

مدل سازی فرایند تبخیر سطحی آب در سد های آبی با استفاده از CFD (مطالعه موردی سد امیر کبیر کرج)

فرزانه بابایی گورچین لو

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

افشار علی حسینی*⁺

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

چکیده: استفاده بهینه از منابع آب موجود به علت هزینه‌های بالای تأمین آب ناشی از افزایش جمعیت و مسئله گرم شدن کره ی زمین ضروری می‌باشد. پژوهشگران حوزه محیط زیست بر این ادعا هستند که سدسازی به علت محبوس کردن آب در پشت سدها نه تنها کمکی برای غلبه بر کمبود آب نکرده است بلکه عاملی تشدید کننده در جهت سرعت خشکسالی می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از CFD پدیده تبخیر سطحی از سد امیر کبیر به عنوان مطالعه موردی در طول یکسال آبی مورد مطالعه قرار گرفت. برای مدل سازی از قانون‌های حاکم در پدیده انتقال، معادله‌های ناوراستوکس و مدل VOF استفاده شد. در گام‌های زمانی ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۱ ثانیه و در ضخامت لایه مرزی از ۰/۰۱ تا ۰/۰۶ متر پارامترهای تأثیرگذار در تبخیر سطحی مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های به دست آمده از مدل محاسباتی شامل اثر دما، شار گرمایی، نرخ انتقال جرم در فصل مشترک گاز-مایع، سرعت باد، میزان کل آب تبخیر شده (روزانه؛ ماهانه؛ سالانه) در سامانه مکعبی به دست آمد. داده‌های تولید شده شبیه‌سازی از روش CFD با داده‌های تجربی به دست آمده از سد کرج مورد مقایسه قرار گرفت که همپوشانی مناسبی بین آن‌ها دیده می‌شود. همچنین پروفیل دما و نرخ انتقال جرم در سطح آب مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های به دست آمده از شبیه سازی نشان می‌دهد که تبخیر سطحی عامل تأثیر گذاری برای کاهش ارتفاع سد و حجم آب ذخیره شده در دریاچه پشت سد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر سطحی؛ سدهای آبی؛ پدیده‌های انتقال؛ CFD.

KEYWORDS: Surface evaporation; Hydro dams; Transport phenomena; CFD.

مقدمه

آب ذخیره شده در دریاچه‌ها، سدها و مخازن برای مصرف‌های آبیاری و خانگی توسط تبخیر در طی ماه‌های فصل تابستان محسوس و چالش برانگیز است [۱]. با شناسایی عامل‌های مؤثر

استفاده بهینه از منابع آب موجود به علت هزینه‌های بالای تأمین آن ناشی از افزایش جمعیت و مسئله گرم شدن کره ی زمین ضروری به نظر می‌رسد. مشکل ایجاد شده توسط تلفات

*E-mail: afshar.alihosseini@iauctb.ac.ir

*عهده دار مکاتبات

مورد مطالعه بررسی شد؛ سپس نتیجه‌های به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت [۱۰].

معادله‌های حاکم بر جریان سیال

معادله‌های حاکم بر سیال بیانگر قانون‌های فیزیکی بقا به صورت عبارت‌های ریاضی می‌باشد. برای تحلیل جریان سیال در مقیاس میکروسکوپی در جهت طول ممکن است ساختار مولکولی مواد و حرکت مولکولی نادیده گرفته شود. در اینجا رفتار سیال در قالب عبارت‌های بیان کننده ویژگی‌های ماکروسکوپی مانند سرعت، فشار، چگالی، درجه حرارت و مشتق‌های زمانی و مکانی آنها بررسی و توصیف می‌شود [۱۱].

معادله پیوستگی

معادله‌ای که بقای جرم را برای یک المان (حجم کنترل) در سه بعد تأمین کند، در حالت کلی به صورت زیر به دست می‌آید [۱۲]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

برای سیال‌های تراکم‌ناپذیر چگالی ثابت است و معادله به شکل زیر ساده می‌شود:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2)$$

معادله‌های اندازه حرکت

برای تأمین بقای اندازه حرکت در المان، قانون دوم نیوتن بر روی آن اعمال می‌شود. نمایش نیروهای سطحی به صورت جمله‌های جداگانه در معادله اندازه حرکت بیان می‌شوند، برای نشان دادن نقش آنها و وارد کردن اثرهای نیروهای بدنه به صورت عبارت‌های چشمه، امر رایجی است. معادله کلی اندازه حرکت به صورت زیر بیان می‌شود [۱۳]:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{V}) + \nabla \cdot (\mathbf{V}\mathbf{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M \quad (3)$$

$$\mathbf{S}_M = (S_{Mx}, S_{My}, S_{Mz})$$

عبارت چشمه فقط ناشی از نیروهای بدنه در نظر گرفته شده است. برای مثال نیروی بدنه ناشی از گرانش با استفاده از $\mathbf{S}_M = (0, 0, -\rho g)$ ، مدل می‌شود. برای سیال‌های لزج مدل نیوتن تنش به صورت معادله شاخص زیر بیان می‌شود:

بر میزان تبخیر آب از سطح آزاد سدهای آبی می‌توان راه‌های کاهش تبخیر سطحی آب و سرانجام صرفه جویی آن را پیشنهاد نمود. مطالعه‌های اولیه به صورت تجربی از نرخ تبخیر سطحی آب توسط دالتون در سال ۱۸۰۰ میلادی آغاز شد. به دلیل فراوانی معادله‌ها که به طور عموم به صورت تجربی بودند. نتیجه‌هایی پیشنهاد شد که ممکن بود برای تخمین یک معادله عمومی و کاربردی برای تبخیر نامناسب بوده و خطای انتقال گرمای به دست آمده از این معادله‌ها از سطح آزاد آب به دلیل فرایند تبخیر با نتیجه‌های تجربی به دست آمده بیش از ۵۰ درصد باشد [۲] درحالی‌که دقت در بسیاری از فرایندها دارای اهمیت می‌باشد اما در معادله‌های تجربی این دقت اعمال نشده است. به عبارت دیگر، نتیجه‌های نظری تطابق مناسبی با نتیجه‌های تجربی نداشت. بنابراین در بسیاری از نقاط دنیا پژوهش‌های گسترده و طولانی مدتی در این زمینه انجام پذیرفت [۳-۶]. با توجه به این که ساخت مجموعه‌ای که بتواند یک فرایند حقیقی را به طور کامل شبیه‌سازی کند، حتی در مقیاس کوچک، پرهزینه و وقت گیر است و افزون بر آن بسیاری از فرایندها را نمی‌توان به طور کامل نظری یا تجربی مورد مطالعه قرار داد. بنابراین ایده استفاده از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری برای آموزش در علوم مهندسی مورد توجه قرار گرفته است. امروزه علم دینامیک سیال‌های محاسباتی (CFD) به صورت یک ابزار پر قدرت و توانا برای تحلیل رفتار جریان سیال و پدیده‌های همراه در سامانه‌های با هندسه ناموزون و معادله‌های پیچیده برای پژوهشگران و مهندسين درآمده است. پژوهشگران حوزه شبیه‌سازی پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه دینامیک سیال‌های محاسباتی انجام داده‌اند. جوزانی و همکاران در تحلیل هیدرودینامیکی سانتریفوژهای گازی معادله‌های ناویر استوکس و مدل اغتشاش $k-\epsilon$ را در روش شبیه سازی CFD را مورد استفاده قرار داده‌اند. دینامیک سیال‌های محاسباتی دو تخمین مهم یعنی اولرین-اولرین و اولرین - لاگرانژین را مورد استفاده قرار می‌دهد [۷-۹]. در مطالعه حاضر با توجه با اقلیم منطقه کرج و نرخ بالای استفاده کنندگان آب به دلیل جمعیت بالا و محدودیت منابع آب در استان‌های تهران و البرز مدل سازی فرایند تبخیر سطحی آب در سد آبی امیرکبیر کرج با استفاده از روش CFD مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس از معادله‌های حاکم: گرما، جرم و مومنتوم استفاده شد و اثر پارامترهای تأثیر گذار مانند سرعت باد، دما و ظرفیت گرمایی در فرایند تبخیر سطحی آب در دامنه زمانی

