قطر، معادله (۸) به دست می‌آید.

$$P_i - p_{i+1} = \rho g + \rho_{i+1} u_{i+1}^2 - \rho_i u_i^2 \quad (8)$$

معادله انرژی: با نوشتن معادله انرژی برای المان نشان داده شده در شکل بالا و ساده کردن آن، رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$m_i \left(h_i + \frac{u_i^2}{2} + g \Delta z \right) = Q \cdot \Delta x + m_{i+1} \left(h_{i+1} + \frac{u_{i+1}^2}{2} \right) + (m_i - m_{i+1}) h_{fg} \quad (9)$$

برای به دست آوردن گرمای خارج شده از لوله فرض شده در مرحله انتقال رابطه (۱۰) استفاده می‌شود:

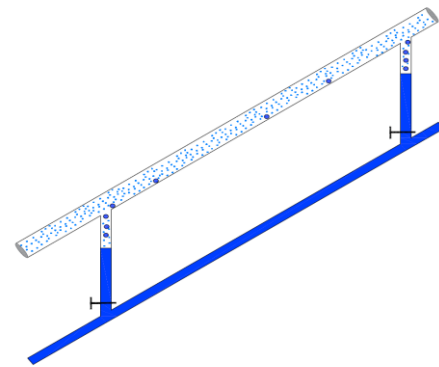
$$Q = \frac{T_i - T_o}{\frac{R_i}{2\pi r_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \lambda_k} + \frac{R_o}{2\pi r_2}} \quad (10)$$

پس از تحلیل لوله انتقال و به دست آوردن سرعت و دما و سایر پارامترهای لازم در هر المان، میزان جرم انتقال یافته از طریق لوله به صورت معادله (۱۱) به دست می‌آید:

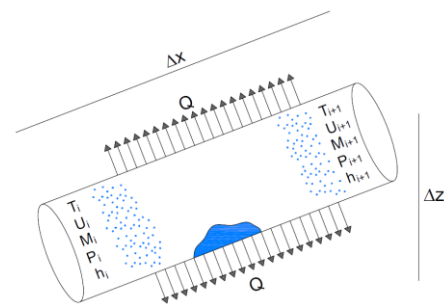
$$m_3 = \rho_n \frac{\pi D^2}{4} u_n \quad (11)$$

باید دقت نمود که در این مرحله سرعت نباید از سرعت صوت در خلا (445 m/s) تجاوز نماید؛ زیرا این امر سبب می‌شود که سیستم دچار اختلال شود و موجب صدمه زدن به لوله‌ها می‌شود. این سرعت همان سرعتی است که برای مقادیر بیشتر از آن، کاهش فشار در قسمت میعان متوقف می‌شود تا جریان بخار افزایش یابد. برای آنکه سیستم چنین عملکردی از خود نشان دهد، لازمست که اتاقت و لوله‌های میعان ابعاد مناسبی داشته باشد تا بتواند گرمای تبخیر مربوط به حداکثر جریان بخار را جذب کند.

برای به دست آوردن مقدار آب کندانس شده در مسیر کافی است که آب‌های کندانس شده در هر المان را با هم جمع کنیم.



شکل ۴. نمایی از نحوه جمع‌آوری بخارهای میعان شده
Fig. 4. View of condensed vapor collection



شکل ۵. المانی از لوله مورب برای تحلیل بخار آب انتقال
Fig. 5. Element of pipe for water vapor analysis transfer

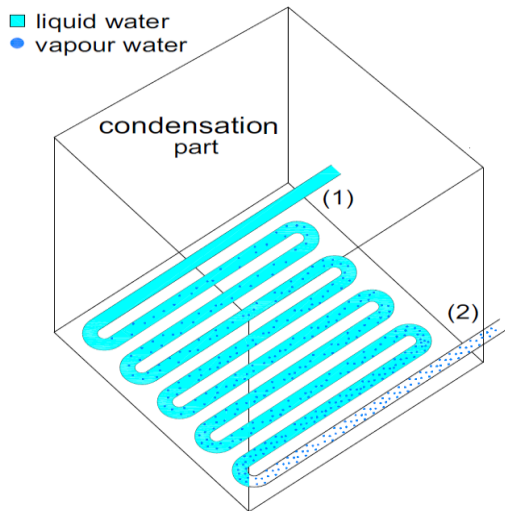
این لوله‌ها در فواصل بسیار نزدیک تعبیه شده‌اند. (حدود هر ۱۰۰-۵۰ متر) پس آب‌های کندانس شده در مرحله انتقال توسط این لوله‌ها به لوله‌ای دیگر راه پیدا می‌کنند و به سمت پایین کوه برای بهره‌برداری هدایت می‌شوند.

در این قسمت به بررسی جریان حاکم در لوله انتقال بخار پرداخته می‌شود. با توجه به شکل (۵)، المانی از یک لوله را در نظر گرفته و به بررسی معادلات حاکم بر آن پرداخته می‌شود. برای تحلیل خط لوله انتقال به سه معادله پیوستگی، مومنتوم و انرژی نیاز است که سرعت و دما را در انتهای لوله انتقال و یا در لحظه رسیدن به مرحله کندانس به دست آورد [24].

