





Numerical Simulation and Experimental Validation of Surface Water Evaporation Reduction Using Novel Coating Fluids

Mohammad Hassanzadeh¹, Saeed Esfandeh², Zahra Kamyab³, Mohammad Hassan Kamyab⁴

¹Master of Science in Chemical Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran. Email: mohammad_3336@yahoo.com

²Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran. Email: saeedesfandeh.uk4@gmail.com

³Ph. D. in Agricultural Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: z. kamyab2009@gmail.com

⁴Correspondence: Ph. D. in Mechanical Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran. Email: mohammadhkamyab@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 1 August 2025

Received in revised form: 12 November 2025

Accepted: 17 December 2025

Available online: 20 May 2026

Keywords:

Evaporation Reduction

Covering Fluid

Hexadecanol

Numerical Simulation

Volume of Fluid (VOF)

ABSTRACT

Given the decline in water resources, the control and reduction of evaporation from free water surfaces in reservoirs and dams is of considerable importance. One effective method for achieving this goal is the application of anti-evaporation surface-covering fluids. In this study, the effect of the anti-evaporation fluid hexadecanol on water evaporation was investigated. In the experimental section, the reduction of surface water evaporation over a 16-day period was assessed using a Class A pan. During this period, parameters influencing evaporation namely air flow velocity, temperature, and relative humidity were measured three times per day. In the numerical section, the simulation was carried out using the finite-volume method by solving the continuity and momentum equations under the assumption of multiphase flow. The multiphase model was implemented via the Volume of Fluid (VOF) method, considering four phases: water, air, water vapor, and the anti-evaporation fluid. Simulations were performed for two conditions—with and without the anti-evaporation fluid applied to the water surface—using an initial water depth of 2.4 cm. Following mesh-independence analysis and validation of the model with the experimental data, the unsteady simulation results were examined over a 24-minute interval. The findings indicated that the use of the covering fluid can reduce evaporation by approximately 76%. Furthermore, the discrepancy between the simulation predictions and the experimental measurements was approximately 13%, which is regarded as acceptable.

Cite this article: M. Hassanzadeh, S. Esfandeh, Z. Kamyab, and M. H. Kamyab, "Numerical Simulation and Experimental Validation of Surface Water Evaporation Reduction Using Novel Coating Fluids," Journal of Passive Defence, vol. 17, no. 1, pp. 91-101, 2026.

DOI: <https://doi.org/10.47176/pd.2026.1561>



OPEN ACCESS

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University.

Introduction

The growing scarcity of freshwater resources, driven by climate change, greenhouse gas emissions, and increased water demand, has become a critical global challenge. Evaporation from free water surfaces in reservoirs, dams, and open canals accounts for a significant portion of water loss, particularly in arid and semi-arid regions such as Iran. One promising and cost-effective approach to mitigate this loss is the application of anti-evaporation monolayer-forming materials, such as fatty alcohols (e.g., hexadecanol and octadecanol). These substances spread on the water surface and form a thin film that acts as a physical barrier, reducing vapor escape and increasing surface tension resistance.

Despite numerous experimental studies on evaporation reduction using monolayers, there remains a lack of validated numerical models capable of accurately simulating multiphase interactions between water, air, vapor, and the coating fluid. Most previous research has focused on empirical measurements, while computational fluid dynamics (CFD) studies, particularly those using the Volume of Fluid (VOF) method to track four distinct phases, are rare. This study aims to:

- ❖ Experimentally evaluate the evaporation reduction efficiency of hexadecanol over a 16-day period using a Class A evaporation pan.
- ❖ Develop a 3D CFD model based on the VOF approach to simulate evaporation with and without the coating fluid.
- ❖ Validate the numerical results against experimental data.
- ❖ Quantify the evaporation reduction percentage and analyze the underlying physical mechanisms (temperature distribution, vapor phase fraction, and mass transfer flux).

The novelty of this work lies in the simultaneous consideration of four phases (water, air, water vapor, and hexadecanol) and the use of a 10:1 scaled geometry to bridge laboratory experiments and numerical simulations.

Results and Discussion

Experimental Findings

The experimental results over 16 days showed that the presence of a hexadecanol monolayer significantly reduced water evaporation compared to the control (uncoated) pan. Key environmental parameters (air velocity, temperature, and relative humidity) were recorded three times daily. The average evaporation rate in the coated pan was substantially lower, leading to a calculated reduction of approximately 76% by the end of the simulation period (24-minute equivalent scaled time). This confirms the effectiveness of hexadecanol as an anti-evaporation coating.

Numerical Setup and Validation

A finite-volume CFD model was developed using the VOF multiphase method. The geometry was a cylindrical container (diameter and height scaled to 4.2 cm) with an initial water depth of 4.2 cm. Four phases were defined:

- ❖ Primary: Air
- ❖ Secondary: Water
- ❖ Tertiary: Water vapor

❖ Quaternary: Hexadecanol (anti-evaporation fluid)

The continuity, momentum (with continuum surface force – CSF – model for surface tension), and energy equations were solved. A structured-unstructured hybrid mesh was used, with a grid independence study confirming that Case 4 (approximately 299,025 nodes, mesh size 0.5 mm) provided accurate results (evaporation mass of 0.02599 kg) with reasonable computational cost. The time step was selected to maintain a Courant number below 1.

Validation: The numerical results were compared with experimental measurements over 24 simulated minutes. For Scenario 1 (without coating), the numerical evaporation mass was 0.10829 kg vs. experimental 0.09415 kg ($\approx 12\%$ difference). For Scenario 2 (with hexadecanol), the numerical value was 0.02599 kg vs. experimental 0.02261 kg ($\approx 13\%$ difference). These differences are considered acceptable for multiphase flow simulations.

Temperature and Vapor Distribution

Figure 6 (in the original paper) shows temperature contours for both scenarios. In the uncoated case, higher temperatures are observed near the container walls due to heat conduction, leading to stronger evaporation. In the coated scenario, the hexadecanol layer insulates the water surface, resulting in a more uniform and cooler surface temperature distribution.