با استفاده از شکل نیوتنی تنش های لزج در معادله انرژی داخلی معادله زیر به دست می آید.

$$\rho \frac{DU}{Dt} = -P\nabla \cdot \mathbf{V} + \nabla \cdot (k\nabla T) + \phi + S_U \quad (10)$$

اثرهای ناشی از تنش های لزج در معادله بالا با معادله استهلاک (ϕ) توصیف می شود که مطابق معادله زیر بیان می شود.

$$\phi = \mu \left\{ \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (11)$$

تابع استهلاک یک عبارت مثبت است که به صورت چشمه هایی از انرژی داخلی ناشی از کار تغییر شکل روی ذره سیال نشان داده شده است.

مدل CFD

استفاده از شبیه سازی CFD ابزار جدیدی برای پیش بینی دینامیک سیال و پدیده های انتقال فرایندهای پیچیده می باشد، به ویژه در مورد هایی که پیش بینی رفتار جریان به وسیله فناوری های آزمایشگاهی مشکل و پرهزینه باشد. در این پژوهش به مطالعه جریان هوا، انتقال انرژی و انتقال جرم بین دو فاز مایع - گاز در فرایند تبخیر سطحی پرداخته شده است. همان گونه که در بخش پیش گفته شد معادله های حاکم از جمله پیوستگی، اندازه حرکت، و انرژی در المان مکعبی مورد نظر ارایه می شود. با توجه به قدرتمندی، اقتصادی بودن محاسبه ها و داشتن دقت قابل مدل $k-\epsilon$ در بازه وسیعی از جریان برای تشریح آشفستگی و ویژگی های آن توسط جریان متوسط و نفوذ که روی عملکردهایی که بر روی انرژی جنبشی اثر می گذارد، از این مدل برای شناسایی ویژگی های جریان استفاده شد. مدل استاندارد معادله های انتقال برای $k-\epsilon$ به کار برده شده به صورت زیر استفاده شد [۱۷]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \bar{\mathbf{V}}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right] + \gamma \mu_1 E_{ij} : E_{ij} + \rho \epsilon \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \epsilon \bar{\mathbf{V}}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right] + \quad (13)$$

$$C_{\epsilon k} \frac{\epsilon}{k} \gamma \mu_1 E_{ij} : E_{ij} + C_{\epsilon \epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$\tau_{ij} = \gamma \mu \gamma_{ij} + \lambda \nabla \cdot \mathbf{V} \delta_{ij} \quad (4)$$

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{\rho} (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}')$$

در این معادله δ_{ij} دلتای کرانک یا تانسور واحد و λ ، گرانیوی ثانویه است. اطلاعات زیادی درباره گرانیوی ثانویه در دست نیست. برای این که در عمل خیلی کوچک است. برای گازها یک تقریب خوبی را می توان با قرار دادن $\lambda = -2/3 \mu$ به دست آورد. با جایگذاری تنش های برشی بالا (۴) در معادله کلی اندازه حرکت (۳)، معادله های مشهور ناویر - استوکس به دست می آید.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\gamma \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \nabla \cdot \mathbf{V} \right] + \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_{Mx}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\gamma \mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \nabla \cdot \mathbf{V} \right] + \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_{Mx}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\gamma \mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \nabla \cdot \mathbf{V} \right] + \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_{Mx}$$

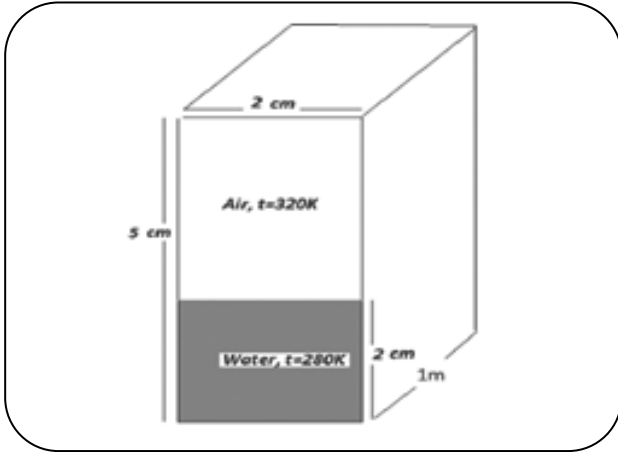
معادله انرژی

قانون اول ترمودینامیک بیان کننده معادله انرژی است که در آن نرخ تغییر انرژی سیال برابر است با نرخ گرمای اضافه شده به ذره سیال به علاوه نرخ کار انجام شده بر روی آن و به صورت زیر ارایه می شود [۱۴]:

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\nabla \cdot (P\mathbf{V}) + \nabla \cdot (\tau \cdot \mathbf{V}) + \nabla \cdot (k\nabla T) + S_E \quad (8)$$

که در این معادله $E = U + 1/2(u^2 + v^2 + w^2)$ است. اگرچه معادله (۸) در حالت کلی معادله انرژی کاملی است، اما معمول است که از تغییر انرژی جنبشی برای به دست آوردن معادله انرژی داخلی یا گرما استفاده شود. با کم کردن معادله انرژی مکانیکی از معادله کلی انرژی، شکل مفیدتری از معادله انرژی به دست می آید [۱۵-۱۶]:

$$\rho \frac{DU}{Dt} = -P\nabla \cdot \mathbf{V} + \nabla \cdot (k\nabla T) + \tau \cdot (\nabla \mathbf{V}) + S_U \quad (9)$$



شکل ۱- بازه محاسباتی و شرایط مرزی پدیده ی تبخیر سطحی آب.