معادله پیوستگی: با نوشتن معادله پیوستگی برای المان نشان داده شده در شکل بالا، و با توجه به فرضیات اولیه رابطه (۶) به دست می‌آید:

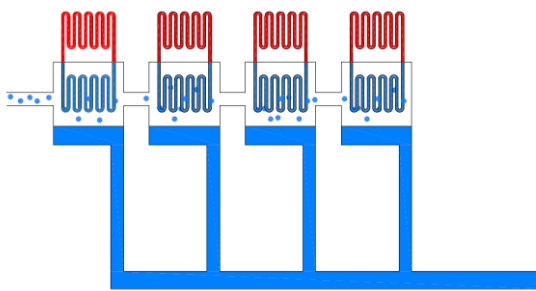
$$\rho_i u_i A = \rho_{i+1} u_{i+1} + (m_i - m_{i+1}) \quad (6)$$

این رابطه بیانگر این می‌باشد که مقدار بخار ورودی با آب



شکل ۶. نمایی از اتاقک میعان

Fig. 6. View of the condensation chamber



شکل ۷. شکل شماتیکی از قسمت میعان

Fig. 7. Schematic diagram of the condensate section

دلیل اینکه بخش کندانس از چندین قسمت در چندین شکل مختلف تشکیل شده است این است که چنین چیدمانی، سیستم را نسبت به اختلالات احتمالی، تقویت کرده و به منظور هماهنگ شدن با سایر قسمت‌ها می‌باشد. زیرا تمامی بخارهای یافته کندانس شود و گرنه با افزایش فشار و اختلال در سیستم همراه خواهد بود. در این بخش باید تمامی بخاری که به مرحله کندانس می‌رسند توسط اتاقک‌های کندانس میعان شوند. از آنجایی که در لوله‌های گرمایی و مخزن‌های کاندنس سیال آب وجود دارد و گرمایی نهان و تبخیر برابری را دارند؛ پس نرخ آب درون لوله‌های گرمایی با نرخ مقدار جرمی که باید بخار شود تقریباً برابر می‌باشد. برای محاسبه مشخصات لوله‌های گرمایی در ابتدا از معادله انرژی استفاده می‌شود که با توجه به شکل در (۲) نقطه ورودی و خروجی لوله لوله‌های گرمایی به اتاقک کندانس نوشته می‌شود [25].

$$M_4 = \sum_{i=1}^n m_i \quad (12)$$

۴-۳- قسمت میعان

در قسمت آخر بخارهای باقی مانده و انتقال یافته به قسمت کندانسور وارد می‌شوند. در این بخش باید با گرفتن گرمای بخار آن را به صورت مایع در آورد. همانطور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود کندانسورها دارای لوله‌هایی مانند لوله‌های گرمایی می‌باشند که گرما را از داخل سیستم به خارج سیستم هدایت می‌کند. درون این لوله‌ها آب در فشار زیر اتمسفر وجود دارد. فشار موجود در این لوله‌ها معادل با دمایی است که برابر با میانگین دمایی داخلی محفظه کندانس و محیط می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشخص می‌باشد در نقطه ۱ درون لوله‌های گرمایی تنها آب وجود دارد و به دلیل فشار زیر اتمسفر موجود در آن و تفاوت دمایی که با مخزن کندانس دارد در طول لوله شروع به بخار شدن می‌کند به صورتی که در هنگام خارج شدن در نقطه ۲ بخار آب درون لوله‌های گرمایی وجود دارد. در خارج از مخزن کندانس نیز همین شرایط موجود می‌باشد به طوری که بخار شروع به کندانس می‌کند. برای گرفتن گرما در قسمت خارجی می‌توان از منابع طبیعی چون آب چشمه‌ها، برف‌ها و یا دمایی سردی که در ارتفاعات موجود است، استفاده نمود. مخزن کندانس از تعداد زیادی لوله‌های افقی لوله‌های گرمایی تشکیل شده است که در شکل یکی از آنها نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود این قسمت از محفظه‌های بسیاری تشکیل شده است که برای تفهیم بیشتر لوله‌های لوله‌های گرمایی به صورت عمودی نشان داده شده‌اند. تعداد این محوطه‌ها و تعیین ابعاد لوله‌های چگالنده یا میعان کننده که با استفاده از دمایی پایین‌تر محیط بخار آب را به صورت مایع در می‌آورند، باتوجه به موقعیت جغرافیایی و شرایط آب و هوایی از جمله اختلاف دمایی موجود در محل و درون کندانسورها، ضریب انتقال حرارتی لوله‌ها، هوا و سرعت باد می‌باشد. مخزن آب شرب در موقعیتی با ارتفاع زیاد قرار گرفته است که آب‌های کندانس شده در لوله‌ای جمع‌آوری شده و به سمت نیروگاهی در پایین کوه هدایت می‌شود و می‌توان میزان قابل توجهی برق استخراج نمود که بیشتر از کل انرژی مصرف شده در این سیستم می‌باشد.