Mass Transfer Flux

Figure 7 illustrates the molecular mass transfer flux (evaporation rate). The average flux in Scenario 1 is significantly higher than in Scenario 2. The reduction in flux is attributed to the increased surface tension and reduced thermal energy reaching the water surface due to the coating.

Evaporation Rate and Surface Fluctuations

Figure 9 shows surface fluctuations (water-air interface oscillations) in Scenario 2. The presence of hexadecanol dampens wave action and surface disturbances caused by air flow, further reducing the effective evaporative surface area. Figure 8 presents the volumetric evaporation rate ($\text{kg/s}\cdot\text{m}^3$), confirming lower values in the coated case.

Temporal Reduction and Efficiency

Figure 12 compares the numerical evaporation rates over time for both scenarios. The key finding is that the coating reduces evaporation by approximately 76% after 24 minutes. Moreover, the efficiency increases with time: less than 20% reduction in the first 10 minutes, rising to 76% at 24 minutes, and extrapolated to 85% after 4 hours. This time-dependent behavior suggests gradual spreading and optimization of the monolayer.

Spatial Distribution of Evaporation

Figure 9 (and related analysis) reveals that in Scenario 2, the lowest evaporation occurs near the container walls where hexadecanol accumulates due to wind-driven drift. Conversely, in Scenario 1 (uncoated), the maximum evaporation occurs at the center of the pan, where air contact is highest. This

indicates that in open reservoirs, side walls can help retain the coating fluid, enhancing its effectiveness—provided the reservoir is not completely full.

Conclusion

This study successfully combined experimental measurements and numerical simulations to evaluate the performance of hexadecanol as a novel anti-evaporation coating fluid. The main conclusions are:

- ❖ High efficiency: Hexadecanol reduced surface water evaporation by up to 76% within 24 minutes in the scaled model, with projections of 85% over 4 hours. The discrepancy between numerical and experimental results was approximately 13%, validating the accuracy of the VOF-based CFD model.
- ❖ Physical mechanisms: The coating reduces evaporation by:
 - ❖ Creating a physical barrier to vapor diffusion.
 - ❖ Increasing surface tension (via the CSF model).
 - ❖ Dampening surface waves and fluctuations.
 - ❖ Reducing surface temperature and heat transfer to the water interface.
- ❖ Practical implications: The findings suggest that anti-evaporation monolayers can be a cost-effective and environmentally friendly solution for reducing water losses in reservoirs, dams, and agricultural ponds, especially in arid regions like Iran. For optimal performance, reservoirs should not be completely filled, allowing side walls to help retain the coating fluid.
- ❖ Limitations and future work: This study used a 10:1 scaled geometry and a 24-minute simulation window. Future research should extend to full-scale geometries, longer durations, and consider wind shear effects more comprehensively. Additionally, investigating nanoparticles or hybrid coatings may further improve stability and efficiency.

Overall, this research provides a validated numerical framework for designing and optimizing monolayer-based evaporation suppression systems, contributing to improved water resource management and national water security.

شبیه‌سازی عددی و اعتبار‌سنجی آزمایشگاهی کاهش تبخیر سطحی آب با بهره‌گیری از سیالات

پوششی نوین

محمدحسن زاده^۱ ID، سعید اسفنده^۲، زهرا کامیاب^۳، محمدحسن کامیاب^۴ * ID

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. رایانامه: mohammad_3336@yahoo.com

^۲ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران. رایانامه: saeedesfandeh.uk4@gmail.com

^۳ دکتری مهندسی کشاورزی دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: z.kamyab2009@gmail.com

^۴ دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: mohammadhkamyab@gmail.com

مشخصات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰

باتوجه به کاهش منابع آبی، کنترل و کاهش تبخیر از سطوح آزاد آب در مخازن و سدها از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از روش‌های مؤثر برای این منظور، استفاده از سیالات پوششی ضد تبخیر است. در این پژوهش، اثر سیال ضد تبخیر هگزادکانول بر میزان تبخیر آب بررسی شده است. در بخش تجربی، کاهش تبخیر سطحی آب در یک دوره ۱۶ روزه با استفاده از تشت کلاس A مورد ارزیابی قرار گرفت. طی این دوره، پارامترهای مؤثر بر تبخیر نظیر سرعت جریان هوا، دما و رطوبت نسبی سه بار در روز اندازه‌گیری شدند. در بخش عددی، شبیه‌سازی با استفاده از روش حجم محدود و حل معادلات پیوستگی و مومنتوم با فرض جریان چندفازی انجام شد. مدل چندفازی به روش حجم سیال (VOF) پیاده‌سازی شده و چهار فاز شامل آب، هوا، بخار آب و سیال ضد تبخیر در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی در دو حالت بدون و با حضور سیال ضد تبخیر بر سطح آب، با ارتفاع اولیه آب ۴/۲ سانتی‌متر، انجام شد. پس از تحلیل استقلال از شبکه و اعتبار‌سنجی مدل با داده‌های تجربی، نتایج ناپایایی شبیه‌سازی در بازه زمانی ۲۴ دقیقه بررسی گردید. نتایج نشان داد که استفاده از سیال پوششی می‌تواند میزان تبخیر را تا حدود ۷۶٪ کاهش دهد. همچنین، اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی و نتایج تجربی حدود ۱۳٪ به‌دست آمد که قابل قبول ارزیابی می‌شود.

کلیدواژه‌ها:

کاهش تبخیر

سیال پوششی

هگزادکانول

شبیه‌سازی عددی

روش حجم سیال (VOF)

استناد: حسن زاده، محمد، اسفنده، سعید، کامیاب، زهرا، کامیاب، محمدحسن، "شبیه‌سازی عددی و اعتبار‌سنجی آزمایشگاهی کاهش تبخیر سطحی آب با بهره‌گیری از سیالات پوششی نوین"، نشریه پدافند غیرعامل، دوره ۱۷، شماره ۱، صفحات ۹۱-۱۰۱، ۱۴۰۵.

DOI: <https://doi.org/10.47176/pd.2026.1558>

©نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع).

