

## استفاده از صفحات خورشیدی شناور به عنوان بادشکن به منظور کاهش تبخیر و تولید انرژی با استفاده از مدل سازی ANSYS FLUENT (مطالعه موردی: چاه نیمه شماره ۴ سیستان)

سید آرمان هاشمی منفرد<sup>۱\*</sup>، مهدی رضاپور<sup>۲</sup>، حجت رضاپور<sup>۳</sup>، مهدی اژدری مقدم<sup>۱</sup>

۱. دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

۲. استادیار دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی، چابهار

۳. دانشجوی مهندسی مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۳/۱۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۷/۲۵)

### چکیده

تبخیر فرایندی است که به تغییر سیال از حالت مایع به گاز می انجامد. میزان تبخیر از سطوح آزاد به عواملی همچون دما، سرعت باد، عمق آب و فشار بخار بستگی دارد. بررسی دقیق اطلاعات دریافتی از اداره هواشناسی زهک (واقع در جنوب شرقی شهرستان زابل) نشان داد که دما و سرعت باد در این منطقه تأثیرگذارترین عوامل پدیده تبخیر هستند و جالب اینکه اصلی ترین عامل آن، سرعت زیاد باد تشخیص داده شد. روش های متعددی برای مقابله با پدیده تبخیر وجود دارد که استفاده از پوشش های فیزیکی و بادشکن از آن جمله است. بر اساس تحقیقات پیشین، بهترین جذب نور خورشید برای تولید بیشترین توان در نیمکره شمالی به سمت جنوب است. استفاده از صفحات خورشیدی، هم زمان به عنوان پوشش فیزیکی برای کاهش تبخیر و تولید انرژی بسیار بررسی شده است. به منظور مدل سازی میزان جریان عبوری از روی صفحات خورشیدی و زاویه قرارگیری افقی و عمودی برای به دست آوردن بهترین کاهش تبخیر، از نرم افزار مدل سازی ANSYS FLUENT 16 و از طریق تعیین بهترین زاویه افقی و عمودی برای به دست آوردن بهترین بازده خروجی استفاده شد. نتایج نشان می دهد در صورت طراحی صفحات خورشیدی با ابعاد ۲/۵×۲/۵ متر تحت زاویه، زاویه افقی صفر درجه (جهت شمال غرب، روبه روی مسیر وزش باد) و زاویه شیب ۶۰ درجه به میزان کاهش تبخیری معادل ۹۰/۲۵ درصد به دست خواهد آمد. همچنین، بیشترین راندمان تولید انرژی تحت زاویه افقی ۳۰ درجه (جهت شمال غرب، روبه روی مسیر وزش باد) و زاویه شیب ۳۰ درجه به میزان ۹۹/۴۵ درصد است. با توجه به داده های موجود، بهینه ترین حالت ممکن، زاویه افقی ۳۰ درجه (جهت شمال غرب، روبه روی مسیر وزش باد) و زاویه شیب ۳۰ درجه به میزان کاهش تبخیری معادل ۷۱/۳۶ درصد و بازده تولید انرژی به میزان ۹۹/۴۵ درصد نسبت به حالت ایده آل است.

**کلیدواژگان:** تولید انرژی، زاویه شیب و افقی، صفحات خورشیدی، کاهش تبخیر، مدل FLUENT ANSYS.

## مقدمه

آب از منابع مهم طبیعی است که تحقیقات فراوانی برای حفظ و نگهداری آن صورت گرفته است. تبخیر از عوامل مهم و اصلی در امر ازدست‌دادن منابع آبی است. روش‌های مختلفی برای کاهش تبخیر وجود دارد که عبارت‌اند از: ۱. شیمیایی (ستیل و استریل‌الکل حل‌شده در اتانول)؛ ۲. فیزیکی (صفحات پلی‌اتیلن)؛ ۳. بیولوژیکی (پوشش گیاهی روی سطح آب)؛ ۴. مکانیکی (پوشش‌های شناور) [۱]. هفلسر و همکارانش در سال ۲۰۰۹ تحقیقی را به منظور شبیه‌سازی اثر بادشکن‌های طبیعی بر میزان تبخیر آب از سد ویونهو که روی رودخانه بریزبین ساخته شده است، انجام دادند. در تحقیق یادشده سه ارتفاع مختلف ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری برای درختان بادشکن در نظر گرفته شد که همه موانع تخلخل یکسان داشتند. بادشکن‌ها به صورت موازی با طول سد قرار داده شدند و جهت وزش باد طوری تعیین شد که عمود بر خط بادشکن‌ها باشد. نتایج نشان داد کاهش در سطوح تبخیر سالانه برابر با ۲/۵، ۳/۶ و ۵/۶ درصد می‌تواند به ازای بادشکن‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری به دست آید [۲]. استفاده از پوشش‌های فیزیکی و بادشکن‌ها به عنوان یک روش مؤثر برای تضعیف امواج جریان ورودی محسوب می‌شود. بیتوک و همکارانش (۲۰۱۲) به کمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، خصوصیات جریان در اطراف درختان بادشکن را بررسی کردند. هدف از پژوهش یادشده، پیش‌بینی میزان تأثیر شکاف‌های موجود بین درختان و ردیف قرارگیری درختان و چیدمان آنها به منظور کاهش سرعت باد بوده است. نتایج شبیه‌سازی بیان می‌کند که عامل بسیار مهم در میزان اثرگذاری درختان به عنوان بادشکن، اندازه فاصله شکاف درختان است. همچنین، نوع آرایش درختان یعنی به صورت دو ردیف در میان، در مقایسه با نوع آرایش یک ردیف و یا دو ردیف، مؤثرترین روش به منظور کاهش سرعت باد است [۳]. گینسولیس و همکارانش در سال ۲۰۱۵ با استفاده از مدل تحلیلی ترکیبی CFD به طراحی نوعی صفحه بادشکن که تکیه‌گاه الاستیک داشتند، پرداختند و نتایج به دست‌آمده را با صفحاتی که از تکیه‌گاه گیره‌دار استفاده شده بودند، مقایسه کردند و دریافتند که صفحات دارای تکیه‌گاه الاستیک، نیروهای باد و تنش‌های به دست‌آمده از باد روی بادشکن را به اندازه درخور توجهی کاهش داده است [۴]. امروزه، به دلیل روند رو به رشد تولید انرژی‌های فسیلی و