جدول ۱. دمای هوا برای مناطق مورد نظر

Table 1. Air temperature for the target areas

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Min temp of Kelardasht	1.1	2.3	4.2	6.7	7.9	8.8	14.5	15.4	16.2	8.5	4.6	2.2
Max temp of Kelardasht	11.6	14.2	18	18.2	21.1	21.2	23.3	24.4	24.7	18.3	11.8	12.1
Max temp of Chalus	16.4	13.3	8.7	21.1	26.3	26.8	29.1	30.4	32.9	25	17.2	18.3
Min temp of Chalus	5.2	6.8	2.2	12.1	13.4	15.2	21.4	22.9	21.6	15.2	9.5	7.4

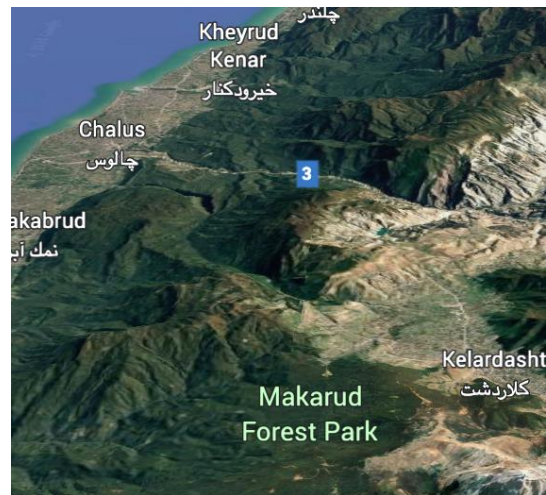
از شهر ساحلی چالوس در شمال ایران به ارتفاعات ۱۸۰۰ متری علم کوه در ۱۵ کیلومتری آن بررسی شد. اطلاعات هواشناسی مربوط به دمای سطح دریا در شهر چالوس (منبع گرم) و ارتفاعات علم کوه (منبع سرد) در جدول (۱) نشان داده شده است. دما برای یک ماه میانگین دمای روزانه (حداکثر) و شبانه (حداقل) دمای هر ماه گزارش شده است، همچنین موقعیت جغرافیایی مناطق مورد نظر در شکل شماره (۸) نشان داده شده است [25، 26].

۵- نتایج

محاسبه از بخش انتقال شروع می شود. با توجه به قدرت سیستم در دبی بخار آب، طراحی قسمت تبخیر و میعان و تعیین تعداد مخازن مورد نیاز آغاز می شود.

در ابتدا با در نظر گرفتن دمای محیط و دما در ارتفاعات مختلف، خط لوله انتقال با توجه به معادلات انتقال به طور کامل مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. سرعت بخار در طول لوله انتقال، تحت تأثیر تغییرات چگالی ناشی از دما و فشار متغیر قرار می گیرد. این تغییرات از طریق معادله پیوستگی و حل مجموعه ای از معادلات ترمودینامیکی استخراج شده از مقاله مورد بررسی تعیین می شوند. مطابق شکل (۵)، در دو سر لوله، شش پارامتر اصلی شامل سرعت، مشخصات ترمودینامیکی، و نرخ انتقال جرم نقش تعیین کننده ای دارند.

با حل معادلات مربوط به فرآیند انتقال، نرخ میعان محاسبه شده و با در دست داشتن نرخ تبخیر و ویژگی های ترمودینامیکی در ابتدای المان، می توان سرعت و سایر پارامترهای ترمودینامیکی را در نقاط مختلف مسیر استخراج کرد. این تحلیل امکان مدل سازی دقیق تر رفتار بخار در طول لوله را فراهم آورده و نقش مهمی در بهینه سازی فرآیند انتقال ایفا می کند. شایان ذکر است که لوله انتقال از عناصر مختلفی تشکیل شده است که تغییرات دما و انرژی در آنها با توجه به شرایط مختلف متفاوت است. پس از تجزیه و تحلیل تمام عناصر خط لوله، موارد زیر به دست می آید:



شکل ۸. موقعیت جغرافیایی مناطق هدف

Fig. 8. Location of target regions

$$qn_3 = h_{fg}m_3 \quad (13)$$

برای محاسبه q از فرمول (۱۴) استفاده می شود:

$$q = h_c A_h (T_c - T_h) \quad (14)$$

دقت شود که در هنگام کندانس، مخزن کندانس کمی با کاهش فشار روبه رو خواهد بود. به دلیل کم بودن مقدار این اختلاف فشار می توان از آن صرف نظر نمود؛ اما بهتر است این کاهش فشار برای دقت بیشتر در نظر گرفته شود که از رابطه (۱۵) محاسبه می شود [26].

$$\Delta P_c = \frac{\sqrt{2\pi(P_c/\rho_c)}(m_3/A_c)}{\alpha_c\{1 - (1/2)(P_c/\rho_c\lambda)\}} \quad (15)$$

