

روشهای کاهش تبخیر در مخازن با کاهش اثرات باد

۱- مقدمه

آب یکی از مهمترین عوامل در ایجاد موجودات زمینی است لذا آب را مایه حیات و زندگی دانسته‌اند با اینکه بیش از دوسوم سطح زمین را آب اشغال کرده و قاره‌ها را آب‌های اقیانوس‌های بزرگی چون آرام و اطلس احاطه کرده‌است، با این همه مشکل بخش عظیمی از موجوداتی که در خشکی زندگی می‌کنند کمبود آب به ویژه آب شیرین است. در حال حاضر منازعاتی در جهان شکل گرفته که از آن به جنگ آب یاد می‌شود. در جهان امروز، تسلط و مدیریت آب به معنای تسلط بر ثروت و قدرت است.

کشور ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارد که متوسط سهم آن از بارندگی‌های کره زمین کمتر از ۰/۲ درصد می‌باشد و این درحالی است که هدررفت آب در ایران معادل ۵۲ درصد است که در مقایسه با متوسط مقدار اتلاف در دنیا (حدود ۱۵ درصد)، رقم بسیار قابل توجهی می‌باشد.

کشور ایران دارای منابع کافی آب شیرین نبوده و ریزش‌های جوی در همه‌جای آن یکسان نمی‌باشد و با رشد جمعیت نیز مواجه است. از طرفی هر چند سال یکبار با وقوع خشکسالی‌های گسترده بخش عظیمی از منابع آبی خود را از دست می‌دهد. همچنین با عنایت به این مساله که پدیده خشکسالی بطور مستقیم یا غیرمستقیم بر زندگی، بهداشت، سطح درآمد، حجم محصولات کشاورزی و دامی و محیط زیست اثر گذاشته و آنها را دچار مخاطره می‌نماید، مدیریت منابع آب و حفظ کمیت این منابع ارزشمند از اهمیت خاصی برخوردار می‌گردد.

سالانه ۴۳۲ میلیارد مترمکعب بارش در کشور رخ می‌دهد که حدود ۷۰ درصد بارندگی سالیانه کشور به میزان ۲۹۶ میلیارد مترمکعب به صورت تبخیر از دسترس خارج می‌گردد. متوسط سالانه تبخیر در کشور حدود ۷۰ تا ۷۱ درصد بارندگی سالانه برآورد شده‌است که تنها قاره افریقا با ۷۹ درصد و استرالیا با ۸۰ درصد تبخیر در شرایط نامساعد نزولی مشابه با ایران می‌باشند.

۲-۱ تعریف تبخیر

عمل تبخیر^۱ یک فرآیند کاملاً فیزیکی است که در آن انرژی حرارتی موجب تغییر آب از حالت مایع به گاز می‌گردد. فرآیند تبخیر به عوامل مختلفی از جمله رطوبت، درجه حرارت، سرعت باد، شوری آب، سطح تبخیر، مدت تابش، عرض جغرافیایی و... بستگی دارد.

۳-۱ عوامل موثر بر تبخیر

۱-۳-۱- درجه حرارت^۲

تبخیر، همانطور که گفته شد، عمل تبدیل آب به بخار است. این عمل فقط در صورت وجود انرژی امکان‌پذیر است. برای تبدیل هر گرم آب به بخار حدود ۶۰۰ کالری حرارت لازم است. بنابراین تبخیر می‌تواند در طول روز و حتی در شب، چنانچه انرژی در

^۱- Evaporation

^۲- Temperature

اختیار باشد، صورت گیرد. اصولاً مقدار انرژی که بتواند عمل تبخیر را انجام دهد در روز بیشتر از شب و در تابستان بیشتر از زمستان است. عرض جغرافیایی محل نیز که انرژی دریافت شده از خورشید به آن بستگی دارد در این امر دخالت دارد.

۲-۳-۱- رطوبت^۳

هر چه هوای مجاور سطح آب، ذرات بیشتری مایع را در خود جای داده باشد تعداد زیادتری از همان ذرات قادرند از هوا به داخل مایع بازگردند و از این رو میزان خالص تبخیر کم می شود. به همین دلیل در هوای خشک، تبخیر بیشتر از هوای مرطوب صورت می گیرد.

۳-۳-۱- سرعت باد^۴

بلافاصله پس از تبخیر، لایه نازک هوایی که در حد فاصل سطح مرطوب و هوا قرار گرفته است از بخار آب اشباع می شود اگر این لایه در جای خود ساکن باقی بماند عمل تبخیر متوقف می شود زیرا در یک هوای اشباع مقدار خالص تبخیر برابر صفر است بنابراین برای تداوم تبخیر لازم است لایه اشباع شده به خارج رانده شود این عمل در طبیعت توسط باد انجام می شود بنابراین سرعت و تداوم باد در این مورد از اهمیت زیادی برخوردار است.

۴-۳-۱- شوری آب

تبخیر با شوری آب رابطه عکس دارد، یعنی هر چه آب شوری بیشتری داشته باشد، میزان تبخیر کمتر خواهد بود. در شرایط مساوی، سرعت تبخیر در آب اقیانوس ها ۵ درصد کمتر از آب خالص می باشد. دلیل این امر افزایش پتانسیل اسمزی آب در اثر وجود نمک می باشد. در شرایطی که پتانسیل اسمزی آب بالا باشد خارج شدن مولکول های آب از سطح مایع به سختی صورت می گیرد.

۵-۳-۱- سطح تبخیر

اگر دو مقدار آب با حجم مساوی موجود باشد، آبی که با سطح بیشتر در معرض هوا قرار می گیرد به مقدار بیشتری تبخیر خواهد شد.