تولید انرژی برق به روش‌های سنتی، منابع سوخت فسیلی رو به پایان است. به همین منظور، امیدوارکننده‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی است [۵]. انرژی خورشیدی می‌تواند کیفیت زندگی را بهبود بخشد و وابستگی به انرژی‌های سنتی را، که عامل مهمی در آلوده‌کردن و گرم‌شدن کره زمین هستند، کاهش دهد. صفحات خورشیدی دستگاه‌های رایج برای جمع‌آوری انرژی خورشیدی هستند. برای تعادل بین پایداری و انعطاف‌پذیری، برآورد دقیق از بارهای باد برای صفحات خورشیدی، ضروری است [۶]. استفاده از فوتولتاییک به عنوان منبع انرژی تجدیدپذیر نوظهور موجب شده تا نگرانی‌هایی از جمله هزینه‌های اضافی برای سیستم برق به علت متغیربودن خروجی به کمترین حد خود برسد. مهم‌ترین راهکار برای کاهش هزینه‌ها، می‌تواند تغییرات صفحات خورشیدی در مکان‌های مختلف باشد. به طور خاص، زاویه افقی و شیب می‌تواند بر میزان تولید اثر بگذارند [۷]. مندل و همکارانش در سال ۲۰۰۷ به پژوهش درباره تأثیر گرایش آرایه و جهت‌گیری بر عملکرد یک شبکه فوتولتاییک متصل به شبکه پرداختند. تأثیر جهت‌گیری سطح صفحات و تمایل به عملکرد سیستم شبکه در شرایط اقلیمی دریایی با استفاده از نرم‌افزار TRANSYS شبیه‌سازی شد. حداکثر خروجی صفحات به صورت سالانه، فصلی و ماهانه برای زوایای افقی و عمودی تعیین شد و دریافتند که بیشترین خروجی برای زاویه عمودی صفحات خورشیدی تحت زاویه ۳۰ درجه به سمت جنوب و کمترین خروجی برای زاویه عمودی ۹۰ درجه در جهت شرق یا غرب به نسبت جنوب بوده است. زاویه عمودی بهینه برای به حداکثر رساندن خروجی بین ۱۰ تا ۷۰ درجه متغیر بوده و میزان تولید نیرو هر چه از سمت جنوب به سمت شرق می‌رود، از ۹ درصد به ۴۲/۵ درصد کاهش تولید انرژی خواهد داشت [۸]. مهرداد شادمان و همکارانش از طریق شبیه‌سازی CFD میزان نیروی باد روی زوایای مختلف صفحات خورشیدی را ارزیابی کردند. آنها با استفاده از عدد رینولدز در شبیه‌سازی جهت‌های مختلف زاویه‌های شیب و آزیموت دریافتند که صفحات پایینی در یک صف، در شرایط بارگذاری بحرانی‌اند [۹]. اسپوینگشاکل و همکارانش تأثیر دما بر صفحات خورشیدی را بررسی کردند. سپس، با بررسی اثر خنک‌کننده باد روی مقدار راندمان صفحات خورشیدی دریافتند که سلول‌های خورشیدی از اثر باد بسیار تأثیر می‌پذیرند. بنابراین،

پژوهشگران یادشده نتیجه گرفتند که استفاده از داده‌های باد در فرمول‌ها، سبب بهبود روش‌های استاندارد خواهد شد [۱۰]. گکمن و همکارانش در سال ۲۰۱۶ اثر خنک‌کننده باد روی صفحات خورشیدی در مناطق بادخیز را بررسی کردند. آنها تأثیر مثبت باد را در خنک‌کردن صفحات خورشیدی ثابت کردند و گفتند که در صورت نادیده‌گرفتن، حدود ۳/۵ درصد انرژی سالانه کاهش می‌یابد. بنابراین، تیم تحقیقاتی یادشده تأکید بسیار روی اثر باد بر میزان خروجی داشتند [۱۱]. با توجه به کمبود سوخت‌های فسیلی، توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر توجه زیادی را در سراسر جهان به خود جلب کرده است. انرژی خورشیدی به عنوان یکی از منابع مهم انرژی تجدیدپذیر پتانسیل بسیار زیاد و کاربرد گسترده‌ای دارد، زیرا پاک، آزاد و فراوان است. انرژی خورشیدی می‌تواند مستقیماً از طریق صفحات خورشیدی به برق تبدیل شود و فریم شیب صفحات خورشیدی به طور درخور توجهی بر میزان خروجی تأثیر گذارد. بنابراین، بسیاری از تحقیقات در دهه‌های گذشته روی الگوریتم بهینه‌سازی زاویه شیب برای به حداکثر رساندن خروجی صفحات خورشیدی متمرکز شده است. به‌طور کلی، زاویه شیب مطلوب با شرایط مختلفی مانند دوره بهره‌برداری، عرض جغرافیایی، آب و هوا، محیط و عوامل دیگر جغرافیایی، مانند گردوغبار و آلودگی هوا تأثیرگذار است [۱۲]. ساهو و همکارانش در سال ۲۰۱۶ روی نیروگاه فوتوولتاییک شناور تحقیقاتی انجام دادند. آنها بر این باور بودند که فناوری شناور کردن صفحات خورشیدی یک گام نوآورانه است، زیرا میزان تولید انرژی صفحات خورشیدی در مقایسه با نصب صفحات خورشیدی روی زمین متفاوت است. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد راندمان نیروگاه شناور خورشیدی ۱۱ درصد بیشتر می‌شود و میزان تبخیر تا ۷۰ درصد کاهش می‌یابد، در صورتی که سرمایه‌گذاری نیروگاه خورشیدی شناور ۱/۲ درصد بیشتر از نیروگاه خورشیدی معمولی خواهد بود [۱۳]. وان و همکارانش در سال ۲۰۱۶ روی بهینه‌سازی قدرت و جرم صفحات خورشیدی هیبریدی و ژنراتورهای حرارتی الکتریکی مطالعه کردند. این گروه با استفاده از ژنراتورهای ترمودینامیکی (TEG) که به دلیل بی‌صدا و پاک بودن، به عنوان یک منبع برق الکتریکی که در بسیاری از کاربردهای زمینی استفاده شده مورد توجه قرار گرفته است، دریافتند که سیستم بهینه PV/TEG کارایی بهتری دارد و با