OPEN ACCESS

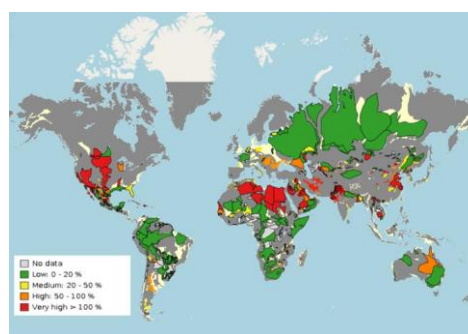
تا به امروز روش‌های بسیاری برای کنترل تبخیر از سطح آزاد آب که جایگاه ویژه‌ای در تأمین آب شرب دارد، مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی اشاره کرد. در روش شیمیایی از تزریق یک سیال یا نانو سیال به صورت مونولایر بر روی آب برای مقابله با تبخیر استفاده می‌کنند. مونولایرها در واقع فیلم‌های نازکی هستند که در مرز دو فاز مختلف مثل فصل مشترک قرار می‌گیرند و فازها را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۱۳ - ۱۴]. در این راستا پژوهش‌های بسیاری برای کاهش تبخیر از سطح آزاد آب با مونولایرهای مختلف انجام شده است. زهیری و همکاران [۱۵] تاثیر هگزادکانول و اکتادکانول بر کاهش تبخیر سطحی را بررسی کردند. بارنز [۱۶] در آزمایشگاه خود به بررسی تأثیر هگزادکانول و اکتادکانول بر کاهش تبخیر آب پرداخت. هرزیگ و همکاران [۱۷] در پژوهش خود به بررسی استفاده از مونولایرها به‌عنوان امولسیون در جهت کاهش تبخیر آب پرداختند. در مطالعه پریم و همکاران [۱۸] به بررسی افزایش طول عمر مونولایرها در جهت کاهش تبخیر آب پرداخته شد. تا به امروز سیالات و نانو سیالات مختلفی برای بررسی افزایش و کاهش تبخیر آب مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲- مدل مدل حجم سیال

از روش چندفازی حجم سیال برای شبیه‌سازی استفاده شده است که معادلات مربوط به این روش در ادامه ارائه شده است. این معادلات شامل معادلات پیوستگی، مونتوم و انرژی می‌باشند. راه حل‌های عددی بر اساس روش حجم محدود برای جریان‌های چند فاز از یک جریان تک فاز دشوارتر می‌باشند. دلایل این مشکل این است که رابط‌های بین فازها دارای ویژگی‌های ثابت و فیزیکی مانند تراکم و تغییر ویسکوزیته در رابط‌های بین فازهای مختلف نیستند که این امر به یک تلاش محاسباتی فشرده نیاز دارد. از این رو روش حجم سیال^۱ برای حل این مشکلات با تعیین حرکت همه فازها و تعیین حرکت رابط‌ها بطور غیر مستقیم از این نتیجه استفاده می‌کند. روش (VOF) را می‌توان برای مدل‌سازی دو مایع با یک رابط کاملاً مشخص بین فازها استفاده کرد و برای ردیابی سطح استفاده شده بر روی مش ثابت استفاده می‌شود. در مدل (VOF)، یک مجموعه معادلات ناویر استوکس از طریق حوزه محاسباتی حل شده و برای تعیین حرکت

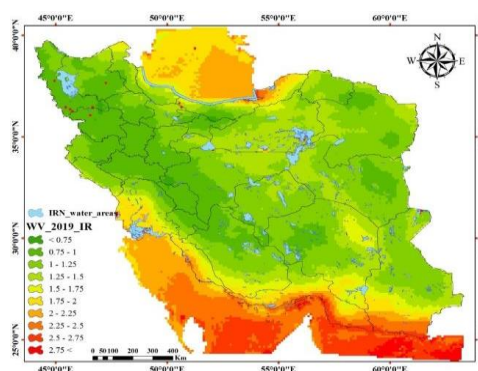
۱- مقدمه

افزایش گازهای گلخانه‌ای سبب افزایش دما و ایجاد تغییرات آب و هوایی در کره زمین شده است و شواهد نشان از ادامه‌دار بودن این افزایش دما در دهه‌های آتی است [۴-۱] یکی از نتایج گرم شدن کره زمین و تغییرات آب و هوایی افزایش تبخیر در آب‌های سطحی است که این امر می‌تواند سبب ایجاد یا تشدید بحران‌های آبی در برخی نقاط کره زمین شود [۵، ۶ و ۷] در واقع این تغییرات با ایجاد تأثیر منفی بر منابع آب منطقه و افزایش تبخیر آن می‌تواند سبب کاهش منابع آبی شده و امنیت آبی، امنیت غذایی، امنیت اجتماعی و امنیت ملی آن منطقه را دچار چالش کنند [۸ - ۹] در شکل شماره (۱) مناطقی که با کمبود آب شیرین روبرو هستند نشان داده شده است.



شکل (۱): نقشه کمبود آب شیرین در دنیا [۱۰]

تبخیر و تعرق به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل چرخه هیدرولوژیکی در واقع فرآیند انتقال آب از سطح زمین به جو است که به شکل‌های مختلفی از جمله سطح آزاد آب، سطح برف و یخ، خاک بدون پوشش گیاهی و سطوح گیاه رخ می‌دهد [۱۱-۱۲]. در شکل شماره (۲) میزان تبخیر و تعرق کشور ایران در سال ۲۰۱۹ میلادی نشان داده شده است که مشاهدات حاکی از تبخیر و تعرق بالای سالانه کشور ایران و اهمیت موضوع تبخیر است.