۴- مطالعه موردی

مقدار تفاوت بین دمای منبع سرد و گرم و همچنین مسیر کوتاه، یک دیدگاه کاربردی مناسب و امکان پذیر برای سیستم پیشنهادی است. در صورت تحقق این دو اولویت، تنها دغدغه فنی و عملیاتی، میزان ارتفاع عمده خواهد بود. در هر صورت موارد ذکر شده می تواند نتایج کارآمدی داشته باشد. یک مطالعه موردی با نتایج رضایت بخش در انتقال آب شیرین شده به روش بخار سرد

جدول ۲. نتایج محاسبه شده برای سیستم پیشنهادی

Table 2. Result of the proposed system

July (tir)	D=1m	D=2m
Transfer section		
Transfer rate m_3 (kg/s)	11.23	48.92
Vapor velocity at the first (m/s)	284.3	244.1
Vapor velocity at the end (m/s)	361.3	323.9
Water transfer rate m_4 (kg/s)	1.1	1.8
Vapor temperature at end ($^{\circ}\text{C}$)	19.9	21.4
Evaporation section		
Vapor transfer rate m_2 (kg/s)	12.8	48.9
Number of evaporation chamber	4	12
evaporation temperature ($^{\circ}\text{C}$) T_{s1}	24.3	23.8
Deaeration temperature ($^{\circ}\text{C}$) T_{dw}	25.5	25.5
Pumped water percentage (%)	25	25
Deaerate pumped water (kg/s)	100	100
Distilled water on site m_1 (kg/s)	3	10
condensation section		
Number of condensation chamber	4	10
Heat pipes diameters	10	10
Condensation chamber dimensio (m^3)	4x4x4	4x4x4

در شکل‌های (۹ تا ۱۱) میزان آب تولید شده در منطقه، طول مسیر و مقصد مشخص شده است. متوسط آب تولیدی در روز برای یک لوله با قطر ۲ متر در روز $3950 \text{ (day/m}_3\text{)}$ است که $2950 \text{ (day/m}_3\text{)}$ از آن انتقال و مابقی به صورت محلی مصرف می‌شود. عدد به دست آمده مقدار متوسطی از آب تولیدی در ماه‌های مختلف می‌باشد که بسته به میزان دماهای موجود و شرایط سیستم از 3742 تا 4227 متر مکعب در روز متغیر می‌باشد. میزان آب تولیدی با استفاده از لوله با قطر ۱ متر $850 \text{ (day/m}_3\text{)}$ است که از این مقدار $710 \text{ (day/m}_3\text{)}$ منتقل می‌شود که برای مه‌های مختلف از 745 تا 971 متر مکعب در روز متغیر می‌باشد.

این سیستم برای تولید انبوه آب شیرین لزوماً به لوله‌های با قطر زیاد نسبت به مطالعات پیشین نیاز ندارد (۲۹)، زیرا با کاهش قطر، سرعت بخار آب در لوله مطابق با معادلات (۹) افزایش می‌یابد. در صورتی که در مطالعات گذشته با بالارفتن قطر حداکثر ظرفیت سیستم جهت انتقال افزایش می‌یافت. همچنین استفاده از لوله‌های با قطر بسیار زیاد (۴ متر) علاوه بر بالابردن هزینه تولید و اجراء، کارایی بیشتری نسبت به قطرهای کوچکتر ندارد.

- سرعت در ابتدا و انتهای لوله انتقال برای مقایسه با سرعت صدا.
 - مقدار بخار منتقل شده و باید متراکم شود (m_3).
 - مقدار آبی که در قسمت انتقال متراکم شده و جمع شده است (m_4).
 - دمای انتهای مسیر، جایی که خط لوله به کندانسور (T_c) می‌رسد.
- از آنجایی که دمای بخار داخل کندانسور، مقدار بخار انتقالی و دمای بیرون مشخص است، تعداد محفظه‌های مورد نیاز برای چگالش و ابعاد لوله‌های حرارتی مشخص می‌شود. مقدار آب منتقل شده همراه با آب متراکم شده از طریق مسیر، مقدار کل آبی را که باید به صورت بخار از مخزن بخار خارج شود ($m_2 = m_3 + m_4$) به دست می‌دهد. با داشتن تعداد سیستم‌های گاززدایی و مخازن تبخیر و میزان آب تولیدی، کل آب پمپاژ شده به لوله به دست می‌آید. فشار در مخزن تبخیر و در سیستم گاززدایی با توجه به شرایط دمای فعلی و مقدار آب مورد نیاز تعیین می‌شود. در نهایت میزان آب تولید شده در سایت به دست می‌آید. با در نظر گرفتن مقدار بخار انتقالی تعداد مخازن چگالش و ابعاد لوله‌های حرارتی محاسبه می‌شود.
- از آنجایی که این سیستم بیشترین میزان تولید را در ماه جولای دارد، این ماه برای نمایش نتایج انتخاب شده است. حداکثر تعداد مخازن مورد نیاز در بخش تبخیر و میعان‌ات گازی نیز برای این ماه تعیین شده است. نتایج محاسبات و میزان آب تولید شده در تیرماه برای یک خط لوله با قطرهای ۱ و ۲ متر در جدول (۲) ارائه شده است. به طور طبیعی، هرچه قطر لوله انتقال بیشتر باشد، ظرفیت انتقال جریان نیز افزایش می‌یابد. با این حال، باید توجه داشت که در لوله‌هایی با قطر بزرگتر، افت فشار کمتری رخ می‌دهد؛ پس در طول انتقال برابر برای ۲ قطر متفاوت، افت فشار در لوله کوچکتر بیشتر می‌شود که این امر سبب می‌شود فشار و دما در طول لوله انتقال با قطر کوچکتر بیشتر کاهش یابد. طبیعی است هر چه اختلاف فشار بین ۲ سر لوله انتقال بیشتر باشد سرعت حرکت سبال نیز بیشتر بوده و انتقال سریعتر انجام می‌شود؛ اما به واسطه قطر کمتر قدرت انتقال و نرخ کمتری را دارد.