استفاده از الگوریتم ژنتیک NSGA-2 در طراحی سیستم TEG که به منظور خنک کردن صفحات خورشیدی صورت گرفته، توان الکتریکی بیشتری خواهد داشت [۱۴]. یکی از عوامل محیطی که بر میزان راندمان صفحات تأثیر می‌گذارد، گردوغبار است. زایهیدی و همکارانش در سال ۲۰۱۶ روی علت و چگونگی میزان تأثیر منفی گردوغبار بر صفحات خورشیدی مطالعه کردند. گردوغبار می‌تواند روی کارایی صفحه خورشیدی تأثیر بگذارد یعنی با ایجاد آسیب‌های فیزیکی، ممانعت از رسیدن تابش خورشیدی و افزایش دما، به تغییر ویژگی‌های الکتریکی صفحات منجر شود. میزان تخریب به طور عمده به تراکم گردوغبار بستگی دارد. تجمع ۲۰ گرم بر مترمربع گردوغبار روی جریان الکتریکی کوتاه، جریان ولتاژ و بازده صفحه خورشیدی به ترتیب ۱۵-۲۱، ۲-۶ و ۱۵-۳۵ درصد را کاهش می‌دهند [۱۵]. پنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ روی خنک‌کردن صفحات خورشیدی برای بهینه‌سازی بازده انرژی تحقیقاتی انجام دادند. آنها دریافتند که میزان دما، تأثیر بسیار زیادی بر خروجی و کارایی برق دارد. آنها با استفاده از یک سیستم خنک‌کننده به منظور خنک‌کردن صفحات خورشیدی، به افزایش ۳۵ درصدی بازده دست یافتند [۱۶]. تاباودا و همکارانش در سال ۲۰۱۷ روی سیستم گرمایش خورشیدی و پوشش شناور فوتوولتاییک به منظور کاهش تبخیر، به وسیله نتایج تجربی و مدل‌سازی، تحقیقاتی انجام دادند. آنها با ایجاد یک حوضچه همراه با پوشش شناور (صفحات خورشیدی) برای کاهش تبخیر، که به میزان ۹۰ درصد کاهش تبخیر تحت زاویه صفر درجه دست یافتند. همچنین، با استفاده از سلول‌های فوتوولتاییک به عنوان نوعی پوشش شناور، توانستند ۶۸ وات بر مترمربع برق تولید کنند [۱۷].

بررسی‌ها نشان می‌دهند مطالعات زیادی درباره استفاده از صفحات خورشیدی انجام شده که بیشتر برای افزایش بازده بوده است، ولی این صفحات در شرایط آب و هوایی خاص، به طور مثال در شرایط بادهای شدید، بررسی نشده است. همچنین، از صفحات خورشیدی به عنوان بادشکن برای کاهش سرعت باد و در نتیجه کاهش میزان تبخیر استفاده نشده است. در مقاله حاضر، استفاده ویژه‌ای از صفحات خورشیدی شده است. هدف اصلی تحقیق حاضر، بررسی چگونگی عملکرد صفحات خورشیدی برای کنترل سرعت باد تحت زوایای مختلف

در خور توجه و مؤلفه نگران کننده‌ای برای منطقه مد نظر است. تأثیر این میزان تبخیر روی کمیت آب موجود در منطقه، سبب تأثیر روی کیفیت آب منطقه شده است. در تحقیق حاضر چاه نیمه چهارم به عنوان منطقه مطالعه شده در نظر گرفته شده است (شکل ۱). تنها منبع تأمین آب دشت سیستان، مخزن‌های چاه نیمه هستند که به صورت چهار مخزن ذخیره آب در جنوب شرقی منطقه سیستان واقع شده‌اند. چاه نیمه‌های ۱-۳، شامل سه گودال طبیعی بزرگ می‌شوند. این فرورفتگی‌ها در مجاورت مرز ایران و افغانستان در کنار رودخانه هیرمند قرار دارند، که به منظور ذخیره‌سازی آب مازاد رودخانه سیستان از آنها استفاده شده است. این دریاچه‌ها در ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی زابل و در غرب رودخانه سیستان قرار دارند. ظرفیت مخازن سه‌گانه چاه نیمه حدود ۶۶۰ میلیون مترمکعب است. ظرفیت مفید مخازن یادشده ۳۴۰ میلیون مترمکعب و سطح محصور در بیشترین تراز آب در مجموع سه مخزن ۴۷ کیلومترمربع است. برای افزایش ظرفیت مخازن چاه نیمه‌ها، مخزن ۴ با احداث سد چاه نیمه چهارم به ظرفیت ۸۲۰ میلیون مترمکعب برای تأمین آب کشاورزی منطقه در سال‌های اخیر، احداث شد [۲۰]. پس از بررسی‌های صورت گرفته روی عوامل مؤثر بر تبخیر در منطقه، این نتایج به دست آمد که مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار: دما، سرعت باد و رطوبت در منطقه‌اند. بنابراین، اطلاعات یک‌ساله‌ای از عوامل مؤثر بر تبخیر در منطقه از ایستگاه هواشناسی زهک جمع‌آوری شده است که پس از آنالیز داده‌ها و ارائه چندین رابطه خطی به وسیله نرم‌افزار SPSS، رگرسیون خطی زیر (رابطه ۴) به‌عنوان بهترین رابطه برای تبخیر معرفی شد [۲۱].

$$E = -1/452 + (0/464 * T) + (0/686 * W) - (0/102 * M) \quad (4)$$

- T دما بر حسب سانتی‌گراد
- W سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه
- M میزان رطوبت نسبی

با توجه به رابطه ۴، می‌توان دریافت که سرعت باد و دما رابطه مستقیم با تبخیر دارند، به این معنا که هرچه سرعت باد و یا میزان دما افزایش یابد، میزان تبخیر نیز زیاد می‌شود. همچنین، از رابطه ۴ می‌توان دریافت که بین میزان تبخیر و میزان رطوبت نسبی رابطه عکس وجود

عمودی و افقی و تأثیر آن بر میزان کاهش تبخیر و نیز ارزیابی میزان تولید انرژی بوده است. مدل‌سازی این شرایط با نرم‌افزار ANSYS FLUENT صورت گرفته که تمامی شرایط حاکم بر منطقه در آن مدل‌سازی شده است. در نتیجه، با به‌دست آوردن میزان کاهش سرعت باد با توجه به زوایای افقی و شیب، داده‌های میزان انرژی خروجی صفحات خورشیدی با توجه به زوایای یکسان، نمودار بهینه میزان کاهش تبخیر و خروجی توان به دست آمده است.