شکل (۲): نقشه تبخیر و تعرق کشور ایران در سال ۲۰۱۹ میلادی

^۱ Volume of Fluid (VOF)

CSFF

$$= LV\sigma\gamma \frac{L\alpha L\rho CV V\Delta\alpha + V\alpha V\rho CL L\Delta\alpha}{L\rho + V\rho} \quad (5)$$

که $L\sigma LV$ ضریب تنش سطح و C خمیدگی سطح است. با در نظر گرفتن نیروهای فوق، معادله مونتوم برای مدل VOF شکل زیر می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u^{\rightarrow}) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u^{\rightarrow} u^{\rightarrow}) & \quad (6) \\ = \rho g^{\rightarrow} - \nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla u^{\rightarrow} & \\ + \nabla u^{\rightarrow} \wedge T) - 2/3 \mu \nabla \cdot u] & \\ + FCSF & \end{aligned}$$

که در این رابطه g شتاب جاذبه است، p فشار است و I تنسور واحد. معادله مونتوم به خصوصیات فیزیکی چگالی و لزجت بستگی دارد. بنابراین، لزجت دینامیکی μ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu = \alpha_L \mu_L + (1 - \alpha_L) \mu_V \quad (7)$$

بنابراین، یک معادله مونتوم در کل حوزه محاسباتی حل می‌شود و سرعت محاسبه شده بین فازها به اشتراک گذاشته می‌شود.

۲-۳- معادله انرژی

معادله انرژی برای مدل VOF به شرح زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho e u^{\rightarrow}) = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + \nabla \cdot (\rho u^{\rightarrow}) \quad (8)$$

هدایت حرارتی بر مبنای متغیری با میانگین جرمی دما T به صورت زیر در مدل VOF ارائه می‌شود:

$$k = \alpha_L k_L + (1 - \alpha_L) k_V \quad (9)$$

مدل VOF همچنین از انرژی داخلی e به عنوان یک متغیر متوسط جرم بهره می‌برد:

$$e = \frac{\alpha_L \rho_L e_L + \alpha_V \rho_V e_V}{\alpha_L \rho_L + \alpha_V \rho_V} \quad (10)$$

که e_L و e_V براساس گرمای ویژه فاز و دمای مشترک با استفاده از معادله کالری حالت به دست آورده می‌شود:

$$e_L = C_{p,L}(T - T_{sat}) \quad (11)$$

$$e_V = C_{p,V}(T - T_{sat}) \quad (12)$$

یک معادله انرژی واحد برای هر فاز در سراسر دامنه حل می‌شود و دمای محاسبه شده بین فازها تقسیم می‌شود.

۲-۴- هندسه مسئله

در شبیه‌سازی بررسی ویژگی‌های سیال ضدتبخیر، ظرف و حجم آب واقعی استفاده‌شده در آزمایش تجربی، با مقیاس ۱۰:۱ مدل‌سازی شده است. هندسه ظرف با قطر مقطع ۱۰ cm و ارتفاع

فازهای مختلف با تعیین کسری از حجم هر مرحله استفاده می‌شود. مدل (VOF) به این واقعیت متکی است که هر سلول در دامنه توسط یک فاز یا ترکیبی از دو مرحله اشغال می‌شود. به عبارت دیگر، اگر $L\alpha$ کسری از حجم مایعات و $V\alpha$ کسری از حجم بخار است، سه شرط زیر امکان پذیر است:

$$\alpha_L = 1 \text{ سلول کاملاً توسط مایع اشغال می‌شود.}$$

$$\alpha_L = 0 \text{ سلول کاملاً توسط بخار اشغال می‌شود.}$$

α_L بین صفر و یک: سلول در رابط بین مراحل مایع و بخار قرار دارد.

هنگامی که شرط سوم رخ دهد، مجموع کسرهای حجم تمام فازها برابر با یک می‌شود.

۲-۱- معادله پیوستگی (معادله کسر حجمی)

با استفاده از اصل فیزیکی بقای جرم در مایعات، معادله پیوستگی (معادله کسر حجمی) به شکل زیر است

$$\nabla \cdot (\rho V) = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1)$$

جایی که ρ چگالی، u سرعت و t زمان است. برای ردیابی رابط بین فازها از راه حل معادله فوق برای کسر حجمی یکی از فازها استفاده می‌شود. بنابراین، معادله پیوستگی برای مرحله ثانویه (L) می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\nabla \cdot (\alpha_L \rho_L \vec{u}) = - \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_L \rho_L) \quad (2)$$

معادله پیوستگی نشان داده شده در بالا را می‌توان معادله کسر حجمی نامید. کسر حجمی فاز اولیه بر اساس محدودیت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sum (L = 1) \alpha_L = 0 \quad (3)$$

هنگامی که سلول به طور کامل توسط فاز اولیه (V) یا مرحله ثانویه (L) اشغال نشده باشد، مخلوطی از فازهای L و V وجود دارد. بنابراین، چگالی مخلوط (چگالی متوسط بر مبنای کسر حجمی) به شکل زیر ارائه می‌شود:

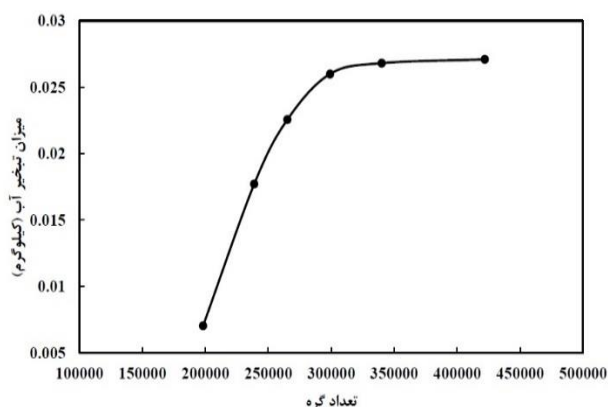
$$\rho = \alpha_L \rho_L + (1 - \alpha_L) \rho_V \quad (4)$$

۲-۲- معادله مونتوم برای مدل VOF

نیروهایی که بر روی سیال اثر دارند، گرانشی، فشار، اصطکاک و کشش سطحی در نظر گرفته می‌شوند. به منظور بررسی تأثیر تنش سطحی در طول رابط بین دو فاز، مدل نیروی سطح پیوسته (CSF) به معادله حرکت اضافه شده است:

مسئله، ۲۹۹۰۲۵ گره می‌باشند. همچنین، از نرخ رشد ۱/۲ برای حرکت شبکه از لایه مرزی به سمت وسط میدان حل استفاده شد.