پیشنهادی از نقطه نظر کارایی و نتیجه نهایی برتر است. در مطالعات پیشین، به ویژه آنهایی که در شرایط خلأ انجام شده، استفاده از لوله های قطر بزرگ برای انتقال آب رایج بوده است. اما تحلیل داده ها نشان می دهد که با افزودن تمهیدات اصلاحی و بهره گیری از تغییرات بر اساس پژوهش های قبلی، راندمان سیستم به طور قابل توجهی ارتقاء یافته است. این بهبود به حدی است که دیگر نیاز به استفاده از لوله های قطر بزرگ که قبلاً ضروری به نظر می رسید، نیست. در نمونه های مشابه، برای انتقال آب، از لوله هایی با قطر ۴ متر استفاده شده است، اما بررسی نرخ تولید نشان می دهد که عملکرد سیستم جدید به صورت واضحی بهتر است.

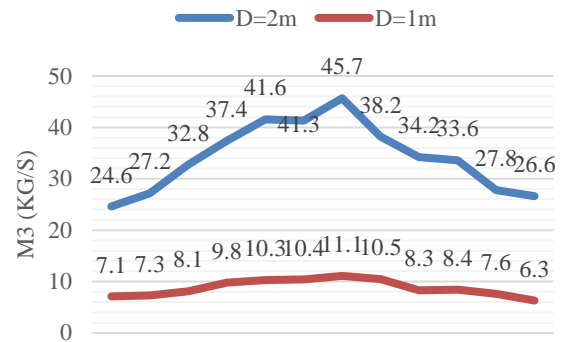
در ضمن، هرچند طول مسیر انتقال پارامتری مهم است و روی راندمان تأثیر دارد، اما تفاوت چشمگیری در نتایج نهایی مشاهده می شود که حکایت از برتری سیستم پیشنهادی دارد. در مجموع، این تحقیق نشان می دهد که سیستم جدید نه تنها نسبت به نمونه های موجود عملکرد بهتری دارد، بلکه حجم قابل توجهی از آب را تولید می کند، و این ها گواه بر برتری و آینده داری فناوری پیشنهادی در حوزه نمک زدایی است.

از منظر فیزیک و با رعایت اصول حاکم بر پدیده های انتقال، با در نظر گرفتن فناوری و توانایی بشر در ساخت خطوط لوله طولانی، ایجاد خط لوله بخار هم از جنبه های کاربردی و هم منطقی به نظر می رسد. انتقال آب شیرین کن از طریق این سیستم دارای مزایای زیادی است که موجب جلب توجه محققین در توسعه این روش گردیده است. سطح مقطع لوله انتقالی و اختلاف دمای اندک، از جمله عوامل مؤثر در انتقال بخار در سیستم مذکور محسوب می شوند.

جدول ۳. مقایسه نتایج سیستم پیشنهادی با سایر مطالعات

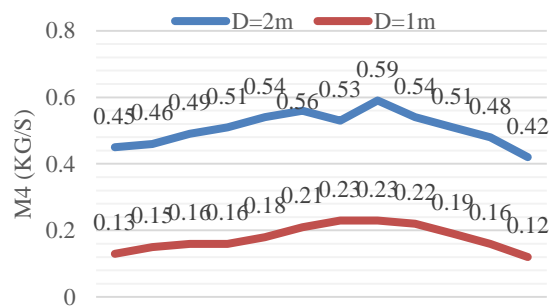
Table 3. Comparison of the proposed system with other studies.

reference	L (km)	D (m)	h (m)	m ₁ (m ³ /day)
(17)	160	2 & 4	2200	48 & 278
	70	2 & 4	1500	48 & 278
(22)	160	2 & 4	2200	54 & 324
	70	2 & 4	1500	55 & 354
	30	1 & 2 & 4	2300	33 & 211 & 1063
(29)	29	1 & 2 & 4	2000	26 & 169 & 1085
This study	15	1	1800	850
This study	15	2	1800	3950



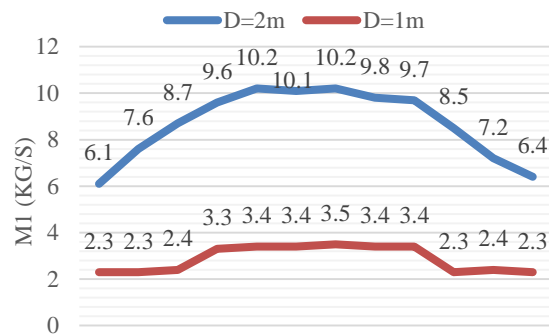
شکل ۹. میزان تولید ماهانه آب مقطر و انتقالی m₃

Fig 9. Monthly production rate of distilled and transferred water, m₃ (L/s).