### روش‌های انجام پژوهش و منطقه مطالعه شده

#### مشخصات عددی

برای انجام تحقیق حاضر از نرم‌افزارهای تحلیل جریان‌های دو و سه‌بعدی که در زمینه دینامیک سیالات کاربردهای فراوانی دارند، استفاده شده است. یکی از نرم‌افزارهای قوی در این زمینه ANSYS FLUENT است. این نرم‌افزار از معادلات ناویر استوکس در تحلیل جریان استفاده می‌کند، اما اگر جریان آشفته باشد، معادلات حاکم به معادلات رینولدز تغییر ماهیت داده و از مدل‌های یک‌معادله‌ای تا پنج‌معادله‌ای استفاده می‌شود [۱۸].

فرم کلی معادلات به شکل روابط ۱-۳ است:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\phi} \rho d\phi + \iint_S \rho \vec{V} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (1) \text{ معادله پیوستگی}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\phi} U d\phi + \iint_S \vec{F} \cdot d\vec{S} = \iint_S Q_v d\phi + \iint_S Q_s \cdot d\vec{S} \quad (2) \text{ معادله مومنتوم}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\phi} E_i d\phi + \iint_S \vec{E}_i \vec{V} \cdot d\vec{S} = \iint_{\phi} (\rho \vec{q} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V}) d\phi \quad (3) \text{ معادله انرژی}$$

#### منطقه مطالعه شده

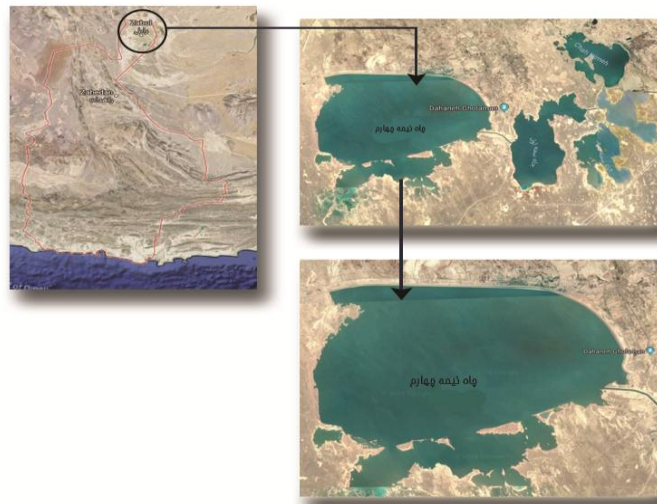
منطقه سیستان، با توجه به تلاقی دو کویر لوت و باخترا خراسان، خشک و بیابانی محسوب می‌شود. از خصوصیات بارز آب و هوایی این منطقه می‌توان به زیادبودن مقدار زمانی تشعشع خورشید، فاصله فراوانی دامنه تغییرات دمای روزانه و فصلی، رطوبت کم، تبخیر زیاد، بارندگی کم و پراکنده، بادهای شدید همراه با گردوغبار و توفان شن اشاره کرد [۱۹]. میزان تبخیر سالانه آب از چاه نیمه‌های سیستان برابر ۳۵۵ میلیون مترمکعب است که این میزان

مشکل است، بنابراین انجام مدل‌سازی از طریق تشابه دینامیکی صورت گرفت و ابعاد و هندسه کوچک شد. تشابه دینامیکی فقط در شرایطی عملی است که بین نمونه تحقیقاتی و نمونه اصلی تشابه هندسی و سینماتیکی برقرار باشد. تشابه رینولدز یکی از انواع تشابه دینامیکی است. با استفاده از تشابه رینولدز می‌توان هندسه و نیز سرعت حدودی برای راحتی در کار مدل‌سازی را تغییر داد [۲۲]. به دلیل محدود بودن سخت‌افزار برای مدل‌سازی کل چاه نیمه و بررسی حرکت باد در مقابل صفحات خورشیدی، از طریق تشابه رینولدز [۲۳] با مقیاس  $\frac{1}{20}$  ابعاد کوچک شده و بر اساس بیشترین سرعت باد که توسط ایستگاه هواشناسی زهک به ثبت رسیده است، در مقیاس  $\frac{1}{20}$ ، سرعت به ۳۸۰ متر بر ثانیه تغییر می‌کند.

دارد، یعنی هرچه میزان رطوبت نسبی افزایش یابد، مقدار تبخیر کاهش می‌یابد. اما نکته پراهمیت در رابطه ۴ این است که عامل سرعت باد ( $W$ ) بزرگ‌ترین ضریب را دارد (۰/۶۸۶)، این موضوع بیان می‌کند که در منطقه مطالعه شده مهم‌ترین عامل در تبخیر، سرعت باد است.

### شبیه‌سازی عددی جریان تشابه هیدرولیکی

در مقاله حاضر، اولویت‌بندی کاهش تبخیر و تولید انرژی یکسان در نظر گرفته شده است، با توجه به تأسیسات مشابه و با در نظر گرفتن فرمول‌های تجربی و تئوری در هیدرولیک، ابعاد را باید محاسبه کرد. قوانین تشابه در قالب تشابه هندسی، تشابه سینماتیکی و دینامیکی بیان می‌شوند. با توجه به اینکه مدل‌سازی چاه نیمه‌ها بسیار



شکل ۱. منطقه مطالعه شده (چاه نیمه چهارم سیستان، Google Map)



شکل ۲. پلان محدوده جریان در نظر گرفته شده چاه نیمه چهارم (Google Map)

بادشکن (صفحات خورشیدی) در فاصله ۰/۵ متری از ورودی یعنی 30H (ارتفاع بادشکن) قرار گرفته است (شکل ۳ و جدول ۱).

در گام بعد باید پارامترهای شرایط مرزی را اعمال کرد، به طور مثال برای ورودی VELOCITY INLET و برای خروجی PRESSURE OUTLET در نظر گرفته می‌شوند. برای تکمیل فرایند شبیه‌سازی و آماده‌سازی مدل برای تحلیل و آنالیز، در مرحله آخر باید عملیات مش‌زنی انجام شود (شکل ۴). هرچه ابعاد مش کوچک‌تر باشد، دقت تحلیل صورت‌گرفته به بیشترین حالت خود می‌رسد. سپس، در نرم‌افزار ANSYS FLUENT باید میزان سرعت ورودی، نوع سیال، ویژگی‌های سیال، نوع معادله آشفتگی به صورت دستی وارد شود. بیشترین سرعت باد در منطقه ۱۹ متر بر ثانیه است که با توجه به مقیاس ۱ به ۲۰ این عدد برابر با ۳۸۰ متر بر ثانیه تبدیل می‌شود. بنابراین، برای اعمال شرایط مرزی در قسمت VELOCITY INLET مقدار سرعت را ۳۸۰ متر بر ثانیه و در جهت محور X تعریف می‌کنیم.