همان گونه که دیده می شود توده آب در کمترین دما (۲۸۰ کلوین) و سطح مشترک در بیشترین دما ممکن (۳۲۰ کلوین) قرار دارد. شکل ۳ تغییر دمایی بر حسب موقعیت مکانی مرز مشترک را نشان می دهد. مطابق شکل لایه مرزی در ضخامت حدود ۴ سانتی متر به حالت پایا می رسد و این بدان معنا است که در فاصله ۱ تا ۵ سانتی متر تغییر دمایی از توده آب (۲۸۰ کلوین) آغاز و در دمای ۳۰۸ کلوین در موقعیت مکانی ۵ سانتی متر به حالت پایا می رسد.

شار گرمایی

همواره به دلیل اختلاف دمای موجود، پدیده ی تبخیر سطحی به شکل تغییر جرم از فاز مایع به فاز گاز صورت می گیرد. شکل ۴ میزان شار گرمایی نسبت به سطح مرز مشترک را نمایش می دهد. مطابق شکل پیش، از مکان ۰/۰۰۹ متر (نقطه آغاز فصل مشترک) هیچ گونه تبادل گرما و در نتیجه انتقال جرم وجود نداشته و از شروع فصل مشترک انتقال گرما صورت گرفته و رفته رفته افزایش می یابد.

نرخ انتقال جرم

شکل های ۵ - الف و ۵ - ب شار انتقال جرم در گام زمانی ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۰۱ ثانیه را نشان می دهند. با نزدیک شدن به میانه های مرز مشترک نرخ انتقال جرم افزایش و هنگام رسیدن به توده سیال از میزان انتقال جرم کاسته شده و با رسیدن به توده گاز خالص هیچ انتقال جرمی صورت نمی گیرد.

معادله ها شامل پنج ثابت قابل تنظیم هستند همچنین $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k}{\varepsilon}$ مدل استاندارد k-ε مقادیر زیر را برای ثابت هایی که در یک بازه وسیع جریان های آشفته وارد می شوند، به کار می برد [۱۸]:

$$C_\mu = 0.09; C_{\varepsilon_1} = 1.44; C_{\varepsilon_2} = 1.92; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3$$

مدل استفاده شده؛ مدلی دو فاز شامل جریان گاز - مایع از نوع جریان با سطح آزاد است که جریان سطح آزاد شامل جریان دو سیال امتزاج ناپذیر است که با مرزهای مشخص از یکدیگر جدا شده اند. از مدل های رایج برای جریان های دو فاز می توان به روش اولرین - لاگرانژی و اولرین - اولرین اشاره کرد. مدل مورد نظر در این پژوهش اولرین - اولرین و از دسته مدل حجم سیال (VOF) (۱) می باشد. مدل VOF، یک تکنیک شبکه ثابت برای مدل سازی دو سیال امتزاج ناپذیر در صورت مدنظر بودن محاسبه دقیق مرزها است. کاربرد این مدل در جریان های با سطح آزاد، پاشش سیال ها استفاده می شود. تقابل بین فازها در این مدل از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده و مجموعه ای از معادله های مونتوم سیال ها و جزء حجمی هر یک از فازها محاسبه می شود. با توجه به مشخص بودن کسر حجمی هر یک از فازها در المان، متغیرها و ویژگی های جریان در هر المان بر اساس کسر حجمی فازها مشخص می شود [۱۹].

شرایط مرزی

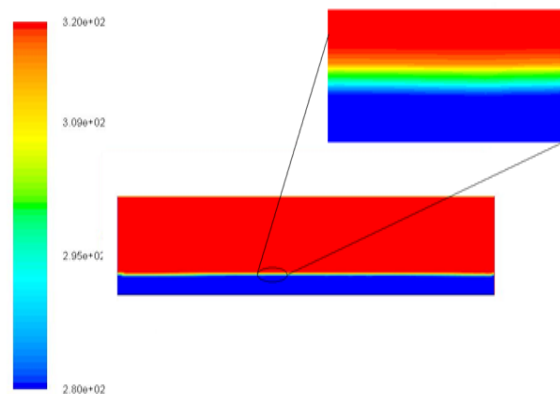
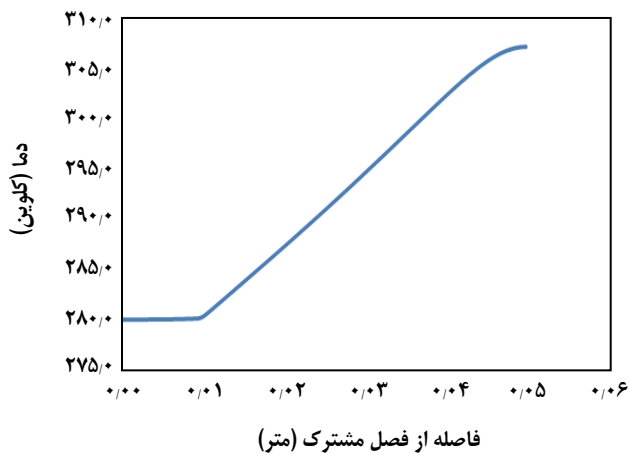
پدیده ی تبخیر سطحی آب در یک المان مکعبی با بازه ی محاسباتی مطابق شکل ۱ مورد بررسی قرار گرفت. در این مدل سازی یک المان ۲ سانتی متری در عمق ۱۰۰ سانتی متری (یک متر) از آب در نظر گرفته شد. با توجه به اقلیم منطقه کرج که دمای منطقه در فصل زمستان و تابستان بین ۳°C و ۴۲°C تغییر می کند؛ دمای توده آب ۲۸۰ کلوین و دمای محیط ۳۲۰ کلوین انتخاب شد. شبکه بندی هندسه با استفاده از نرم افزار Ansys Fluent 14.5 به صورت دو بعدی با مش کاملاً منظم برای این سامانه انتخاب شده است.

نتیجه ها و بحث

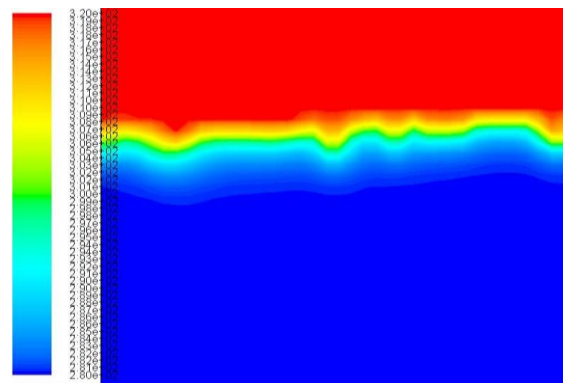
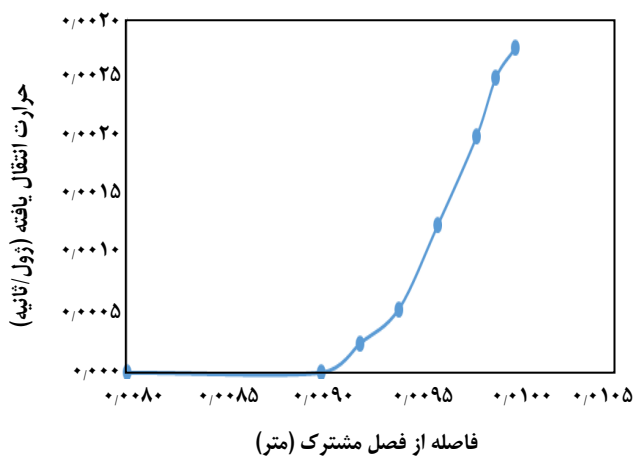
پروفیل دما

شکل های ۲ - الف، ب و ج کانتورهای دما در حالت ایستا در گام های زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه و ۰/۰۰۰۱ ثانیه را نمایش می دهد.