شکل ۱۰. نرخ تولید ماهانه آب مقطر در بخش انتقال، m₄

Fig. 10. Monthly production rate of distilled water in transportation part, m₄ (L/s).



شکل ۱۱. نرخ ماهانه آب مقطر در محل تبخیر، m₁

Fig. 11. Monthly Rate of distilled water on the site, m₁ (L/s)

نتایج به دست آمده با سیستم های مشابه تصفیه و انتقال آب مقایسه شد تا تصویری جامع تر و کامل تر از عملکرد سیستم های نمک زدایی ارائه گردد. هدف اصلی سیستم پیشنهادی، انتقال مؤثر آب در فرآیند نمک زدایی است که در بسیاری از سیستم های معاصر تنها تا حدی به این هدف پرداخته شده است. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود، این مقایسه نشان می دهد که سیستم

قطرهای بزرگ لزوماً ضروری نیست. لوله‌هایی با قطر کوچک‌تر می‌توانند سرعت انتقال بالاتری را فراهم کنند، اما این سرعت باید تحت کنترل قرار گیرد تا از محدوده سرعت صوت فراتر نرود. در شرایط خلأ، سرعت ذرات منتقل شده می‌تواند به مقدار قابل توجهی به سرعت صوت نزدیک شود که نیازمند تنظیمات دقیق در طراحی سیستم است.

راه‌اندازی این سامانه تنها مستلزم دسترسی به آب دریا یا مناطق مرتفع اقیانوسی و کوهستانی با اختلاف دمایی جزئی است. با هزینه اولیه نسبتاً کم، امکان نصب سیستمی فراهم می‌شود که نه تنها فرآیند شیرین‌سازی را اجرا می‌کند، بلکه آب تولیدی را نیز به طور مستقیم انتقال می‌دهد. این ویژگی موجب می‌شود که سیستم پیشنهادی از نظر بهره‌وری و مقرون‌به‌صرفه بودن، عملکرد بهتری نسبت به بسیاری از روش‌های موجود در حوزه نمک‌زدایی داشته باشد.

۷- علائم و اختصارات

C_p	ظرفیت گرمایی ویژه آب ($J/^\circ C.kg$)
D	قطر لوله
g	شتاب ناشی از گرانش
L	طول عنصر
M	نرخ جریان جرمی (kg/s)
me	نرخ تبخیر (kg/h), (kg/s)
m_t	نرخ انتقال (kg/h), (kg/s)
m_c	نرخ میعان (kg/h), (kg/s)
m_{fw}	میزان آب شیرین تولیدی و انتقالی (kg/h)
n	طول عمر بر حسب سال
p	فشار بخار (kPa)
p_s	فشار سیستم (kPa)
Δp_{ec}	افت فشار کل در خلأ ($Pa=N/m^2$)
t	زمان (s)
T_{s1}	دمای تبخیر سیستم ($^\circ C$)
T_1	دمای سیستم ($^\circ C$)
T_{sw}	دمای آب شور ($^\circ C$)
T_0	دمای بخار در انتهای لوله ($^\circ C$)
T_{dw}	دمای آب گاززدا ($^\circ C$)

افزایش قطر لوله تا حد ممکن، انتخاب مناطق آب‌وهوایی با حداکثر اختلاف دمای طبیعی در حداقل فاصله، و بهره‌گیری از گزینه‌های آب خام با شوری کمتر از آب دریا (مانند پساب‌ها و آب‌های شور) می‌تواند به بهبود کارایی سیستم کمک کند. محاسبات مربوط به انتقال بخار، در صورت عدم ساده‌سازی فرضیات و عدم دخالت شرایط پیرامونی در مورد بخش چگالش، و با در نظر گرفتن حداکثر شوری و قابلیت تراکم‌پذیری سیال، اعداد قابل اعتمادتری را برای انتقال بخار نسبت به مدل‌سازی‌های قبلی ارائه می‌دهد.