۱-۴-۱- روش های کنترل تبخیر

روش ها و استراتژی های کاهش تبخیر از منابع آب های سطحی، مخازن ذخیره آب و سدها بسته به شرایط محیطی، تکنولوژی ها و تجهیزات موجود در محل می توانند متفاوت باشند. همچنین هر کدام از این روش ها دارای مزایا و معایبی هستند. این روش ها شامل روش های فیزیکی- مکانیکی، روش های شیمیایی، روش های زیستی، روش طراحی ویژه مخازن و روش های مدیریتی است.

۱-۴-۱- روش های فیزیکی - مکانیکی^۵

³- Moisture

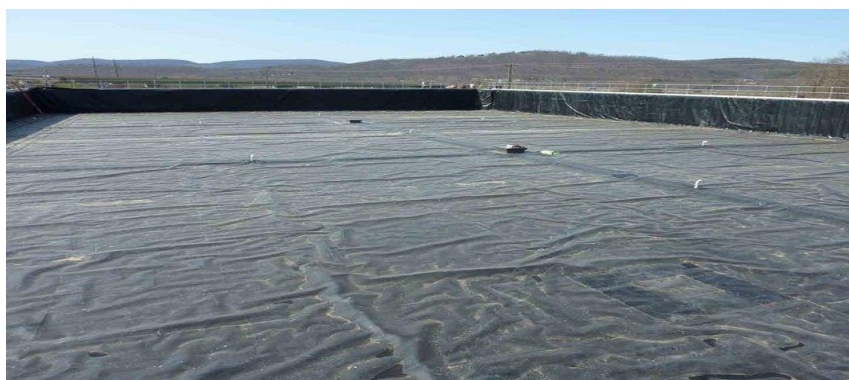
⁴- Wind Speed

⁵- Physical-Mechanical Methods

2- Floating Covers

۱-۴-۱-۱ پوشش‌های شناور^۲

این نوع پوشش که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، عموماً به صورت یک پرده نفوذناپذیر که بر روی کل سطح آب شناور است، عمل کاهش تبخیر را انجام می‌دهد، این پوشش‌ها شامل پلی‌اتیلن، موم، کف و پل استر می‌باشند. این نوع مواد می‌توانند با کاهش نفوذ نور و ایجاد جلبک مانع تبخیر آب گردند. حداکثر مساحت مناسب برای استفاده این محصولات تقریباً ۱ هکتار می‌باشد و بهتر است مخزن تمام سال دارای آب باشد. عیب این محصولات هزینه اولیه بالا، تاثیر بر برخی جنبه‌های کیفی آب، محدودیت حیات پرندگان و ماهی‌ها و آسیب دیدن در اثر وزش بادهای شدید می‌باشد.



شکل ۱. نمایی از پوشش‌های شناور

۱-۴-۱-۲ پوشش‌های چند قسمتی^۶

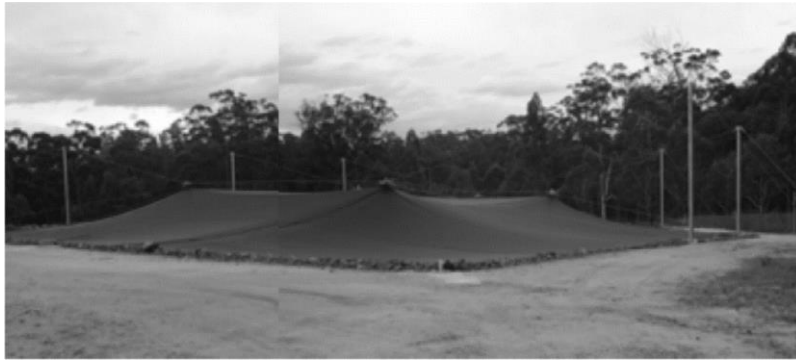
دقیقاً شبیه پوشش‌های شناور می‌باشد با این تفاوت که این پوشش از چند بخش مجزا تشکیل شده و با اتصال تمام قطعات به یکدیگر می‌توان یک پوشش بزرگتر ایجاد نمود، این نوع پوشش به صورت پیش‌ساخته و یا درجا در محل مورد استفاده قرار می‌گیرند. معایب این روش هزینه اولیه بالا، عمر کم، تخریب در اثر بادهای شدید، دشواری اجرا و قابل استفاده بودن برای سطوح بزرگ نمی‌باشد.

۱-۴-۱-۳ سازه‌های سایه‌انداز^۷

این نوع سازه‌ها عموماً توسط کابل بر روی سطح آب معلق می‌گردند و بر روی سطح آب سایه می‌اندازند (شکل ۲). که باعث کاهش تابش مستقیم نور خورشید، سرعت باد و افزایش رطوبت هوا در زیر پوشش می‌شود که همگی عوامل موثر در کاهش میزان تبخیر می‌باشند. مزیت این روش کاهش میزان جلبک به علت جلوگیری از نفوذ نور و عدم تاثیر بر کیفیت آب به دلیل در تماس بودن سطح با اکسیژن و همچنین اجازه ورود آن به داخل مخزن است. عیب این روش هزینه اولیه بالا و دشواری اجرا در شرایط بادی است. فاکتور مهم در این روش توانایی در ایجاد ساختار کابل‌ها است.

^۶- Modular Covers

^۷- Shade Structures



شکل ۲. نمایی از سازه‌های سایه‌انداز

۴-۱-۴-۱- بادشکن^۸

معمولاً این روش در گوشه‌ها و یا بر روی سطح مخزن به دو صورت طبیعی مثل درخت و یا مصنوعی اجرا می‌گردد. بادشکن‌ها با کنترل سرعت باد باعث کاهش میزان تبخیر می‌شوند. علاوه بر آن به عنوان پوشش سایه مانع تابش نور خورشید بر سطح آب می‌شوند. تاثیرات بادشکن بر حسب نسبت فاصله بادشکن به ارتفاع آن بیان می‌گردد. از مهمترین معایب بادشکن‌های مصنوعی، می‌توان سخت شدن دسترسی به مخزن و تخریب کناره‌ها و خاکریز مخزن توسط ریشه درختان نام برد.