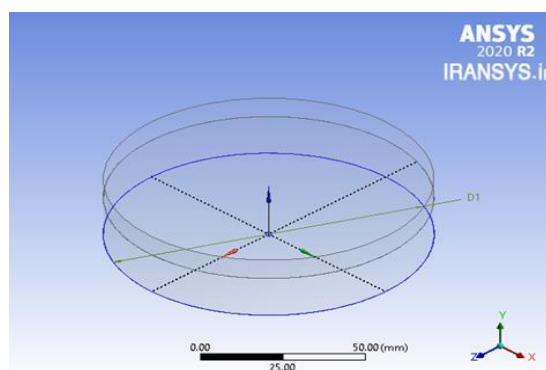
در جهت رسیدن به شبکه مناسب جهت حل میدان سیال، اندازه‌های مختلف شبکه و تعداد گره‌ها بررسی شد تا تعداد مطلوب گره و شبکه، حاصل شود. تعداد کمتر در مش‌گذاری، موجب حل غیردقیق و تعداد بیشتر و بدون ملاحظه بررسی‌هایی فنی و اقتصادی از آن موجب افزایش زمان محاسبات بدون افزایش محسوس در دقت خواهد شد. پارامتر میزان تبخیر آب در سناریو دوم در ۲۴ دقیقه جهت دستیابی به شبکه مناسب با نرخ کاهش طول سلول ۰/۵، مورد بررسی قرار گرفت. میزان گام زمانی در شبیه‌سازی به نحوی انجام شده است تا عدد بی‌بعد کورانت کمتر از یک باشد. شکل (۵)، نمودار استقلال نتایج حل از کیفیت شبکه را نمایش می‌دهد. با توجه به اختلاف ۳/۱۶ درصدی بین مقادیر میزان تبخیر آب در انواع مش‌گذاری نمونه‌های ۴ و ۵ و اختلاف ۱/۰۵٪ بین مقادیر میزان تبخیر آب در موارد شبیه‌سازی شده ۵ و ۶ با کیفیت‌های مندرج در جدول (۱)، انتخاب مورد چهارم، شبکه مطلوب با تعداد گره‌های مناسب همگام با استخراج نتایج مطلوب و منطبق با داده‌های آزمایشگاهی در روند احصاء مقدار تبخیر آب به (به میزان ۰/۲۵۹۹) انتخاب گردید.



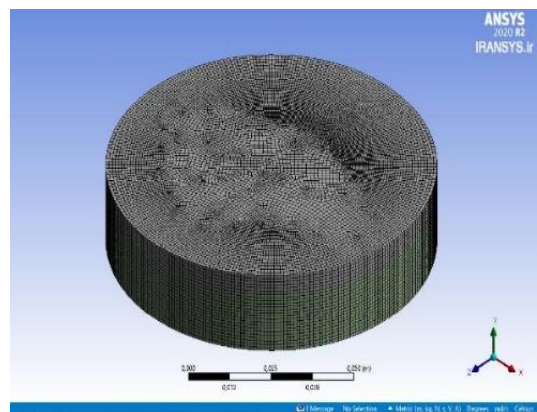
شکل (۵): نمایش عدم وابستگی نتایج حل از تعداد گره

جزئیات شش حالت بررسی‌شده، در جدول (۱) مشاهده می‌شود. در این جداول محدوده تبخیر آب به میزان ۰/۲۵۹۹kg مدنظر بوده و با توجه به زمان محاسبات (بررسی‌های اقتصادی محاسبات) قابل قبول در نظر گرفته شد. سایر بررسی‌های عددی بر مبنای شبیه‌سازی مورد شماره چهارم انجام شد که متعاقباً به تحلیل و تفسیر هر کدام پرداخته می‌شود.

در نرم‌افزار ANSYS دیزاین مدلر مطابق شکل زیر طراحی شد. این طراحی در دو سناریو مجزا به منظور بررسی ویژگی‌های سیال ضدتبخیر انجام گردید. در سناریو اول، ظرف حاوی آب در دمای استاندارد اولیه و درجه حرارت ۳۵ الی ۴۰ درجه سانتی‌گراد، در سه فاز (آب، بخار آب و هوا) در نظر گرفته شد. در سناریو دوم علاوه بر آب و ظرف، ماده الکلی به عنوان فاز چهارم با مقیاس ۱:۱۰ نمونه واقعی، به روی آب اضافه شده و طراحی مجدداً انجام گردید.



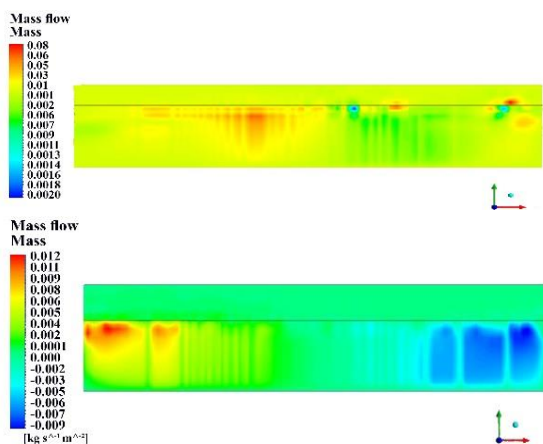
شکل (۳): مدل‌سازی چندفازی مسئله در سناریو اول شکل سمت راست و سناریو دوم شکل سمت چپ



شکل (۴): نمایی از نرم افزار ANSYS Meshing و تنظیمات شبکه ایجادشده

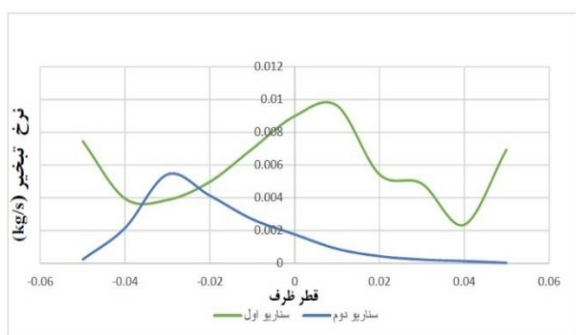
پس از مدل‌سازی هندسه مسئله، مدل به نرم‌افزار ANSYS meshing جهت اعمال شبکه‌بندی دامنه حل، هدایت و فراخوانی شد. در این پژوهش، از ترکیب شبکه‌بندی سازمان یافته در سطوح مهم (مانند سطوح مشترک و دیواره‌ها) و شبکه‌بندی بدون سازمان برای سایر نقاط به منظور دستیابی به شبکه‌ای با کیفیت مناسب و بهینه، استفاده شد. شکل (۴)، نمایی از شبکه‌بندی مسئله و تنظیمات مربوط به آن را نمایش می‌دهند. مطابق شکل (۴)، اندازه طول هر شبکه ۱mm و تعداد کل گره‌ها در