(۱) Volume Of Fluid method

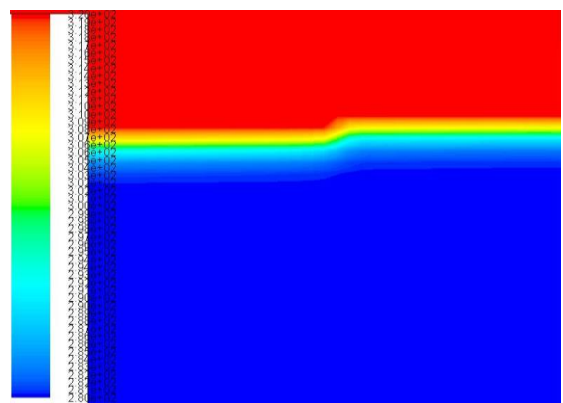


شکل ۳- تغییرهای دما نسبت به موقعیت مکانی مرز مشترک.



شکل ۴- تغییر شار گرمایی نسبت به موقعیت مکانی مرز مشترک.

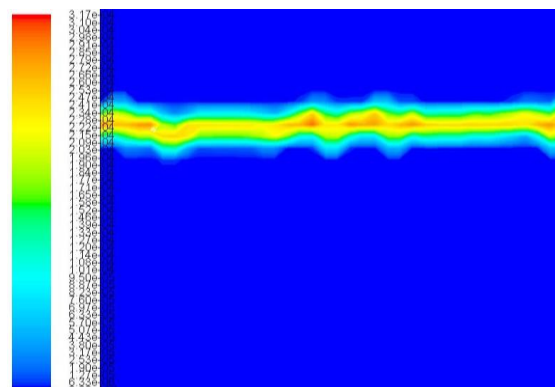
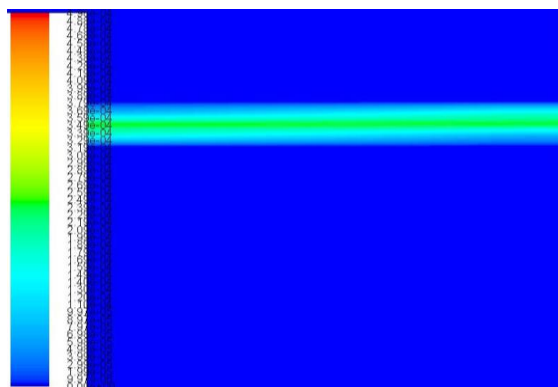
نرخ انتقال جرم در مرز مشترک توسط شکل های ۶ و ۷ نمایش داده شده است. همان گونه که شکل ۶ نشان می دهد، پیش از مکان ۰/۰۱ متر (نقطه آغاز فصل مشترک) هیچ گونه انتقال جرمی وجود نداشته؛ انتقال جرم از شروع فصل مشترک صورت گرفته و رفته رفته افزایش می یابد. افزون بر آن شکل ۷ نشان می دهد با دور شدن از فصل مشترک انتقال جرم آب کاهش یافته و زمانی که به توده سیال (هوا) برسیم هیچ انتقال جرمی صورت نگرفته و در واقع نرخ انتقال جرم پس از فصل مشترک صفر می باشد.



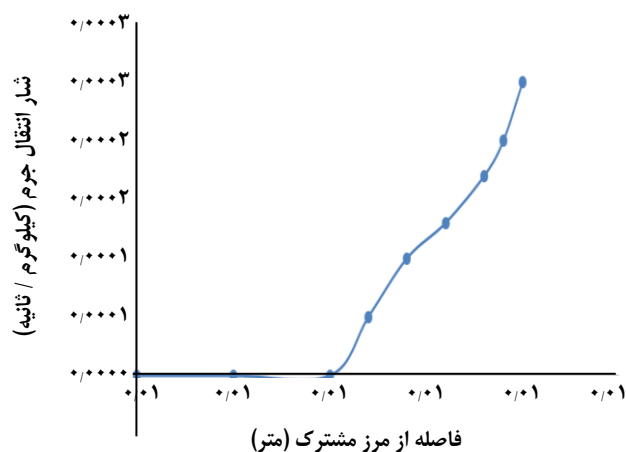
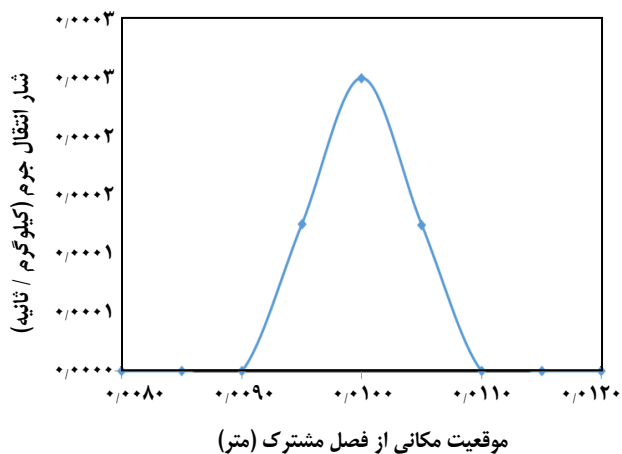
کسر حجمی

شکل های ۸ - الف و ۸ - ب میزان کسر حجمی آب در گام های زمانی ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱ ثانیه را نشان می دهند. همان گونه که

شکل ۲- الف) کانتور ایستای دما در فصل مشترک هوا - آب، ب) کانتور دما در فصل مشترک در گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه، ج) کانتور دما در فصل مشترک گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه.



شکل ۵ - الف) نرخ انتقال جرم در گام زمانی ۰/۰۰۰۱ ثانیه، ب) نرخ انتقال جرم در گام زمانی ۰/۰۰۰۱ ثانیه.



شکل ۶ - نرخ انتقال جرم آب بر حسب طول فصل مشترک و ناحیه خارج از آن به محیط هوا.

شکل ۷ - نرخ انتقال جرم آب بر حسب به ضخامت مرز مشترک.