بادشکن یکی دیگر از روش‌های فیزیکی- مکانیکی کاهش تبخیر استفاده از انواع بادشکن‌ها می‌باشد. بادشکن‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱- بادشکن‌های مصنوعی، ۲- بادشکن‌های زنده

بادشکن‌های زنده از درختان و درختچه نباتات مانند آفتابگردان، ذرت و نظایر آن تشکیل شده است. بادشکن‌های مصنوعی مانند دیوارهای سنگی، فلزی، حصاری و مانند آنان می‌باشند. این نوع بادشکن‌ها می‌توانند نیمه نفوذپذیر و یا غیر قابل نفوذپذیر باشند. بادشکن‌های مصنوعی قابلیت شناور کردن بر روی سطح آب را هم دارند که می‌توان هم از خاصیت کاهش از سرعت باد آنها استفاده کرد و هم به عنوان پوشش سایه انداز که مانع تابش نور خورشید می‌شوند از آن استفاده کرد (شکل ۳).





شکل ۳. بادشکن‌های مصنوعی و طبیعی (Google)

مانند شکل ۴ بادشکن می‌تواند از ساخت دیوارهای بلند تا کاشت درخت در اطراف منبع تشکیل شود. حتی‌الامکان، بهتر است منبع آب در محلی قرار گیرد که بتوان از عوارض طبیعی مثل تپه‌ها به منظور کاهش دادن سرعت باد در پیرامون آن بهره برد. به کار بردن درختان به‌عنوان بادشکن مزایای زیادی دارد، که از این میان می‌توان به عمر مفید طولانی اشاره کرد. هرچند باید توجه داشت که درختان نباید خیلی نزدیک به منبع آبی قرار گیرند، زیرا در این صورت ریشه آن‌ها آب بیشتری از مخزن جذب خواهد کرد. مناسب‌ترین انواع درختان برای استفاده به‌عنوان بادشکن، درختان مخروطی مانند کاج، سرو، افاقیا و اکالیپتوس هستند.



شکل ۴. تصویری از بادشکن‌های رایج

۲- مواد و روش‌ها و معادلات حاکم

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان

۲-۱-۱- معادلات ناویر استوکس

معادلات ناویراستوکس، یک مدل ریاضی کامل برای سیال ارائه می‌دهند. به دلیل پیچیده بودن این معادلات در فرم کامل ناویراستوکس، حل تحلیلی غیرممکن است، بنابراین روش‌های عددی به کمک رایانه بهترین گزینه برای حل بخشی از این

معادلات می‌باشند. پیشرفت سریع در زمینه تکنولوژی رایانه در چند دهه اخیر باعث استفاده گسترده دینامیک سیالات محاسباتی در حل عددی مسائل جریان سیال شده است. با توجه به اینکه تمامی حل‌کننده‌های معادلات ساده‌شده ناویراستوکس نیازمند زمان پردازش و حافظه زیادی می‌باشند، بنابراین مقداری ساده‌سازی در حل این معادلات ناویراستوکس برای کاهش منابع محاسباتی مورد احتیاج، لازم است.

۲-۱-۲- معادله پیوستگی

اصل اساسی که از آن در مکانیک سیالات استفاده می‌شود اصل بقاء جرم است. این اصل بیان می‌دارد که جرم نه تولید می‌شود و نه از بین می‌رود و توسط معادله پیوستگی بیان می‌گردد:

فرم کلی معادله پیوستگی به شکل زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\phi} \rho d\phi + \iint_s \rho \vec{V} \cdot d\vec{S} = 0$$

برای سیالات تراکم پذیر:

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

برای سیالات تراکم ناپذیر:

$$(\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) = 0$$

۲-۱-۳- معادله مومنتوم

مکانیک سیالات تنها با داشتن معادله پیوستگی مشخص نمی‌شود بلکه باید اصل بقاء اندازه حرکت یا قانون دوم نیوتون را درباره آن بیان کرد. اندازه حرکت حاصلضرب جرم در سرعت است. قانون دوم نیوتن بیان می‌کند که برآیند نیروهایی که بر یک جسم اثر می‌کند برابر است با تغییرات خالص مومنتوم. فرم کلی معادله مومنتوم به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\phi} U d\phi + \iint_s \vec{F} \cdot d\vec{S} = \iint Q_v d\phi + \iint_s Q_s \cdot d\vec{S}$$

۲-۱-۴- معادله انرژی

فرم کلی معادله انرژی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\phi} E_t d\phi + \iint_s \vec{E}_t \cdot d\vec{S} = \iiint_{\phi} (\rho \vec{q} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V}) d\phi$$

۲-۲-۲- انواع جریان

جریانی که در آن ویسکوزیته سیال مهم است می‌تواند از دو نوع آرام یا آشفته باشد. اگر سیال در لایه‌های موازی در حال حرکت باشد، جریان آرام است و اگر جریان به طور تصادفی در حال حرکت است، جریان آشفته است. با محاسبه عدد رینولدز می‌توان پیش‌بینی کرد که جریان آرام یا آشفته است.

۲-۲-۱- معادلات حاکم برای جریان آرام

معادلات ناویراستوکس نیمه بیضوی حاکم بر جریان پایدار، تراکم ناپذیر و دوبعدی در حالت آرام به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$$

۲-۲-۲- معادلات حاکم برای جریان آشفته

در اعداد رینولدز بالا جریان آشفته می‌شود. بطوریکه یک حالت تصادفی از حرکت در نقاطی که سرعت و فشار بطور پیوسته درون بخش‌های مهمی از جریان نسبت به زمان تغییر می‌کنند، گسترش می‌یابد. در صورتی که جریان آشفته باشد، معادلات حاکم به معادلات رینولدز تغییر ماهیت داده و از مدل‌های یک معادله‌ای، دو معادله‌ای، سه معادله‌ای، چهار معادله‌ای و پنج معادله‌ای استفاده می‌شود.