با وجود اینکه طول خط انتقال بخار مسئله‌ای مهم است، صنعت تولید لوله‌های باکیفیت و سبک در قطرهای مختلف امروز به مرحله‌ای رسیده است که از لحاظ استحکام، جرم، عایق حرارتی، سهولت نصب و مهارت در بهره‌برداری، کاملاً قابل اعتماد است و به لحاظ بازگشت سرمایه در زمان مقرر، تقریباً هیچ محدودیتی در زمینه لوله‌کشی وجود ندارد؛ بنابراین، با انجام مطالعات جامع، از جمله ارزیابی‌های زیست‌محیطی و هواشناسی، و همچنین نظارت دقیق بر شرایط دمایی مبدأ، مقصد و انتخاب نقاط مناسب برای انتقال، امکان‌پذیری روش‌های انتقال بهبود می‌یابد. شایان‌ذکر است که هندسه خطوط لوله انتقال می‌تواند به کارایی سیستم آسیب برساند، اما آنچه در بخش انتقال حیاتی است، طول لوله می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله به معرفی و تحلیل سیستم خط لوله نمک‌زدایی پرداخته است؛ روشی نوین برای شیرین‌سازی و انتقال آب دریا که طی سه مرحله تبخیر، انتقال و تراکم بررسی شده است. در این مطالعه، هر یک از این مراحل همراه با فرایندها و فرمول‌های مرتبط، به طور دقیق تشریح شده‌اند.

دستاوردهای کلیدی این تحقیق شامل افزایش سرعت انتقال و بهبود ظرفیت شیرین‌سازی آب دریا است که می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر بهینه‌سازی تأمین آب در مناطق مختلف داشته باشد. برای بررسی عملی این سیستم، شهر چالوس و ارتفاعات کلاردشت به عنوان نمونه‌های مطالعاتی انتخاب شده‌اند تا عملکرد روش پیشنهادی در شرایط واقعی ارزیابی شود.

بررسی‌های دقیق‌تر در مورد قطرهای مختلف لوله‌های انتقال نشان می‌دهد که برخلاف برخی تحقیقات پیشین، استفاده از

حمایت‌های مادی و معنوی از سوی مراکز، دانشگاه‌ها یا نهادهای خاص به انجام رسیده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچگونه تعارض منافی (اعم از مالی، شخصی یا سازمان) در رابطه با انتشار این مقاله وجود ندارد و موردی گزارش نشده است.

مشارکت نویسندگان

کوشا آقازاده: ایده‌پردازی، طراحی روش تحقیق، تحلیل داده‌ها و نگارش نسخه اولیه مقاله. رضا عطارنژاد: نظارت علمی، بازنگری نهایی و اصلاحات تخصصی متن.

منابع مالی

این مطالعه بدون استفاده از هرگونه منابع مالی (اعم از پژوهانه یا اعتبار مالی دولتی و خصوصی) انجام شده است و هزینه‌های مربوطه توسط نویسندگان تأمین گردیده است.

Q	مقدار گرمای استخراج شده در واحد طول (W/m)
u	سرعت بخار (m/s)
Q _c	کل گرمای استفاده شده در قسمت چگالش
Q _{in}	انرژی گرمایی ورودی خالص (kW)
w	ورودی کار (W/m)
Δz	ارتفاع عنصر لوله (m)
US\$	دلار آمریکا
τ _w	تنش برشی دیوار (N/m ²)
λ _c	گرمای نهان تراکم بخار (J/kg)
λ _e	گرمای نهان تبخیر آب (J/kg)
ρ	چگالی بخار (kg/m ³)
Q _c	کل گرمای استفاده شده در قسمت چگالش
Q _{in}	انرژی گرمایی ورودی خالص (kW)
w	ورودی کار (W/m)

قدردانی

نویسندگان اعلام می‌دارند که این مقاله بدون دریافت

References

- [1] Firozjaei, MR., Hajebi, Z., Naeeni, STO. and Akbari, H., 2024. Discharge performance of a submerged seawater intake in unsteady flows: Combination of physical models and decision tree algorithms. *Journal of Water Process Engineering*, 60.
- [2] Firozjaei, MR., Taghi, S., Naeeni, O. and Akbari, H., 2023. Evaluation of seawater intake discharge coefficient using laboratory experiments and machine learning techniques. *Ships and Offshore Structures*, pp.1–14.
- [3] Hajebi, Z., Firozjaei, MR., Naeeni, STO. and Akbari, H., 2024. Hydraulic performance of bottom intake velocity caps using PIV and OpenFOAM methods. *Appl Water Sci*, 14(3), pp.1–13.
- [4] Behnam, P., Faegh, M. and Khiadani, M., 2022. A review on state-of-the-art applications of data-driven methods in desalination systems. *Desalination*, 532, 115744.
- [5] Tong, T. and Elimelech, M., 2016. The Global Rise of Zero Liquid Discharge for Wastewater Management: Drivers, Technologies, and Future Directions. *Environmental Science and Technology*, 50(13), 6846–55.
- [6] Rahmani Firozjaei, M., Salehi, Neyshabouri, SAA., Amini Sola, S. and Mohajeri, SH., 2019. Numerical Simulation on the Performance Improvement of a Lateral Intake Using Submerged Vanes. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 43(2), pp.167–77.
- [7] Ghazi, ZM., Rizvi, SWF., Shahid, WM., Abdulhameed, AM., Saleem, H. and Zaidi, SJ., 2022. An overview of water desalination systems integrated with renewable energy sources. *Desalination*, 542, 116063.
- [8] Grzegorzec, M., Wartalska, K. and Kaźmierczak, B., 2023. Review of water treatment methods with a focus on energy consumption. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 143.
- [9] Arnau, P.A., Navarro, N., Soraluca, J., Martínez-Iglesias, J.M., Illas, J. and Oñate, E., 2019. Cool steam method for desalinating seawater. *Water (Switzerland)*, 11(11), pp.1–16.
- [10] Herrán-González, A., De La Cruz, J.M., De Andrés-Toro, B. and Risco-Martín, J.L., 2009. Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network. *Appl Math Model*, 33(3), pp.1584–600.
- [11] Aghazadeh, K. and Attarnejad, R., 2026. High-pressure desalination pipeline system for water purification and vapor transfer utilizing waste heat from factories. *Applied Water Science*, 16 (101). <https://doi.org/10.1007/s13201-026-02795-0>.
- [12] Wellmann, J. and Morosuk, T., 2016. Renewable energy supply and demand for the city of El Gouna, Egypt. *Sustainability (Switzerland)*, 8(4), 314.