وجود محسوس فاز بخار در سناریوی اول شکل فوق در حالت شدت فروزندگی بالای تصویری (contrast)، در این حالت فاز بخار در هر دو سناریو به صورت اغراق آمیز استخراج شده تا تفاوت حجم فاز بخار برای مخاطب محسوس گردد. همچنین در شکل (۷)، تمایل کمتر انتقال جرم مولکولی جهت فرایند تبخیر در سناریوی دوم مشاهده می‌شود.



شکل (۷): کانتور انتقال جرم در حالت مولکولی جهت فرایند تبخیر در سناریو اول و سناریو دوم

با توجه به شکل (۷) میانگین فلاکس انتقال جرم صورت گرفته در تبخیر سطحی سناریو اول از میزان انتقال جرم سناریو دوم بسیار بیشتر است در نتیجه کاهش فلاکس جرمی سناریو دوم می‌تواند حاصل از افزایش کشش سطحی و کاهش میزان حرارت ورودی به مولکول‌های سطحی آب باشد.



شکل (۸): کمیت عددی نرخ محلی تبخیر (s/kg) به ازای واحد حجم سیال (m³)

وقتی که مقداری از سیالی را با چگالی کمتر بر روی یک سیالی دیگر با چگالی بیشتر ریخته می‌شود طبیعتاً سیال با چگالی کمتر روی سطح سیال با چگالی بیشتر می‌ماند حال هرچه میزان غلظت سیال با چگالی کمتر بیشتر باشد در نتیجه ضخامت سیال بر روی سیال چگالتز بیشتر می‌شود. نرخ تبخیر بر روی سطح آب

جدول (۱): مشخصات شبیه سازی

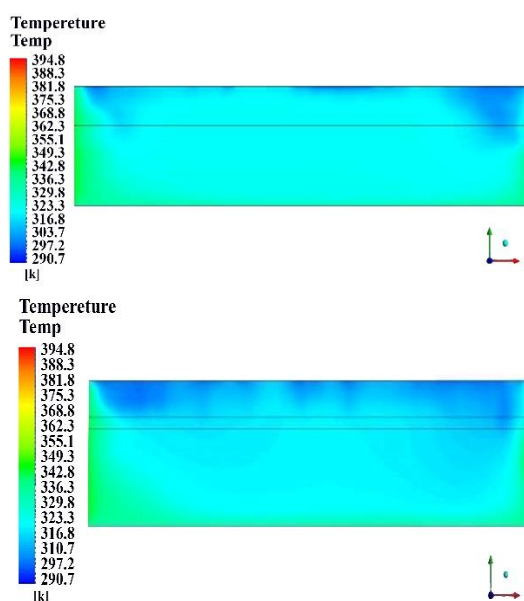
ردیف	طول هر شبکه (mm)	تعداد گره	مقدار تبخیر آب (kg)
۱	۸	۱۹۸۲۱۵	۰/۰۰۷۰۱
۲	۴	۲۳۸۸۹۲	۰/۰۱۷۷۱
۳	۲	۲۶۵۲۴۵	۰/۰۲۲۵۶
۴	۱	۲۹۹۰۲۵	۰/۰۲۵۹۹
۵	۰/۵	۳۴۰۰۷۸	۰/۰۲۶۸۱
۶	۰/۲۵	۴۲۱۹۸۲	۰/۰۲۷۰۹

۳- روش آزمایش

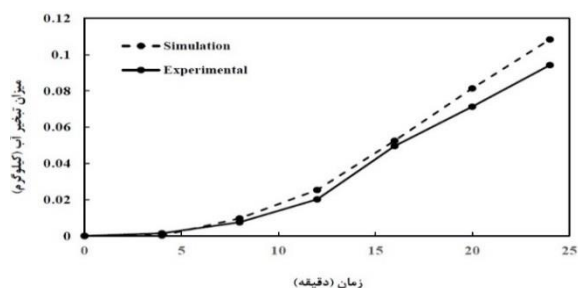
با هدف ارزیابی کارایی سیال ضد تبخیر هگزادکانول، طی ۱۶ روز مطابق استانداردهای جهانی با استفاده از تشت تبخیر کلاس A و با اندازه‌گیری شرایط محیطی مانند: دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و میزان تبخیر، داده‌های آب شاهد و آب حاوی سیال ضد تبخیر ثبت و مقایسه شدند.

۴- نتایج

در شکل (۶) کانتور توزیع دما در دو سناریو نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که توزیع دما در دو سناریو مختلف متفاوت می‌باشد. این توزیع دما به علت اختلاف دمای آب و هوا ایجاد شده‌اند. مشاهده می‌شود که در قسمت دیواره‌های ظرف در دو سناریو، بدلیل جنس دیواره‌های ظرف دما بالاتر از مرکز ظرف می‌باشد.