۲-۲-۳- معادله پیوستگی برای جریان آشفته

برای جریان تراکم پذیر داریم:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho' u'_i) = 0$$

برای جریان تراکم ناپذیر از آنجایی که $\rho' = 0$ می‌باشد، معادله فوق به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

۲-۲-۴- معادله مومنتوم برای جریان آشفته

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] = \bar{B}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right]$$

تنها تفاوت معادله مومنتوم فوق با معادله مومنتوم با کمیت های لحظه ای اضافه شدن عبارت آخر در سمت راست معادله یعنی $\rho u_i u_j$ میباشد. این عبارت را اصطلاحاً تنش آشفتگی یا تنش رینولدز میگوییم. تنها تفاوت معادلات جریان آرام با آشفتنه نیز فقط حضور همین عبارت میباشد. به طور کلی این عبارت از لحاظ فیزیکی یک تنش نمیشد بلکه بیانگر اثر تبادل اینرسی (مومنتوم) میباشد. فراموش نکنیم که این عبارت از سمت چپ معادله مومنتوم یعنی جایی که با عبارت های اینرسی سر و کار داریم به سمت راست منتقل شده است. بنابراین ریشه و بنیان این عبارت از جنس اینرسی مومنتوم می باشد.

در این تحقیق از Ansys Fluent برای مدلسازی استفاده شده است.

تعیین رابطه مناسب برای تبخیر با استفاده از نرم افزار SPSS

همانطور که در فصل اول اشاره شد، تبخیر به پارامترهایی نظیر دما، رطوبت و سرعت باد وابسته است. براساس این متغیرهای ورودی، مراجع جهت برآورد تبخیر روابط تجربی بصورت یک معادله ریاضی ارائه داده اند که هدف در آن ها تخمین تبخیر می باشد. روابط ارائه شده برای تبخیر هم به صورت خطی و هم به صورت غیر خطی می باشند. مهمترین روابط غیر خطی ارائه شده عبارتند از روابط هارگریوز، پنمن فائو و تورنویت که روابط بسیار مفید و مناسبی برای تخمین تبخیر می باشند.

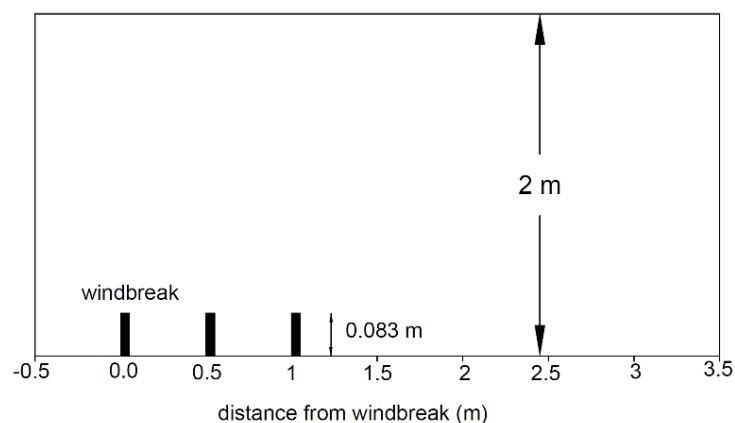
در این فصل هدف از تعیین رابطه بین تبخیر با درجه حرارت، رطوبت و سرعت باد، تعیین مهمترین عامل موثر بر تبخیر در منطقه چاه نیمه و ارائه راهکار مناسب برای کنترل آن می باشد. به همین دلیل از روابط خطی استفاده شده است.

برای تعیین رگرسیون خطی داده های مربوط به تبخیر، درجه حرارت، سرعت باد و رطوبت برای یک سال از سازمان هواشناسی مربوط به ایستگاه زهک به مختصات ۳۰ درجه و ۵۴ دقیقه عرض شمالی و ۶۱ درجه و ۴۱ دقیقه عرض جنوبی که در ارتفاع ۴۹۵ متری از سطح دریا قرار دارد جمع آوری شد. پیش از وارد کردن داده ها به برنامه SPSS، آن ها مورد بررسی و بازبینی قرار گرفتند. همواره احتمال دارد که در داده ها با مقادیر غیرعادی مواجه شویم. موارد غیرعادی می تواند شامل مقادیر تعریف نشده و مقادیر پرت (دور افتاده) باشد. قبل از انجام هرگونه تحلیل آماری بر روی داده ها، باید چاره ای در مورد مقادیر پرت بیندیشیم. در این تحقیق مقادیر داده های پرت کمتر از پنج درصد کل داده ها می باشد پس می توان طبق قوانین آماری از داده های پرت صرف نظر کرد.