- [13] Inoue, K., Abe, Y., Murakami, M. and Mori, T., 2006. Feasibility study of desalination technology utilizing the temperature difference between seawater and inland atmosphere. *Desalination*, 197(1-3), pp.137-53.
- [14] Kong, S. tong, 2011. Application F, Data P. (12) *United States Patent*, 2(12), 12-5.
- [15] Rahmani Firozjaei, M., Behnamtalab, E. and Salehi Neyshabouri, SAA., 2020. Numerical simulation of the lateral pipe intake: flow and sediment field. *Water and Environment Journal*, 34(2), pp. 291-304.
- [16] Naeeni, S.T.O., Rahmani Firozjaei, M., Hajebi, Z. and Akbari, H., 2023. Investigation of the performance of the response surface method to optimize the simulations of hydraulic phenomena. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1).
- [17] Aghazadeh, K. and Attarnejad, R., 2025. Experimental investigation of friction coefficient in water vapor transportation pipelines under sub-atmospheric pressure. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 114.
- [18] Firozjaei, M.R., Hajebi, Z., Naeeni, S.T.O., Akbari, H. and Iglesias, G., 2025. Hydrodynamic Performance of Seawater Intake Structures Through Numerical Modelling and Particle Image Velocimetry. *Water (Basel) [Internet]*, 17(17), 2607. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/17/2607>
- [19] Spedaletti, S., Rossi, M., Comodi, G., Salvi, D. and Renzi, M., 2021. Energy recovery in gravity adduction pipelines of a water supply system (WSS) for urban areas using Pumps-as-Turbines (PaTs). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45(August 2020).
- [20] Aghazadeh, K. and Attarnejad, R., 2024. Experimental investigation of desalination pipeline system and vapor transportation by temperature difference under sub-atmospheric pressure. *Journal of Water Process Engineering*, 60(March), 105133.
- [21] Aghazadeh, K. and Attarnejad, R., 2020. Improved Desalination Pipeline System Utilizing the Temperature Difference under Sub-Atmospheric Pressure. *Water Resources Management*, 1;34(1), pp.1-19.
- [22] Shojaei, M., Nosrati, M. and Attarnejad, R., 2022. Mathematical analysis of sub-atmospheric vapor pipeline transmission for seawater desalination: Green and Eigen functions solutions. *Desalination Water Treat*, 254, pp.169-80.
- [23] Hamdan, M., Al-Kasasbeh, T., Qawasmeh, B. and Al Assaf, A., 2023. Waste Heat Recovery to Improve the Carbon Footprint a Case Study: Cement Industry in Jordan. *International Review of Civil Engineering*, 14(2).
- [24] Aghazadeh, K., Asadzadeh Totonchi, B. and Attarnejad, R., 2026. Energy-efficient water reuse system for high-rise buildings utilizing sub-atmospheric pressure and temperature gradients. *Urban Water Journal*, pp.1-18. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2026.2639445>.
- [25] Takehara, Y., Fujimoto, S. and Okumura, K., 2010. High-velocity drag friction in dense granular media. *Europhysics Letters*, 92(4).
- [26] Moore, J. and Runkles, J., 1968. Evaporation from brine solutions under controlled laboratory conditions. *Texas Water Development Board, Austin, Texas* (May), pp.1-67.
- [27] Climate-Data.org [Internet]. Available from: <https://fa.climate-data.org/>
- [28] Weather [Internet]. Available from: <http://www.irimo.ir/far/>
- [29] Aghazadeh, K. and Attarnejad, R., 2020. Study of sweetened seawater transportation by temperature difference. *Heliyon*, 6(3).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Aghazadeh, K. and Attarnejad, R., 2026. Implementation of an Advanced Modern System for Seawater Desalination and Transportation: A Case Study of Chalus City. *Modares Civil Engineering journal*, 26(2), pp.49-63.