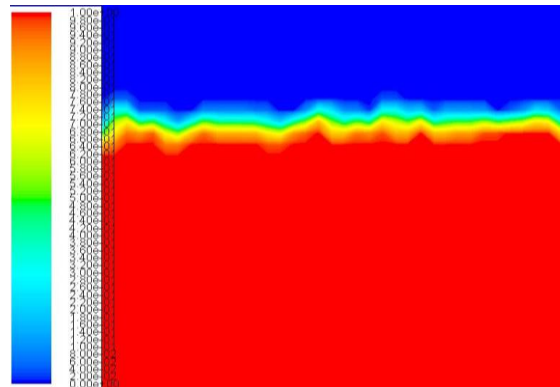
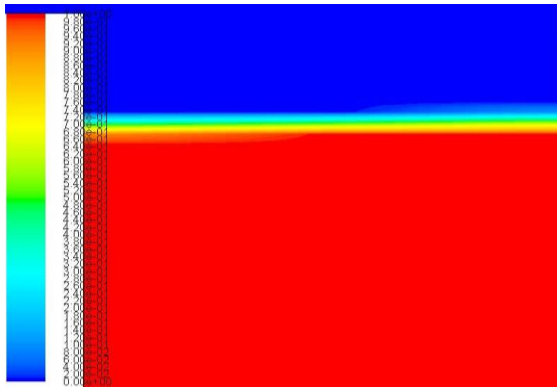
میزان این تبخیر روزانه به علت اختلاف درجه دما آن روز با همدیگر متفاوت است.

شکل ۱۱ میزان تبخیر در ماههای گوناگون یک سال میلادی را نشان می‌دهد. این میزان تبخیر در شرایط محاسباتی بر حسب سانتی‌متر مکعب و در شرایط تجربی بر حسب متر مکعب می‌باشد. از مقایسه نتیجه‌های به‌دست آمده با نتیجه‌های تجربی می‌توان نتیجه گرفت که محاسبه‌های انجام شده با میزان خطای کم و قابل قبولی انجام پذیرفته است.

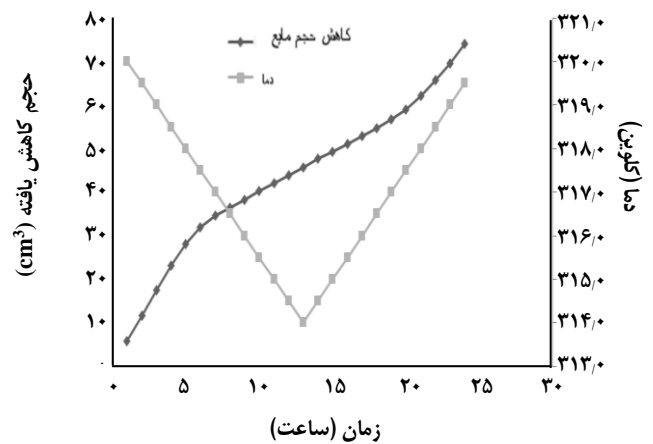
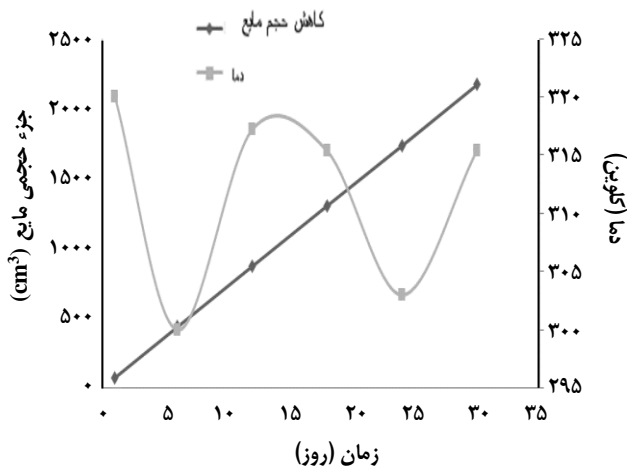
شکل ۱۲ سه پارامتر تغییرهای حجم توده هوا، پروفیل دما و نرخ انتقال جرم را در کنار هم نشان می‌دهد. میزان حجم هوا در توده آب صفر در مرز مشترک کمی افزایش می‌یابد و سرانجام

دیده می‌شود، میزان حجم آب در توده بیش‌ترین مقدار و در فصل مشترک رفته رفته کاهش می‌یابد. زمانی که به توده هوا می‌رسیم کسر حجمی از آب دیده نشده و با هوای خالص روبرو هستیم. میزان کل آب تبخیر شده در دامنه دمایی ۳۲۰-۳۱۵ کلین پس از ۲۴ ساعت در شکل ۹ نمایش داده شده است. روشن است که میزان تبخیر در هر ساعت از شبانه روز (به علت اختلاف دما با همدیگر) متفاوت است. اما شار کلی تبخیر با زمان افزایش یافته است.

شکل ۱۰ میزان کل آب تبخیر شده در دامنه دمایی ۳۲۰-۳۰۰ درجه پس از ۳۰ روز را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود میزان کل تبخیر با گذر زمان بیش‌تر شده اگر چه



شکل ۸- الف) کسر حجمی آب در گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه، ب) کسر حجمی آب در گام زمانی ۰/۰۰۰۱ ثانیه.



شکل ۹- میزان کل آب تبخیر شده در دامنه دمایی (۳۲۰-۳۱۵ کلین) پس از ۲۴ ساعت.

شکل ۱۰- میزان کل آب تبخیر شده در دامنه دمایی (۳۲۰-۳۱۵ کلین) پس از ۳۰ روز.