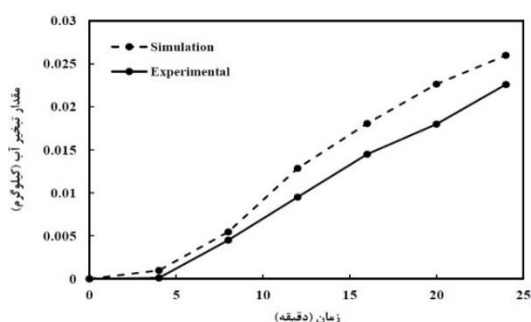


شکل (۶): کانتور ۱ نهایی دما در سناریو اول (تصویر الف) و سناریو دوم (تصویر ب)



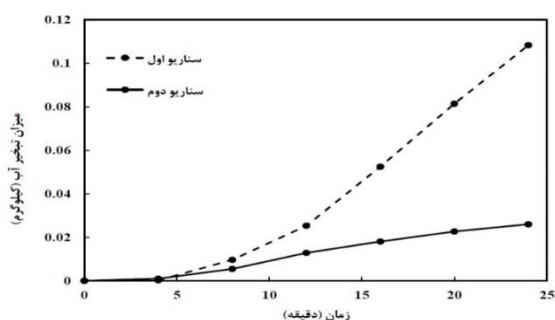
شکل (۱۰): مقایسه تطبیقی نتایج تجربی و عددی میزان تبخیر آب برحسب زمان در سناریو اول (بدون وجود ماده الکلی)

اختلاف ۱۲ درصدی میزان تبخیر در سناریو اول بین نتایج عددی (۰/۱۰۸۲۹ کیلوگرم آب) و تجربی (۰/۰۹۴۱۵ کیلوگرم آب) پس از مدت زمان ۲۴ دقیقه، نشان از دقت قابل قبول محاسبات دارد.



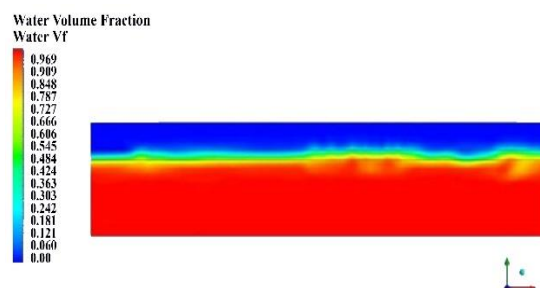
شکل (۱۱): نمودار مقایسه نتایج تجربی و عددی میزان تبخیر آب برحسب زمان در سناریو دوم (وجود ماده الکلی)

اختلاف ۱۳ درصدی میزان تبخیر در سناریوی دوم بین نتایج عددی (۰/۰۲۵۹۹ کیلوگرم آب) و تجربی (۰/۰۲۲۶۱ کیلوگرم آب)، پس از مدت زمان ۲۴ دقیقه نشان از دقت قابل قبول محاسبات دارد. لازم به ذکر است که نرخ تبخیر تست آزمایشگاهی به صورت میانگین برای یک روز و بدیهی است که میزان تبخیر در ساعت‌های مختلف با توجه به میزان تابش خورشید و اثر آن روی دمای آب متفاوت می‌باشد. با این حال می‌توان نتیجه‌گیری نمودار و جدول نتایج بدست آمده روش عددی مورد استفاده دقت قابل قبولی داشته است.



شکل (۱۲): نمودار مقایسه نتایج عددی میزان تبخیر آب برحسب زمان سناریو اول و دوم

تابع موقعیت می‌باشد، به این منظور در شکل (۹) توزیع نرخ تبخیر روی سطح آب نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در سناریو اول بدلیل نبود سیال ضد تبخیر تقریباً وسط ظرف به علت در تماس بیشتر با جریان هوا تبخیر بیشتری داشته دارد. ولی در سناریو دوم در گوشه سمت چپ ظرف تبخیر بالاتری دارد که نشان‌دهنده کاهش غلظت سیال ضد تبخیر در قسمت سمت چپ ظرف می‌باشد. علت جمع شدن سیال در گوشه ظرف این است که جریان هوا از سمت چپ ظرف به سمت راست بیشتر بوده و غلظت سیال ضد تبخیر در سمت راست ظرف بیشتر شده است به همین دلیل در سناریو دوم به دلیل غلظت بالای سیال ضد تبخیر در کنار دیواره‌های ظرف و در نتیجه کاهش چشمگیر تبخیر سطحی نشان‌دهنده عملکرد مناسب سیال ضد تبخیر می‌باشد. در این صورت می‌توان نتیجه‌گیری کرد در مخازن روباز وجود دیواره در زمان استفاده از سیال ضد تبخیر باعث کاهش تبخیر می‌شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود، مخازن روباز بهتر است پر از آب نباشند البته ابعاد مخزن می‌تواند بر روی اثر کاهشی دیواره‌ها تأثیرگذار باشد.



شکل (۹): کانتور نوسانات سطحی آب در سناریو دوم

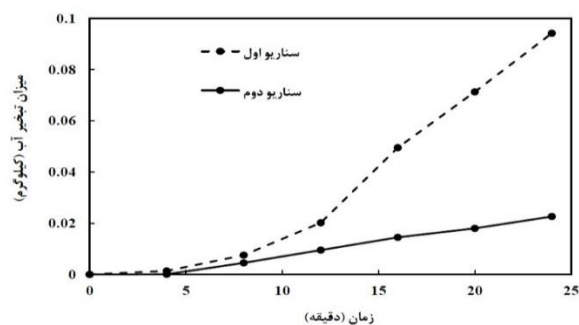
در نتیجه کلی وجود فاز چهارم در سناریو دوم، موجب کاهش نوسانات سطحی آب در اثر سرعت باد، تکان خوردن تشت تبخیر و ... شده و همچنین میزان تبخیر را به مراتب کاهش می‌دهد. با استفاده از ترسیم Line و Plane در فصول مشترک مشخص شده در اشکال بالا، نمودار میزان تبخیر آب از تشت در مدت زمان ۲۴ دقیقه و شرایط دمایی ۳۵ الی ۴۰ درجه سانتی‌گراد، رطوبت ۱۵ الی ۲۰ درصد و سرعت باد معمول، قابل استخراج می‌باشد. با توجه به این که در نمونه واقعی تشت تبخیر، پس از ۲۴ دقیقه، حدود ۰/۲۳ میلی‌متر کاهش ارتفاع داشته است، با بهره‌گیری از رابطه چگالی، می‌توان نتیجه گرفت که حدود ۰/۲۲۶۱ کیلوگرم از آب تبدیل به بخار شده است که با مقیاس ۱:۱۰ فرض شده در مسأله، ۰/۰۲۲۶۱ کیلوگرم آب از ظرف تبخیر می‌شود.