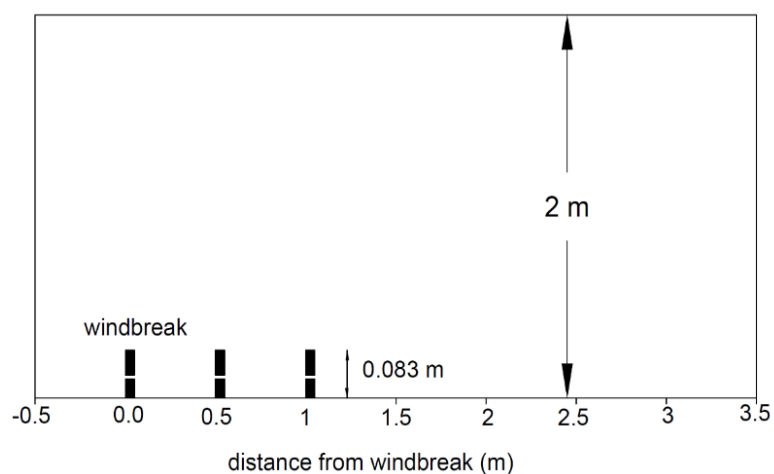
۳-۲- چگونگی آرایش بادشکن های صلب و دارای بازشو

همان گونه که در بخش مقدمه ذکر شد، تاکنون مطالعاتی اندکی در خصوص کاربرد بادشکن ها به منظور کاهش تبخیر انجام شده است، و هیچ گونه الگوی طراحی در رابطه با فواصل بادشکن ها موجود نیست. به همین منظور در این پژوهش به بررسی الگوی مناسب قرارگیری بادشکن ها به منظور کاهش حداکثر تبخیر پرداخته شده است.

نحوه آرایش بادشکن ها و تعیین فاصله بین آنها یکی از مهمترین پارامترها می باشد که این فاصله بسته به میزان مورد نظر درصد کاهش سرعت باد می تواند تعیین شود همچنین این فاصله باید به گونه ای انتخاب شود که پروژه از نظر اقتصادی مقرون به صرفه و قابل اجرا باشد.



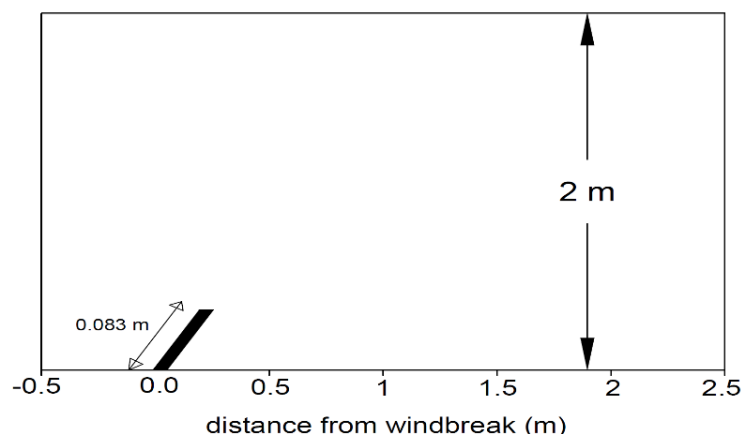
شکل ۱. نمایی از فاصله بین بادشکن‌های صلب



شکل ۶. نمایی از فاصله بین بادشکن‌های دارای بازشو

۴-۲- شبیه‌سازی بادشکن‌های مورب (تحت زاویه)

پس از مدل‌سازی و شبیه‌سازی بادشکن‌های قائم صلب و دارای بازشو، در این مرحله به شبیه‌سازی بادشکن‌های مورب پرداخته شد. به منظور تعیین زاویه مناسب بادشکن‌ها، زوایای ۱۵، ۳۰ و ۶۰ درجه انتخاب و توسط نرم‌افزار مدل‌سازی و اجرا شدند. شبیه‌سازی بادشکن مورب مشابه بادشکن صلب و دارای بازشو می‌باشد. ارتفاع محدوده جریان هشت برابر ارتفاع بادشکن و یا بیشتر در نظر گرفته می‌شود و طول محدوده جریان $30H$ می‌باشد. برای آشفتگی از مدل دو معادله ای $k-\epsilon$ ، RNG استفاده شده است.



شکل ۲. نمایی از بادشکن‌های مورب

۳- نتایج

۳-۱- انتخاب ارتفاع بادشکن

همانطور که قبلاً ذکر شد، مهمترین پارامتر در ساختار بادشکن، ارتفاع بادشکن می‌باشد زیرا طول منطقه حفاظت شده در جلو و پشت بادشکن به ارتفاع بادشکن بستگی دارد. طول منطقه حفاظت شده در پشت بادشکن معمولاً مضربی از ارتفاع بادشکن است. برای تعیین بهترین ارتفاع بادشکن پنج ارتفاع ۰/۰۸۳، ۰/۱، ۰/۱۲۵، ۰/۱۶۷ و ۰/۲۰۸ در نظر گرفته شد. برای تعیین میزان کاهش سرعت باد نمودار سرعت باد روی سطح آب بعد از هر کدام از بادشکن‌ها تا فاصله $30H$ بعد از بادشکن رسم شد و میزان تغییرات سرعت باد محاسبه شد. جدول ۱ میزان کاهش سرعت باد را به ازای ارتفاع‌های مختلف بادشکن نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بادشکن‌های به ارتفاع ۰/۱۶۷ و ۰/۲۰۸ (۴ و ۵ متر در واقعیت) باعث کاهش سرعت باد نمی‌شوند از طرفی ساخت این بادشکن‌ها بسیار سخت و پرهزینه می‌باشد. بادشکن‌های به ارتفاع ۰/۰۸۳ و ۰/۱ متر (۲ و ۲/۵ متر در واقعیت) به ترتیب با ۳۰/۲ و ۲۱/۰۷ درصد، بیشترین میزان کاهش سرعت باد بعد از بادشکن را ایجاد می‌کنند پس به عنوان انتخاب اولیه برای ارتفاع بادشکن تعیین می‌شوند.