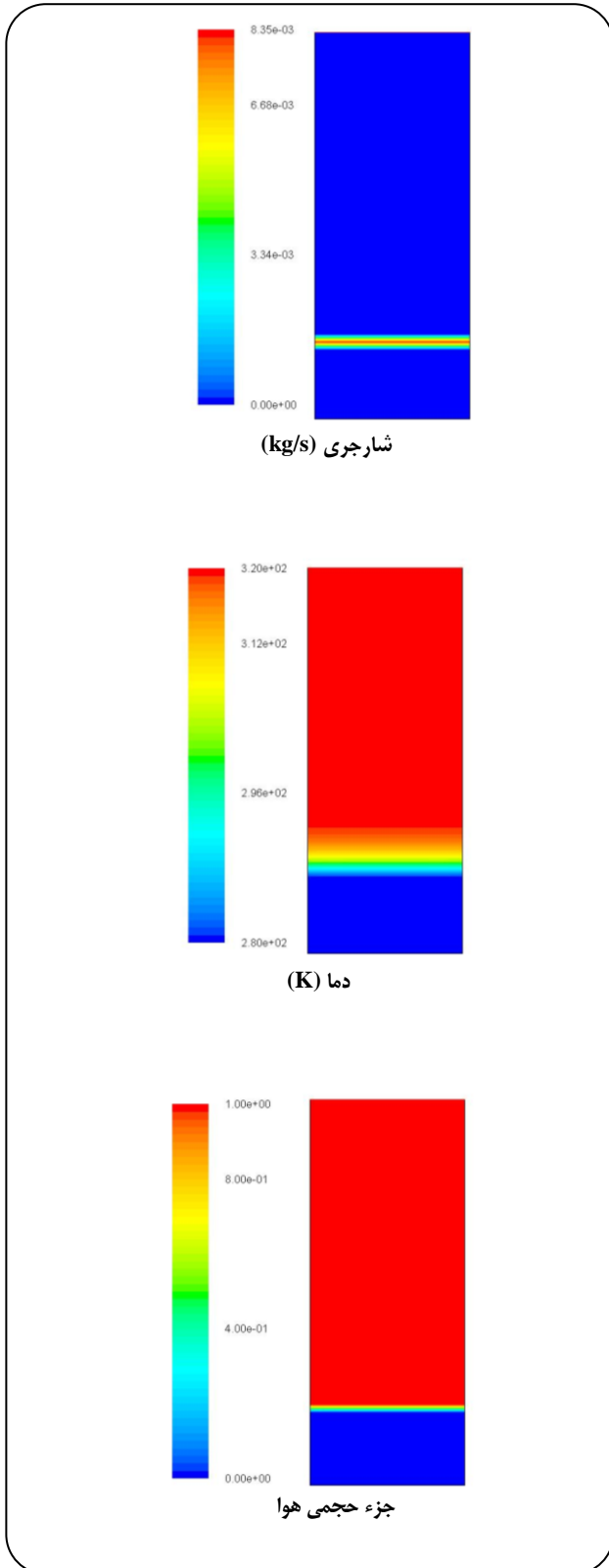
قرار دارد و رفته رفته افزایش می یابد و به میزان ثابتی می رسد. فرضیه های مدل؛ پارامترهای حاکم و شرایط مرزی با مدل ارایه شده با معادله پنمن (۱۹۴۸ و ۱۹۵۶) و توسعه یافته آن که توسط بوچیت (۱۹۶۳) مورتنون (۱۹۸۳، ۱۹۷۸، ۱۹۶۹) هاگر که در سال های ۱۹۴۶ تا ۱۹۸۳ میلادی فرایند تبخیر را از سطح آزاد آب دریاچه مورد مطالعه قرار داده اند مطابقت دارد [۲۰].

پس از مرز مشترک در بیشترین میزان خود قرار دارد. همان گونه که در قسمت های پیشین گفته شد، پروفیل دما در بالک آب در کمترین مقدار و در بالک هوا در بیشترین مقدار قرار دارد. انتقال جرم نیز در فصل مشترک انجام می پذیرد.

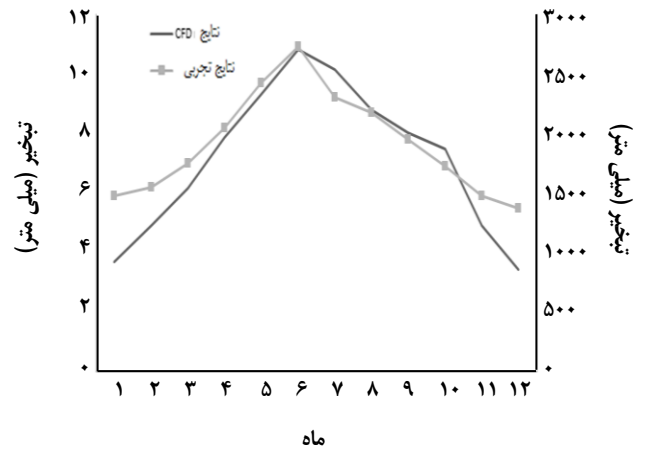
تأثیر سرعت باد

شکل ۱۶ تأثیرهای سرعت باد بر نرخ انتقال جرم را نشان می دهد. با توجه به نتیجه ها دیده می شود که با افزایش سرعت هوا، میزان نرخ انتقال جرم افزایش می یابد. تغییرهای انتقال جرم تنها در فصل مشترک صورت می گیرد و در ناحیه های دیگر صفر می باشد. همان گونه که در بخش های پیشین گفته شد مدل سازی تبخیر سطحی به صورت طبیعی توسط پژوهشگران گوناگون مورد مطالعه

شکل ۱۳ نمایانگر بازه ی محاسباتی بستر و میزان سرعت باد می باشد و شکل ۱۴ کانتور بردار سرعت و جزء حجمی مایع را نشان می دهد. همان گونه که شکل نشان می دهد، میزان سرعت باد عبوری ۲ m/s و میزان حرکت مولکول های آب ۰/۱ m/s است. همچنین شکل ۱۵ میزان بزرگی سرعت نسبت به مکان را نشان می دهد. سرعت باد در ابتدای مسیر در کمترین میزان خود



شکل ۱۲- کانتور تغییر حجم بالک هوا، پروفایل دما و نرخ انتقال جرم مایع در مرز مشترک.

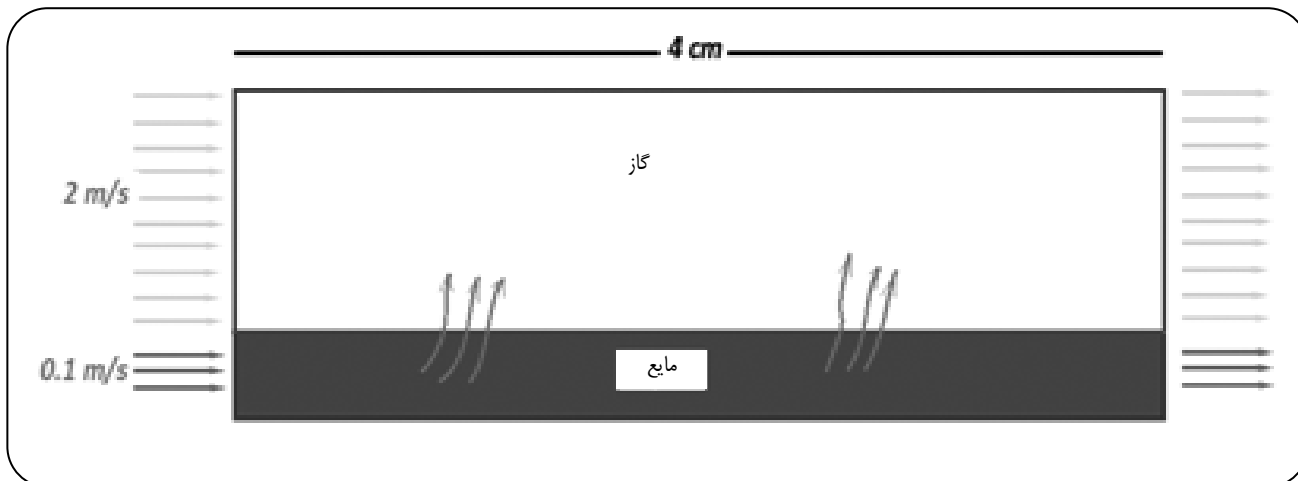


شکل ۱۱- مقایسه میزان تبخیر در ماه‌های مختلف در یک سال میلادی با نتیجه‌های تجربی.