بخار آب نیز مؤید کاهش محسوس تبخیر در حضور لایه پوششی می‌باشد. در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌گیری از سیالات ضدتبخیر، به‌ویژه نانوسیالاتی با خواص فیزیکی و شیمیایی مناسب، می‌تواند راهکاری مؤثر و اقتصادی برای کاهش تلفات تبخیر از منابع آب سطحی باشد و در مدیریت منابع آب در اقلیم‌های خشک نقش بسزایی ایفا نماید.

۶- مراجع

- [1] M. New, M. Todd, M. Hulme, and P. Jones, "Precipitation measurements and trends in the 20th century," *Int. J. Climatol.*, vol. 21, no. 15, pp. 1889–1922, 2001.
- [2] M. L. Roderick and G. D. Farquhar, "The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years," *Science*, vol. 298, pp. 1410–1411, 2002.
- [3] P. D. Jones and A. Moberg, "Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001," *J. Climate*, vol. 16, no. 2, pp. 206–223, 2003.
- [4] E. Y. Yildirim, M. Turkes, and M. Tekiner, "Time series analysis of long term variations in stream flow data of some stream flow stations over the Gediz basin and in precipitation of the Akhisar station," *Pakistan J. Biol. Sci.*, vol. 7, pp. 17–24, 2004.
- [5] S. Z. Kang, "Towards water and food security in China," *Chin. J. Eco Agric.*, vol. 22, pp. 880–885, 2014 (in Chinese).
- [6] P. H. Gleick, "Climate change, hydrology, and water resources," *Rev. Geophys.*, vol. 27, no. 3, pp. 329–344, 1989.
- [7] International Groundwater Resources Assessment Center, "Groundwater Stress," 2020. [Online]. Available: <https://www.un-igrac.org>
- [8] B. S. Limjirakan and A. Limsakul, "Trends in Thailand pan evaporation from 1970 to 2007," *Atmos. Res.*, vol. 108, pp. 122–127, 2012.
- [9] C. W. Thornthwaite, "An approach toward a rational classification of climate," *Geogr. Rev.*, vol. 38, no. 1, pp. 55–94, 1948.
- [10] X. Yao, H. Zhang, Ch. Lemckert, A. Brook, and P. Schouten, *Evaporation reduction by suspended and floating covers: Overview, modelling and efficiency*, Urban Water Security Research Alliance Technical Report, Australia, 2010.
- [11] M. Coleman, *Review and Discussion on the Evaporation Rate of Brines*, Mundijong, 2000, pp. 1–12.
- [12] H. Ali, C. A. Madramootoo, and S. Abdel Gwad, "Evaporation model of Lake Qaroun as influenced by lake salinity," *Irrig. Drain.*, vol. 50, pp. 9–17, 2001.
- [13] G. L. Gaines, *Insoluble Monolayers at Liquid-Gas Interfaces*, New York: Interscience Publishers, 1966.
- [14] G. T. Barnes and I. R. Gentle, *Interfacial Science: An Introduction*, Oxford: Oxford Univ. Press, 2005.
- [15] J. Zahiri and M. Karim Zadeh, "Evaporation suppression from the water surface using monolayers," *Irrigation and Water Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 268–284, 2023.
- [16] G. T. Barnes, "The potential for monolayers to reduce the evaporation of water from large water storages," *Agric. Water Manag.*, vol. 95, no. 4, pp. 339–353, 2008.
- [17] M. A. Herzig, G. T. Barnes, and I. R. Gentle, "Improved spreading rates for monolayers applied as emulsions to reduce water evaporation," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 357, no. 1, pp. 239–242, 2011.
- [18] E. L. Prime et al., "Rational design of monolayers for improved water evaporation mitigation," *Colloids Surf. A*, vol. 415, pp. 47–58, 2012.

تأثیر ۷۶ درصدی در کاهش تبخیر به علت وجود ماده الکلی پس از ۲۴ دقیقه حاصل از نتایج شبیه‌سازی، در نمودار مشهود می‌باشد. نکته دیگر قابل تأمل اثر بخشی هرچه بیشتر ماده الکلی در گذر زمان می‌باشد. در بررسی ۲۴ دقیقه‌ای این پژوهش، مشاهده می‌شود تا زمان دقیقه ۱۰ تأثیر کمتر از ۲۰ درصدی از وجود ماده الکلی حاصل شده است. اما این اثربخشی باگذشت زمان به ۷۶ درصد رسیده است. نتایج حاکی از آن است که این اثر بخشی می‌تواند به ۸۵ درصد بعد از گذشت ۴ ساعت برسد.



شکل (۱۳): نمودار مقایسه نتایج تجربی میزان تبخیر آب برحسب زمان سناریو اول و دوم

باتوجه به نتایج تجربی تأیید اثربخشی ۷۶ درصدی در کاهش تبخیر به علت وجود ماده الکلی پس از ۲۴ دقیقه مورد تأیید می‌باشد.

۵- جمع بندی و نتیجه‌گیری

تبخیر سطحی یکی از عوامل اصلی از دست رفتن منابع آبی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. یافته‌های این پژوهش نشان داد که استفاده از سیالات پوششی مانند هگزادکانول می‌تواند نقش مؤثری در کاهش تبخیر آب ایفا کند. مکانیزم عملکرد این سیالات عمدتاً به ایجاد یک سد فیزیکی در برابر فرار بخار آب و افزایش فشار سطحی تعادلی مربوط می‌شود. نتایج شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل چندفازی VOF در نرم‌افزار فلونت، همسو با داده‌های تجربی، نشان از دقت مناسب مدل عددی دارد؛ به‌طوری‌که اختلاف میان نتایج عددی و تجربی در حدود ۱۳٪ گزارش شد. در تحلیل‌های عددی و تجربی، میزان کاهش تبخیر در حضور سیال پوششی تا بیش از ۷۶٪ برآورد شد که بیانگر اثربخشی بالای این روش است. همچنین، پارامتر کشش سطحی به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر بر نرخ تبخیر شناسایی شد که تأثیر معکوس آن در فرآیند تبخیر به‌وضوح مشاهده گردید. بررسی کانتورهای دما و کسر حجمی