جدول ۱- میانگین کاهش سرعت باد به ازای ارتفاع‌های مختلف بادشکن

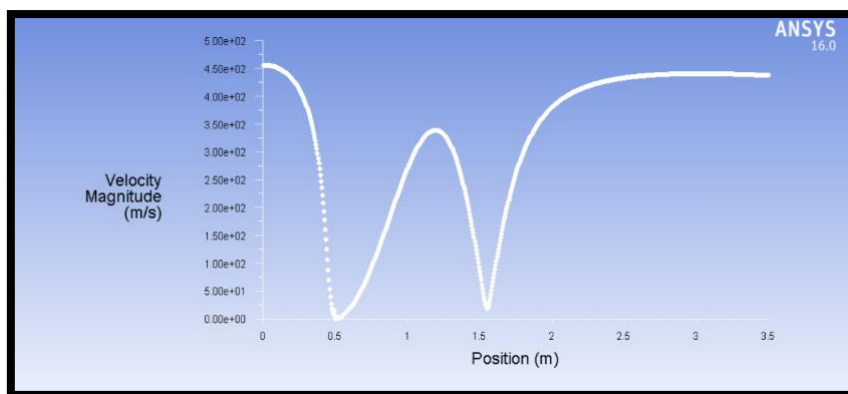
تک بادشکن	
ارتفاع بادشکن (متر)	میانگین درصد کاهش سرعت باد
۰/۰۸۳	۳۰/۲
۰/۱	۲۱/۰۷
۰/۱۲۵	۲/۴۷
۰/۱۶۷	-۱/۹۶
۰/۲۰۸	-۱/۲

برای انتخاب بهترین ارتفاع بادشکن، میزان درصد کاهش سرعت باد بعد از بادشکن تا فاصله H ۳۰ برای بادشکن‌های به ارتفاع ۰/۰۸۳ و ۰/۱ متر در جدول ۲ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در بادشکن به ارتفاع ۰/۱ متر در فواصل ۲/۷۵، ۳ متر و بیشتر با افزایش سرعت باد مواجه می‌شویم پس بادشکن به ارتفاع ۰/۰۸۳ متر (۲ متر در واقعیت) بهترین ارتفاع بادشکن برای مخزن چاه‌نیمه می‌باشد.

جدول ۲- میزان کاهش سرعت باد برای بادشکن به ارتفاع ۰/۰۸۳ و ۰/۱ متر

ارتفاع بادشکن (متر)	فاصله از بادشکن (متر)	درصد کاهش سرعت باد
۰/۰۸۳	۰/۷۵	۸۷/۰۷
	۱	۳۹/۶۹
	۱/۲۵	۲۸/۵۱
	۱/۵	۷۸/۰۷
	۱/۷۵	۴۵/۱۸
	۲	۱۶/۶۷
	۲/۲۵	۶/۸
	۲/۵	۴/۱۷
۰/۱	۰/۷۵	۷۵/۴۴
	۱	۲۸/۷۳
	۱/۲۵	۶/۸
	۱/۵	۲۸/۷۳
	۱/۷۵	۹۱/۸۹
	۲	۲۵/۸۸
	۲/۲۵	۸/۹۹
	۲/۵	۱/۳۲
	۲/۷۵	-۳/۰۷
	۳	-۳/۰۷

نمودار میزان تغییرات سرعت باد در سطح آب برای بادشکن به ارتفاع ۰/۰۸۳ متر در شکل ۸ نشان داده شده است. طبق نمودار تا فاصله H ۱۴ بعد از بادشکن گرچه با افزایش تدریجی سرعت باد رو به رو شده‌ایم اما میزان سرعت به مقدار قابل توجهی نسبت به سرعت اولیه کاهش یافته است. بعد از اینکه سرعت باد در H ۱۴ به ماکزیمم خود یعنی ۳۴۰ متر بر ثانیه می‌رسد. به تدریج تا H ۱۹ سرعت باد کاهش می‌یابد. سرعت باد بعد از H ۱۹ به تدریج افزایش می‌یابد و به مقدار اولیه خود می‌رسد. همانطور که انتظار داشتیم برای بادشکن صلب، مینیمم سرعت در نزدیکی بادشکن و در فاصله H بعد از بادشکن رخ داده است. برای بادشکن به ارتفاع ۰/۰۸۳ متر بعد از فاصله H ۳۰ سرعت باد به مقدار اولیه خود رسیده و ادامه پیدا می‌کند.



شکل ۸. نمودار سرعت باد روی سطح آب برای بادشکن به ارتفاع ۰/۰۸۳ متر

۲-۳- انتخاب فاصله بین بادشکن‌های صلب

همانطور که در بخش‌های قبل ذکر شد، طول بادشکن‌ها باید برابر عرض دریاچه و یا مقداری بیشتر باشد. تا بادشکن‌ها حداکثر کارایی را داشته باشند. برای چینش بادشکن و پیدا کردن بهترین فاصله طولی بین آنها، مدل‌هایی با دو، سه و چهار ردیف بادشکن به ارتفاع ۰/۰۸۳ متر ساخته شد. جدول ۳ میزان کاهش سرعت باد برای دو، سه و چهار ردیف بادشکن به ارتفاع ۰/۰۸۳ متر نشان می‌دهد.