تشابه رینولدز به صورت روابط ۵-۷ است:

$$(Re)_m = (Re)_p \quad (5)$$

$$V_m \times L_m = V_p \times L_p \quad (6)$$

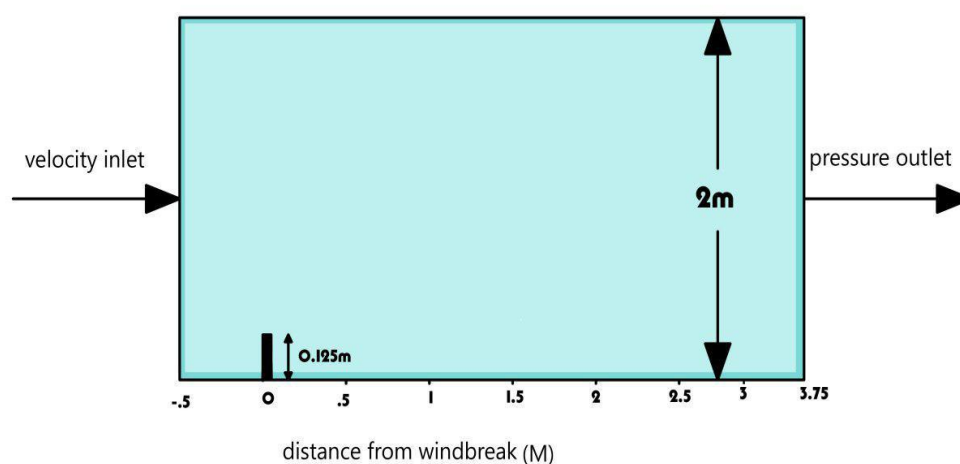
$$V_m = V_p \times \left(\frac{L_p}{L_m}\right) = 19 \times 20 = 380 \text{ m/s} \quad (7)$$

#### شبیه‌سازی

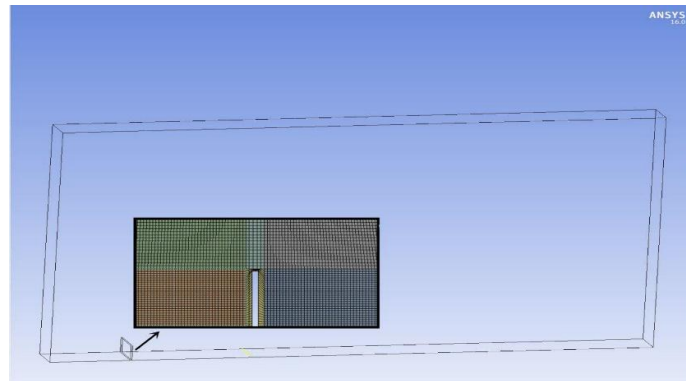
بر اساس تحقیقات یائو و همکارانش در سال ۱۹۹۵ ارتفاع محدوده جریان باید حداقل هشت برابر ارتفاع بادشکن (صفحات خورشیدی) در نظر گرفته شود. در پژوهش یادشده ارتفاع بادشکن (صفحات خورشیدی) ۲/۵ متر است که با مقیاس  $\frac{1}{20}$ ، ارتفاع آن ۰/۱۲۵ متر می‌شود [۲۴]. طول محدوده جریان که دومین پارامتر مهم است مانند ارتفاع محدوده جریان نباید تأثیری بر روی سرعت ورودی جریان باد داشته باشد. یعنی طول محدوده جریان به اندازه‌ای باشد که سبب به وجود آمدن گردابه و فشردگی هوا در انتهای محدوده جریان نباشد. در پژوهش حاضر کل طول جریان از ۰/۵- متر تا ۳/۷۵ متر است که محل قرارگیری

جدول ۱. تعیین ارتفاع و محدوده جریان

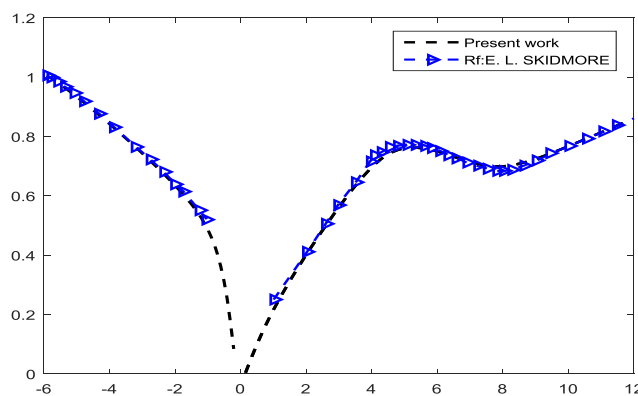
ارتفاع بادشکن در واقعیت (برحسب متر)	ارتفاع بادشکن در مقیاس $\frac{1}{20}$ (متر)	طول محدوده جریان (متر)	ارتفاع محدوده جریان (متر)
۲/۵	۰/۱۲۵	۳/۷۵	۲



شکل ۳. محدوده جریان و بادشکن صلب شبیه‌سازی شده در ANSYS FLUENT



شکل ۴. مش انتخاب شده در نرم افزار ANSYS FLUENT



شکل ۵. مقایسه پروفیل سرعت باد بین تحقیق حاضر و اسکیمور و هاگن [۲۵]

گرفته شده و پروفیل سرعت آن با توجه به داده‌های موجود رسم شده است [۲۵]. با توجه به نتایج مدل‌سازی (شکل ۵) این موضوع قابل فهم است که صحت نسبی بسیار خوب و دقیق صورت گرفته که بیان‌کننده دقت و صحت کار است. میزان خطای نسبی ۱/۲۴۳ درصد، نشان‌دهنده دقت زیاد کار است. این میزان خطا به علت ارتفاع و طول جریان در مدل عددی است.