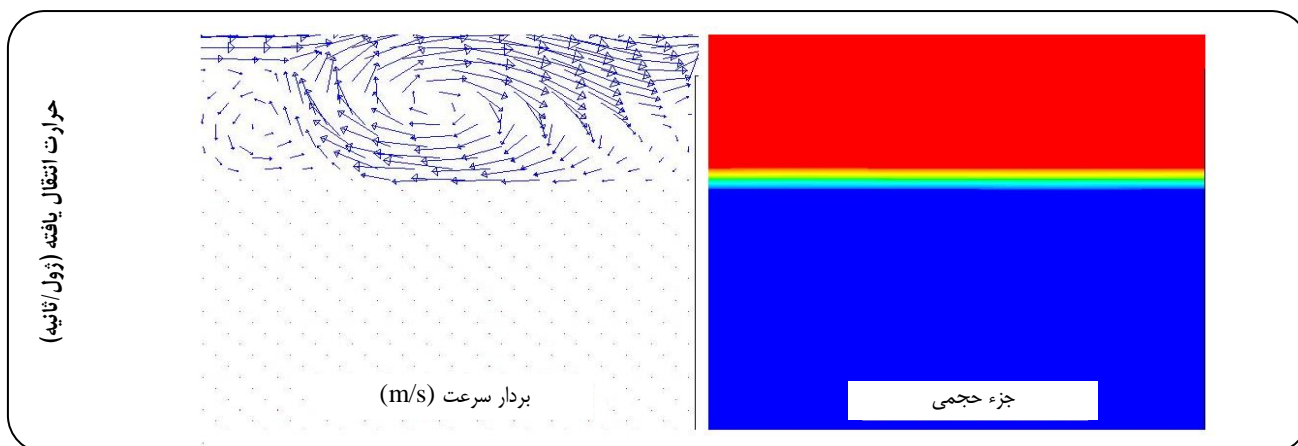
قرار گرفته است از جمله بنیان گذاران مدل سازی ریاضی تبخیر سطحی توسط پمن در سال ۱۹۴۵ میلادی انجام شد که با در نظر گرفتن فرضیه‌ها و پارامترهای گوناگون از جمله: نقش دمای محیط؛ باد، تابش روزانه و چگونگی زاویه و میانگین انرژی تابشی روزانه و اندازه گیری میزان تبخیر سطحی انجام گرفته از سطح آزاد آب در سامانه‌های کارتیزین و استوانه ای انجام گرفت اگرچه این مدل سازی توسط معادله‌های تحلیلی انجام شده است لذا در ارضای شرایط مرزی با خطا گزارش شده است که با داده های تجربی تطابق مناسبی نداشته است [۲۱]. با گسترش روش های شبیه سازی و اعمال شرایط مطابق با واقعیت مسئله میزان خطا با داده های تجربی به مراتب کم تر شده است.

نتیجه گیری

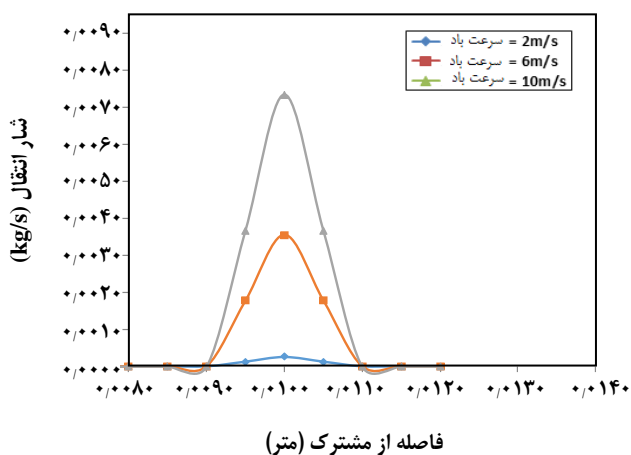
همواره به دلیل اختلاف دمای بین آب و هوا پدیده‌ی تبخیر سطحی و انتقال جرم از مایع به گاز صورت می‌گیرد. به دلیل وجود اختلاف دمایی و نرخ تبادل گرما در فصل مشترک با پدیده‌ی انتقال جرم نیز رو به رو هستیم. مدل VOF و معادله‌های ناویر استوکس با رژیم مختلط K-ε که در شبیه‌سازی به روش CFD برای پدیده تبخیر سطحی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به داده‌های به دست آمده از مدل محاسباتی شامل اثر دما، شار گرمایی، نرخ انتقال جرم در فصل مشترک گاز - مایع، سرعت باد؛ میزان کل آب تبخیر شده (روزانه؛ ماهانه؛ سالیانه) که در گام‌های زمانی ۰/۱۰۰۱ و ۰/۱۰۰۰۱ ثانیه و در ضخامت لایه مرزی



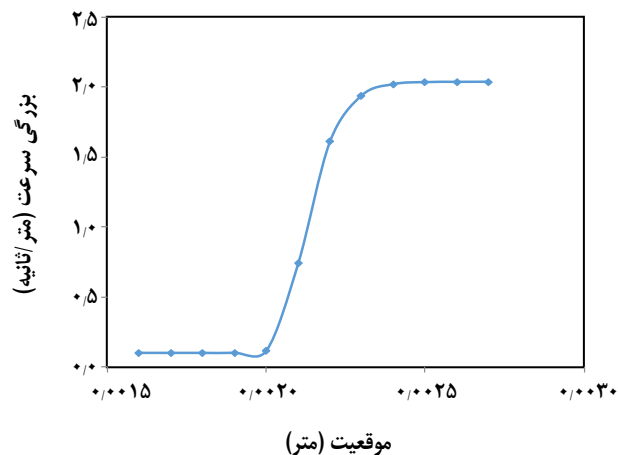
شکل ۱۳- دامنه محاسباتی بستر و میزان سرعت باد.



شکل ۱۴- کانتور بردار سرعت باد و جزء حجمی مایع در فصل مشترک.



شکل ۱۶- میزان تاثیرهای سرعت باد بر نرخ انتقال جرم.



شکل ۱۵- میزان بزرگی سرعت باد نسبت به مکان.

δ_{ij}	دلتهای کرانک یا تانسور واحد	از ۰.۱ تا ۰.۰۶ متر پارامترهای تأثیرگذار در تبخیر سطحی
P	فشار	مورد بررسی قرار گرفت، نشان داد که هرچه به میانه‌های مرز مشترک
E	شدت جریان تبخیری	نزدیک‌تر شویم شار انتقال افزایش، و با نزدیک شدن به توده سیال (هوا)
T	دما	از میزان انتقال جرم کاسته می‌شود. در واقع شار انتقال جرم
Z, Z_f	ضخامت لایه مؤثر	پس از عبور از فصل مشترک نزدیک به صفر است. نتیجه‌های
t	زمان	به دست آمده از مدل‌سازی کسر حجمی آب نشان داد که میزان
μ	گرانروی دینامیکی	حجم آب در توده آب بیش‌ترین مقدار و در فصل مشترک کاهش
μ_i	گرانروی گرداب‌ها	تا توده گاز به کم‌ترین مقدار می‌رسد. به عبارتی دیگر همواره
λ	گرانروی ثانویه	گرداب‌ها مناسب برای تبخیر سطحی آب وجود دارد. در بررسی
ϕ	تابع استهلاک	میزان تأثیرهای سرعت باد بر نرخ انتقال جرم دیده شد که با افزایش
$\delta \varepsilon, k\delta$	عدد پراتل برای معادله k- ε	سرعت هوا، میزان نرخ انتقال جرم افزایش می‌یابد. به‌طور کلی
ε	نرخ استهلاک واحد جرم	نتیجه‌های مدل‌سازی نشان می‌دهد حجم زیاد ساکن آب تأثیر
τ	تنش	زیادی بر فرایند تبخیر سطحی و کاهش ارتفاع سد آب می‌شود.
$C_{\mu}; C_{\nu\varepsilon}; C_{\tau\varepsilon}; \sigma_k; \sigma_\varepsilon$	ثابت‌های مدل k- ε در جریان آشفته	
w, u, V	مولفه‌های سرعت	
U	انرژی داخلی	