جدول ۳- میزان کاهش سرعت باد برای دو، سه و چهار ردیف بادشکن به ارتفاع ۰/۰۸۳ متر

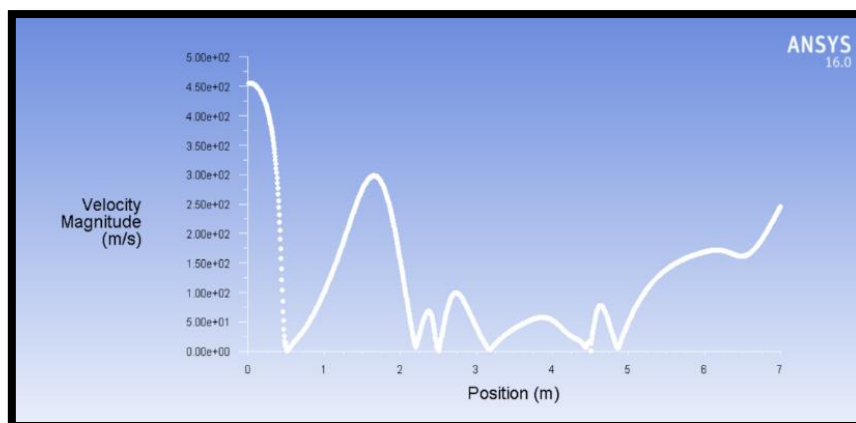
تعداد ردیف	ارتفاع بادشکن (متر)	فاصله بین بادشکن‌ها (متر)	درصد کاهش سرعت باد
۲	۰/۰۸۳	۰/۵	۳۴/۰۲
		۰/۷۵	۳۳/۹۴
۳	۰/۰۸۳	۰/۵	۴۱/۴۱
		۰/۷۵	۶۰/۲۳
۴	۰/۰۸۳	۰/۵	۴۱/۸۸
		۰/۷۵	۵۹/۶۴

همانطور که مشاهده می‌کنید سه ردیف بادشکن به ارتفاع ۰/۰۸۳ متر بیشتر از دو ردیف بادشکن باعث کاهش سرعت باد می‌شود. و چهار ردیف بادشکن نتایج مشابه سه ردیف دارد، پس سه ردیف را به عنوان معیار قرار می‌دهیم و فاصله بین بادشکن‌ها را تا ۵۰H افزایش می‌دهیم تا به فاصله بهینه دست یابیم. با توجه به جدول ۴ در فاصله ۲ متر میزان کاهش سرعت باد به بیشترین مقدار خود یعنی ۷۳/۷۱ درصد می‌رسد که منجر به کاهش ۷۴/۱ درصدی تبخیر می‌شود. با توجه به تمام موارد ذکر شده، در این پژوهش فاصله طولی مناسب بین بادشکن‌های صلب ۲ متر (۴۸ متر در واقعیت) در نظر گرفته می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود نرخ کاهش سرعت باد و تبخیر مشابه می‌باشد.

جدول ۳- میزان کاهش سرعت باد برای بادشکن به ارتفاع ۰/۰۸۳ متر در فواصل مختلف

درصد کاهش تبخیر	درصد کاهش سرعت باد	فاصله بین بادشکن ها (متر)	ارتفاع بادشکن (متر)
۴۱/۶۴	۴۱/۴۴	۰/۵	۰/۰۸۳
۶۰/۵۱	۶۰/۲۳	۰/۷۵	
۶۶/۱۴	۶۵/۸۳	۱	
۶۴/۷۵	۶۴/۴۵	۱/۲۵	
۶۳/۹۶	۶۳/۶۶	۱/۵	
۵۹/۱۵	۵۸/۸۷	۱/۷۵	
۷۴/۱	۷۳/۷۱	۲	
۶۱/۴۱	۶۱/۱۳	۲/۲۵	
۵۷/۳۸	۵۹/۵	۲/۵	
۴۸/۹۲	۴۹/۴	۲/۷۵	
۴۳/۸۴	۴۳/۶۲	۳	
۳۸/۲۴	۳۸/۹۲	۳/۲۵	
۳۹/۱	۳۸/۰۶	۳/۵	
۳۳/۱۹	۳۶/۷۳	۳/۷۵	
۳۶/۹	۳۳/۰۳	۴	

شکل شماره ۹ نمودار سرعت باد روی سطح آب بین سه بادشکن به ارتفاع ۰/۰۸۳ متر و به فاصله طولی ۲ متر را نشان می‌دهد. از فاصله ۰/۵ متر که بادشکن اول قرار دارد تا فاصله ۲۰H انتظار داریم با افزایش تدریجی سرعت رو به رو شویم و همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود این افزایش تدریجی سرعت رخ داده است. اما همچنان میزان سرعت از مقدار اولیه یعنی ۴۵۶ متر بر ثانیه کمتر می‌باشد. ماکزیمم سرعت در ۲۰H رخ می‌دهد و پس از آن تا فاصله ۲۸H سرعت کاهش می‌یابد. از ۲۸H تا ۳۰H که محل قرارگیری بادشکن دوم می‌باشد سرعت باد نامنظم می‌شود. از آنجایی که بادشکن دوم مقداری از سرعت را به سمت بالا منحرف کرده است، میزان کاهش سرعت پشت بادشکن دوم نسبت به بادشکن اول بیشتر است. بین بادشکن دوم و سوم افزایش و کاهش های جزئی در سرعت مشاهده می‌شود. ماکزیمم سرعت بعد از بادشکن دوم در ۳۳H و مینیمم سرعت در ۴۰H رخ می‌دهد. پس از بادشکن سوم که در ۵۴H قرار دارد به تدریج سرعت خود را بازیابی می‌کند تا در نهایت به مقدار اولیه خود برسد.



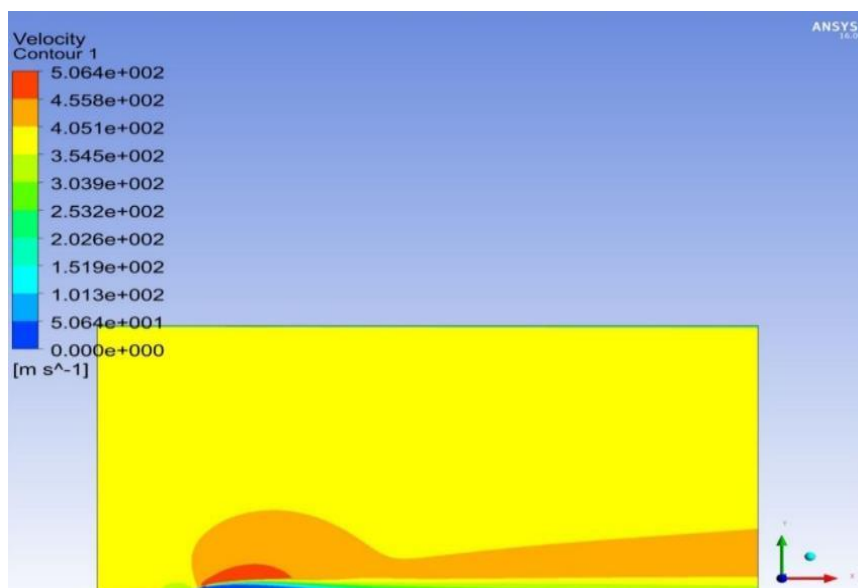
شکل ۹. نمودار سرعت باد روی سطح آب برای سه بادشکن به ارتفاع ۰/۰۸۳ متر و به فاصله ۲ متر