#### نتایج تحقیق

در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی جریان باد پس از صفحات خورشیدی به عنوان بادشکن و تولیدکننده انرژی الکتریکی صورت پذیرفته است. علت ایجاد اغتشاش هوایی، وجود مانع متراکم مقابل جریان باد بوده و جریان هوا برای رسیدن به ناحیه کم‌فشار در منطقه پشت به باد صفحات خورشیدی، ناچار به ایجاد اغتشاش در جریان هوا خواهد بود. با توجه به شکل ۶، سرعت‌های زیاد باد فقط در نواحی بالای بادشکن رخ می‌دهد، یعنی در بالای بادشکن باد به

همان‌طور که قبلاً گفته شد، مدل آشفتگی K-ε-RNG و SST , K-Omega برای صفحات خورشیدی به منظور شبیه‌سازی جریان باد روی سطح چاه نیمه به عنوان آخرین گام حل نرم‌افزار در نظر گرفته شده است. بعد از آغاز عملیات تحلیل مدل توسط ANSYS FLUENT، اگر نتایج همگرا شود، چنین معنا می‌دهد که مش انتخابی مناسب است، در غیر این صورت باید مش‌زنی تغییر داده شده و دوباره مسئله حل شود.

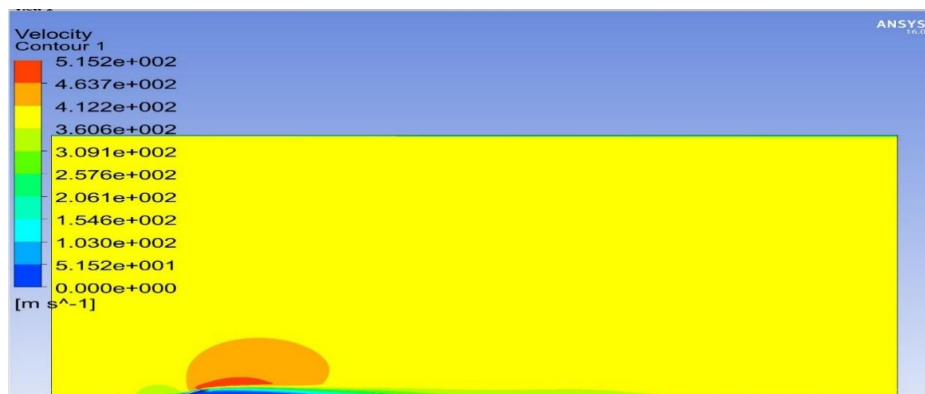
#### صحت‌سنجی

در پایان شبیه‌سازی عددی، نکته مهمی که به جای می‌ماند، صحت و دقت آزمایش است. برای اینکه دقت نرم‌افزار و مدل بررسی شود باید نتایج مدل‌سازی را با نتایج یک مدل آزمایشگاهی مقایسه کرد. در تحقیق حاضر از کار تجربی اسکیمور و هاگن در سال ۱۹۶۹ برای اعتبارسنجی استفاده شده است. در مقاله حاضر میزان سرعت برای بادشکن به ارتفاع ۲/۴۴ متر در ارتفاع ۱/۴۲ متری از سطح زمین به میزان ۴/۳۶ متر بر ثانیه در نظر

عرض مدل) را محاسبه کرد و سپس میانگین سرعت را در راستای X (طول جریان) به دست آورد. با توجه به میزان تولید انرژی همراه با بهترین میزان راندمان ممکن، نیاز است که در انتخاب بهترین زاویه به هر دو فاکتور میزان کاهش تبخیر و تولید انرژی همراه با بهترین راندمان توجه شود. به همین دلیل در پژوهش حاضر، تبخیر و تولید انرژی با اولویت برابر در نظر گرفته شده است.

در تحقیق حاضر زوایای افقی (Azimuth) و شیب (Tilt Angle) مختلف مدل سازی شد. روند تغییرات سرعت باد با توجه به زوایای مختلف زاویه شیب و زاویه افقی صفحات خورشیدی و همچنین میزان کاهش تبخیری که با توجه به این تغییرات در منطقه چاه نیمه سیستم (شمال استان سیستان و بلوچستان) رخ خواهد داد، در جدول ۲ آمده است.

سمت بالا منحرف شده و خطوط جریان هوا فشرده می‌شوند. این روند در زوایای مختلف تقریباً یکسان اتفاق می‌افتد. از آنجا که سیالات تمایل دارند بعد از هر ناپایداری به حالات پایداری خود برسند، باد بعد از پیمودن مسافتی بعد از صفحه خورشیدی رفته‌رفته جریان به حالت پایدار خود نزدیک می‌شود تا جایی که در انتهای مدل به شرایط اولیه خود باز می‌گردد.  $9H$  (ارتفاع صفحه خورشیدی) بعد از صفحه خورشیدی روند کاهش سرعت تمام می‌شود و سرعت به بیشترین حد خود یعنی  $380$  متر بر ثانیه باز می‌گردد. بنابراین، برای حفظ اثر کاهش تبخیر نیاز است تا قبل از  $9H$  از یک ردیف صفحه خورشیدی دیگر استفاده شود. برای به دست آوردن میانگین سرعت جریان بعد از صفحه خورشیدی، ابتدا باید میانگین سرعت در راستای Z



شکل ۶. پروفیل سرعت باد برای پنل خورشیدی (زاویه آزیموت  $30^\circ$  و زاویه شیب  $30^\circ$  درجه)

جدول ۲. میزان کاهش تبخیر در هر مترمکعب در مدت یک سال

زاویه افقی (درجه)	زاویه شیب (درجه)	سرعت باد (متر بر ثانیه)	کاهش تبخیر (میلی‌متر در یک سال، مترمربع)	درصد نسبی میزان کاهش تبخیر در هر مترمربع در یک سال (نسبت به ایده‌آل)
۰	۳۰	۶/۱۳	۳۲۲۲/۵۱۹۳	۷۶/۲۱
۰	۴۵	۷/۴۶	۲۸۸۹/۵۰۰۶	۶۸/۳۴
۰	۶۰	۳/۷۶	۳۸۱۵/۹۴۳۶	۹۰/۲۵
۰	۹۰	۱۰/۲۸	۲۱۸۳/۴۰۰۸	۵۱/۶۴
۳۰	۳۰	۶/۹۵	۳۰۱۷/۱۹۹۵	۷۱/۳۶
۳۰	۴۵	۴/۲۱	۳۷۰۳/۲۶۸۱	۸۷/۵۸
۳۰	۶۰	۴/۱۳	۳۷۲۳/۲۹۹۳	۸۸/۰۶
۴۵	۳۰	۷/۷۶	۲۸۱۴/۳۸۳۶	۶۶/۵۶
۴۵	۴۵	۵/۶	۳۳۵۲/۲۲۶	۷۹/۳۵
۴۵	۶۰	۸/۱	۲۷۲۹/۲۵۱	۶۴/۵۵
۶۰	۳۰	۵/۸۴	۳۲۹۵/۱۳۲۴	۷۷/۹۳
۶۰	۴۵	۳/۸۲	۳۸۰۰/۹۲۰۲	۸۹/۸۹
۶۰	۶۰	۷/۸۶	۲۷۸۹/۳۴۴۶	۶۵/۹۷



انرژی انجام داده‌اند. میزان تغییرات بازده و تولید انرژی طی یک سال در جدول ۳ آورده شده است [۸].

همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، بهترین بازده و بیشترین تولید انرژی در هر مترمربع طی یک سال، آزیموث ۳۰ درجه (جهت شمال غرب، با توجه به عمود بر راستای وزش باد) و زاویه شیب ۳۰ درجه یعنی ۱۴۵/۲ کیلووات بر ساعت به ازای هر مترمربع میزان تولید انرژی است. با توجه به برابری زوایا با بیشترین تأثیر بر کاهش تبخیر و تولید انرژی با بازده فراوان، امکان انتخاب بهترین حالت برای بیشترین کاهش تبخیر و تولید انرژی، به طور هم‌زمان فراهم نیست. به این دلیل با استفاده از بهینه‌سازی، بهترین حالت ممکن به دست آمده است که در جدول ۴ قابل مشاهده است.

با توجه به نتایج مدل‌سازی (جدول ۲)، بهترین زاویه انتخابی صفحات خورشیدی فقط برای کاهش تبخیر افقی صفر درجه (جهت شمال غرب، عمود بر راستای مسیر وزش باد) و زاویه شیب ۶۰ درجه است. این حالت سبب بیشترین مقدار متوسط کاهش تبخیر ۹۰/۲۵ درصدی به میزان ۳۸۱۵/۹۴۳۶ میلی‌متر در سال به ازای هر مترمربع سطح اثر صفحه خورشیدی خواهد شد. این میزان درخور توجه، توجیهی بسیار خوب برای عملیاتی کردن تحقیق حاضر دارد. با توجه به اطلاعات نیروگاه خورشیدی تحقیقاتی دانشگاه سیستان و بلوچستان، برای هر مترمربع پنل، حدود ۴۰۰ وات به صورت روزانه تولید می‌شود. همچنین، مندل و همکارانش در سال ۲۰۰۷ با استفاده از نرم‌افزار TRANSIS تحقیقاتی روی میزان تأثیر تغییر زوایای شیب و افقی بر راندمان تولید

جدول ۳. میزان بازده و تولید انرژی [۱۱]

میزان تولید انرژی در یک سال (وات بر ساعت)	درصد بازده (نسبت به حالت ایده‌آل)	زاویه شیب	زاویه افقی
۱۳۹۶۳۴/۴	۹۵/۶۴	۳۰	۰
۱۳۳۷۰۶/۸	۹۱/۵۸	۴۵	۰
۱۲۱۵۷۴/۲	۸۳/۲۷	۶۰	۰
۸۲۶۳۶	۵۶/۶	۹۰	۰
۱۴۵۱۹۷	۹۹/۴۵	۳۰	۳۰
۱۴۰۶۲۷/۲	۹۶/۳۲	۴۵	۳۰
۱۲۸۸۸۱/۵	۸۸/۲۷	۶۰	۳۰
۱۲۳۹۵۴	۸۴/۹	۳۰	۴۵
۱۱۴۲۸۸/۸	۷۸/۲۸	۴۵	۴۵
۱۰۰۹۷۳/۶	۶۹/۱۶	۶۰	۴۵
۱۲۹۸۶۷	۸۸/۹۵	۳۰	۶۰
۱۲۱۶۳۲/۶	۸۳/۳۱	۴۵	۶۰
۱۰۸۸۴۳	۷۴/۵۵	۶۰	۶۰

جدول ۴. بهینه‌سازی حالت قرارگیری پنل‌ها برای اثر هم‌زمان کاهش تبخیر و تولید انرژی

Z=z1+z2	میزان تولید انرژی (جدول ۳) z2	میزان کاهش تبخیر z1 (جدول ۲)	زاویه شیب	زاویه آزیموث
۱۴۲۸۵۶/۹۱۹۳	۱۳۹۶۳۴/۴	۳۲۲۲/۵۱۹۳	۳۰	۰
۱۳۶۵۹۶/۳۰۰۶	۱۳۳۷۰۶/۸	۲۸۸۹/۵۰۰۶	۴۵	۰
۱۲۵۳۹۰/۱۴۳۶	۱۲۱۵۷۴/۲	۳۸۱۵/۹۴۳۶	۶۰	۰
۸۴۱۹/۴۰۰۸	۸۲۶۳۶	۲۱۸۳/۴۰۰۸	۹۰	۰
۱۴۸۲۱۴/۱۹۹۵	۱۴۵۱۹۷	۳۰۱۷/۱۹۹۵	۳۰	۳۰
۱۴۴۳۳/۲۶۸۱	۱۴۰۶۲۷/۲	۳۷۰۳/۲۶۸۱	۴۵	۳۰
۱۳۳۶۰۴/۱۹۹۳	۱۲۸۸۸۱/۵	۳۷۲۳/۱۹۹۳	۶۰	۳۰
۱۲۶۷۶۸/۳۸۳۶	۱۲۳۹۵۴	۲۸۱۴/۳۸۳۶	۳۰	۴۵
۱۱۷۶۴۱/۰۲۶	۱۱۴۲۸۸/۸	۳۳۵۲/۲۲۶	۴۵	۴۵
۱۰۳۷۰۲/۸۵۱	۱۰۰۹۷۳/۶	۲۷۲۹/۲۵۱	۶۰	۴۵
۱۳۳۱۶۲/۱۳۲۴	۱۲۹۸۶۷	۳۲۹۵/۱۳۲۴	۳۰	۶۰
۱۲۵۴۳۳/۵۲۰۲	۱۲۱۶۳۲/۶	۳۸۰۰/۹۲۰۲	۴۵	۶۰
۱۱۱۶۳۲/۳۴۴۶	۱۰۸۸۴۳	۲۷۸۹/۳۴۴۶	۶۰	۶۰