فهرست نمادها

k	انرژی جنبشی در واحد جرم مربوط به آشفتگی
S_M	جمله چشمه
V	حجم
ρ	چگالی سیال

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۹/۱۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۶/۱

مراجع

- [1] Liua Q, Xi X.H., Contribution of Meteorological Variables to Changes in Potential Evaporation in Haihe River Basin, China, *Procedia Environmental Sciences*, **13**: 1836-1845 (2012).
- [2] Prata A.G, Satellite-Derived Evaporation from Lake Eyre, *South Australia Journal of Remote Sensing*, **11**: 2051-2068(1990).
- [3] Bruton J.M., McClenndonand R.W., Hoogenboom G., Estimating Daily Pan Evaporation with Artificial Neural Network, *Trans.ASAE*, **43**(2): 492-496 (2000).
- [4] Rosenberry D.O., Winter T.C., Buso D.C., Likens G.E., Comparison of 15 Evaporationmethods Applied to a Small Mountain Lake in the Northeastern USA, *Journal of Hydrology*, **340**:149-166 (2007).

[۵] کریمی، سپیده؛ شیری، جلال؛ ناظمی، امیرحسین؛ تخمین تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع با استفاده از سیستم

هوش مصنوعی (ANN و NAFIS) و معادله‌های تجربی، نشریه دانش آب و خاک، (۲) ۲۳ : ۱۳۹ تا ۱۵۸

(۱۳۹۲)

- [۶] سعدی، مریم؛ رهبر شمس کار، کبری؛ علایی، ابراهیم؛ مدل سازی فرایند تبخیر آب در حوضچه های تبخیر خورشیدی و محاسبه سطح بهینه حوضچه تغلیظ، نشریه پژوهش نفت، (۷۱) ۲۲: ۱۱۷ تا ۱۲۶ (۱۳۹۱).
- [۷] محمدی جوزانی، محمدرضا؛ بهجت، یعقوب؛ شاه حسینی، شاهرخ؛ قائمی، احد؛ بررسی هیدرو دینامیک ساتریفوژ گازی با استفاده از تحلیل CFD، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۱) ۳۳: ۸۹ تا ۱۰۱ (۱۳۹۳).
- [۸] حسینی، سید حسین؛ زیودار، مرتضی؛ رحیمی، رهبر؛ شبیه سازی ناپایای بستر شاراینده حبابی حاوی ذره های نوع B با استفاده از CFD در سرعت های بای گاز، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۱) ۳۰: ۲۹ تا ۴۱ (۱۳۹۰).
- [9] Robjer Gullman S., "Development of Evaporation Models for CFD For Application within Drying Process Simulation", Master of Science Thesis, Department of Chemical Reaction Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden (2010).
- [10] Trujillo F.J., Lovatt S., Harris M., Wellix J., Tuan Pham Q., CFD Modeling of the Heat and Mass Transfer Process During the Evaporation of Water from a Circular Cylinder, "Third International Conference on CFD in the Materials and Industries", Melbourne, Australia, (2003).
- [۱۱] کاظمیان، محمد؛ رهبر، نادر؛ ابولفضلی اصفهانی، جواد؛ تخمین ضریب انتقال حرارت جابجایی درون آب شیرین کن خورشیدی ساده به کمک CFD، "همایش تخصصی نمک زدایی آب های شور، لب شور و تصفیه پساب"، دانشگاه صنعت آب و برق (۱۳۹۱).
- [۱۲] درویشی، عبدالمجید؛ اروجعلیان، عبدالرضا؛ کشاورز مروجی، مصطفی؛ مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی بازیابی ترکیب معطر توسط فرایند تراوش تبخیری آبگیز: اثر ضخامت غشا و پدیده کوپلینگ، "پانزدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران"، تهران، دانشگاه تهران (۱۳۹۳).
- [13] Stamoudis.N, Chryssakis C., Kaiktsis L., A Two-Component Heavy Fuel Oil Evaporation Model for CFD Studies in Marine Diesel Engines, *Fuel*, **115**: 145-153 (2014)
- [۱۴] امیری، شهرام؛ رشیدی، حامد؛ رحیمی، مسعود؛ مدل سازی تبخیر کننده فیلم ریزشی توسط CFD، "دهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران"، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان (۱۳۸۴)
- [15] Malet J., Degrees du Lou O., Gelain T., Water Evaporation Over Sump Surface in Nuclear Containment studies: CFD and LP Codes Validation on TOSQAN Tests, *Nuclear Engineering and Design*, **263**: 395-40 (2013).
- [۱۶] پهلوانزاده، حسن؛ روشن ضمیر، حسن؛ مظفری، سید حسین؛ بررسی تأثیر به کارگیری افزایشده های انتقال حرارت بر ضریب انتقال حرارت در جریان دو فازی آب - هوا در الگوی حبابی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۱) ۳۰: ۵۳ تا ۶۲ (۱۳۹۰).

- [17] Chungen Yin, Transient Heating and Evaporation of Moving Fuel Droplets, *Energy Procedia*, **61**: 37-40 (2014).
- [18] Arévalo R., Antúnez D., Rebollo L., Abánades A., Estimation of Radiation Coupling Factors in Film Boiling Around Spheres by Mean of Computational Fluid Dynamics (CFD) Tools, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **78**: 84-89 (2014).
- [19] Horvat A., Jordan C., Lukasser M., kuttner C., Markaruk A., Harasek M., [CFD Simulation of Bubble Columns Using the VOF Model: Comparison of Commercial and Open Source Solvers with and Experiment](#), *Chemical Engineering Trans Action*, **18**: 1-6 (2009)
- [20] Haque A., [Estimating Actual Areal Evapotranspiration from Potential Evapotranspiration Using Physical Models Based on Complementary Relationships and Meteorological Data](#), *Bull Eng Geol Env*, **62**: 57-63 (2003)
- [21] Penman H.L., [Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass](#), "Proceedings of the Royal Society of London. Series A", *Mathematical and Physical Sciences*, **193**(1032): 120-145 (1948)