۳-۳- ابعاد صفحات خورشیدی

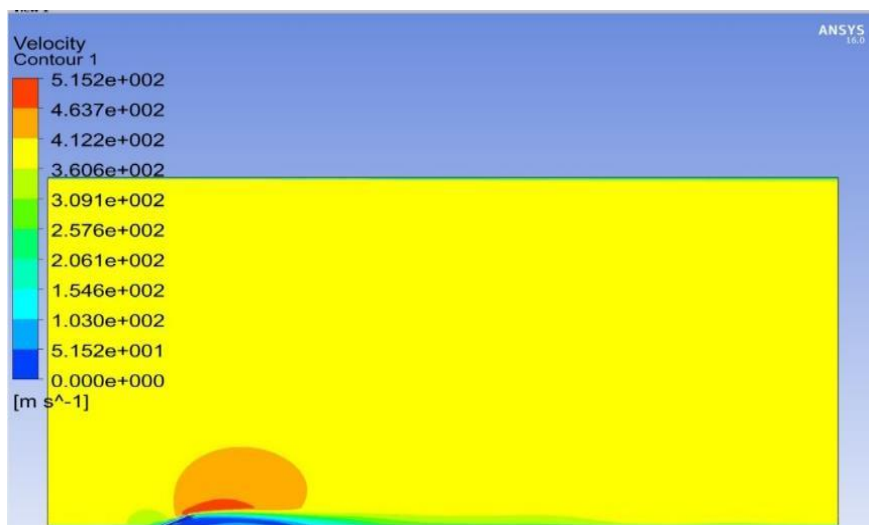
صفحات خورشیدی مورد استفاده در این پژوهش با ابعاد $2/5 \times 2/5$ متر در نظر گرفته شده‌اند که با توجه به مقیاس $\frac{1}{4}$ (در فصل چهارم محاسبه شده است) این ابعاد به $0/125 \times 0/125$ متر کاهش یافته‌اند. هدف از استفاده از مقیاس این است که شبیه‌سازی نمونه واقعی با ابعاد واقعی بسیار دشوار و زمان‌بر بوده و با امکانات موجود قابل اجرا نخواهد بود. به همین دلیل برای سرعت بخشیدن شبیه‌سازی، مقیاس ذکر شده در نظر گرفته شده است.

۳-۴- زوایای شیب و جهت صفحات خورشیدی

با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه مورد مطالعه (چاه نیمه‌های سیستان) به این معنا می‌باشد که با توجه به اینکه طلوع خورشید از سمت شرق بوده و وزش بادهای ۱۲۰ روزه از سمت شمال غرب، از این رو توجه به هر دو زاویه افقی و شیب صفحات خورشیدی امری ضروری و مهم می‌باشد. مدل کردن صفحات خورشیدی برای هر دو زاویه، تغییرات سرعت و میزان راندمان تولید انرژی با توجه به تغییرات در هر دو زاویه مورد بررسی قرار گرفته شده است. بررسی نوع رفتار جریان‌های باد بعد از برخورد با صفحات خورشیدی تحت زاویه شیب ۳۰ درجه و زوایای افقی از ۰ تا ۱۸۰ درجه در شکل‌های زیر قابل مشاهده می‌باشند.



شکل ۱۰. نتیجه مدل سازی جریان باد در ANSYS تحت زاویه شیب ۳۰ درجه و زاویه افقی ۰ درجه



شکل ۱۱. نتیجه مدل سازی جریان باد در ANSYS تحت زاویه شیب ۳۰ درجه و زاویه افقی ۳۰ درجه

با توجه به نتایج، میانگین بیشترین کاهش سرعت جریان باد بعد از صفحات خورشیدی، تحت زاویه شیب ۶۰ درجه و افقی ۰ درجه اتفاق افتاده است. کمترین میانگین سرعت باد با استفاده از صفحه‌ی خورشیدی صلب به عنوان بادشکن، به میزان ۳/۷۶ متر بر ثانیه رسیده است. به این معناست که، با استفاده از مدل سازی زاوایای مختلف بهترین حالت ممکن یعنی زاویه شیب ۶۰ درجه و زاویه افقی ۰ درجه با کاهش ۸۰/۲۱ درصدی سرعت باد نسبت سرعت حداکثر باد (به میزان ۱۹ متر بر ثانیه) روبه‌رو هستیم. مدل سازی صفحات خورشیدی (به عنوان بادشکن‌ها) که تحت زوایای ۰ درجه و ۱۸۰ درجه افقی و زاویه شیب ۹۰ درجه (حالت ایستاده قائم) انجام پذیرفت تا بتوان بادشکن ایستاده قائم را با حالت شیب‌دار مقایسه کرد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد استفاده از بادشکن در حالت استقرار شیب‌دار تأثیر بیشتری بر کاهش میانگین سرعت باد نسبت به حالت قائم دارد.



شکل ۱۲. شماتیک سطح در نظر گرفته شده بر روی چاه نیمه ۴ (Google Map)