- [4]. Giannoulis A, Mistriotis A, Briassoulis D. Design and analysis of the response of elastically supported wind-break panels of two different permeabilities under wind load. *Biosystems Engineering* 129 (2015)57 e69.
- [5]. Aly M A. On the evaluation of wind loads on solar panels: The scale issue. *Solar Energy* 135 (2016) 423-434.
- [6]. Hartner M, Ortner A, Hiesl A, Haas R. East to west – The optimal tilt angle and orientation of photovoltaic panels from an electricity system perspective. *Energy* 160 (2015) 94-107.
- [7]. Mondol JD, Yigzaw G, Yohanis, Norton B. The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system. *Renewable Energy* 32 (2007) 118-140.
- [8]. shademan M, hangan H. Wind loading on solar panels at different inclination angels. 11<sup>th</sup> Americans Conference on Wind Engineering. San Juan, Puerto Pico, Jun 22-26, 2009.
- [9]. Schwingshackla C, Petittaa M, Wagner LE, Belluardo G, Moser D, Castelli M, Zebischa M, Tetzlaff A. Wind effect on PV module temperature: Analysis of different techniques for an accurate estimation, *Energy Procedia* 40 (2013) 77 – 86.
- [10]. Geokmen N, Hu W, Hou P, Chen Z, Sera D, Spataru S. Investigation of wind speed cooling effect on PV panels in windy locations. *Renewable Energy*. 90 (2016) 283e290.
- [11]. Xu R, Ni K, Hu Y, Si J, Wen H, Yu D. Analysis of the optimum tilt angle for a soiled PV panel. *Energy Conversion and Management*. 148 (2017) 100-109
- [12]. Sahu A, Yadav N, Sudhakar L. Floating photovoltaic power plant: review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 66(2016)815-824.
- [13]. Kwan TH, Wu XF. Power and mass optimization of the hybrid solar panel and thermoelectric generators. *Energy* 165 (2016) 297-307.
- [14]. Zaihidee FM, Mekhile fS, Mahmoudian MS, Horan B. Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 65(2016)1267-1278.
- [15]. Peng Z, Mohammad R. Manesh H, Liu Y. Cooled solar PV panels for output energy efficiency optimization. *Energy Conversion and Management* (2017).

بهترین حالت ممکن برای کاهش تبخیر و تولید انرژی، آزیموث ۳۰ درجه (جهت شمال غرب، عمود بر راستای وزش باد) و زاویه شیب ۳۰ درجه به میزان  $Z=148214/1995$  است.

### نتیجه گیری

با توجه به جدول های ۲ و ۳، بیشترین کاهش تبخیر یعنی زاویه آزیموث صفر درجه (جهت شمال غرب، عمود بر راستای وزش باد) و زاویه شیب ۶۰ درجه به میزان  $3815/9436$  میلی متر در سال به ازای هر مترمربع سطح اثر صفحات خورشیدی است. همچنین، بیشترین تولید انرژی نسبت به حالت ایده آل (زاویه افقی ۱۸۰ درجه رو به جنوب) یعنی زاویه آزیموث ۳۰ درجه (جهت شمال غرب، عمود بر راستای وزش باد) و زاویه شیب ۳۰ درجه به ازای هر مترمربع به میزان  $145/2$  کیلووات بر ساعت است. با توجه به جدول ۴، بهترین حالت ممکن برای کاهش تبخیر و تولید انرژی، آزیموث ۳۰ درجه (جهت شمال غرب، عمود بر راستای وزش باد) و زاویه شیب ۳۰ درجه به میزان  $Z=148214/1995$  است. همچنین، بدترین حالت ممکن برای زاویه آزیموث صفر درجه (جهت شمال غرب، عمود بر راستای وزش باد) و زاویه شیب ۹۰ درجه به میزان  $Z=8419/408$  است. شایان یادآوری است که در پژوهش حاضر، تبخیر و تولید انرژی با اولویت برابر در نظر گرفته شده، بنابراین اولویت یکسان در نظر گرفته شده است. چنین کاری این امکان را به کارفرما می دهد تا با توجه به شرایط خاص اولویت بندی را در نظر بگیرد و بتواند از این نتایج استفاده کند. بنابراین، در نظر گرفتن تابع ارزش اقتصادی، جواب یکسانی با حالت یاد شده خواهد داشت.

### منابع

- [1]. Gozávez JJF, Pablo S, Gisbert F, Carlos M, Santafé MR, Romero FJS, Soler JBT, Puig EP. Covering reservoirs with a system of floating solarpanels: technical and financial analysis. The 16th International Congress on Project Engineering. Valencia, 11 - 13 July 2012.
- [2]. Helfer F, Zhang H, Lemckert C. Evaporation reduction by windbreaks: Overview, modelling and efficiency. Urban Water Security Research Alliance, 2009.
- [3]. Skidmore EL, Hagen LJ. Evaporation in sheltered areas as influenced by windbreak porosity. *Agricultural Meteorology*. 1970 Jan 1; 7; 363-74.

- [16]. Taboada ME, Aceres LC, Graber TA, Galleguillos HR, Cabeza LF, Rojas R. Solar water heating system and photovoltaic floating cover to reduce evaporation: Experimental results and modeling. *Renewable Energy* 105 (2017) 601e615
- [17]. <http://seminars.usb.ac.ir/cbcs/fa-ir/Page890/>
- [18]. Piri H, Ansari H. Drought study of Sistan plain and its impact on Hamoon international wetland. *Journal of Wetland Ecobiology*. Spring 2013, P63 [Persian].
- [19]. Lakzaijanpour GH R, Tabatabai M, Khandanbarani MA, Nakhaie R. Quantitative and qualitative assessment of Chah nimeh water resources. Conference and Exhibition Water Engineering. 2013 [Persian].
- [20]. Hashemi Monfared SA, Rezapour M, Zhian T. Investigation of the effect of wind breaks in decreasing reservoir evaporation using Fluent (Case Study: Chahnimeh No.4 of Sistan). *Iranian Journal of Ecohydrology*. Spring 2018, P 265 [Persian].
- [21]. Hafez AZ, Soliman A, El-Metwally KL, Ismail IM. Tilt and azimuth angles in solar energy applications – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77 (2017) 147–168.
- [22]. Jubayer CH M, Hangan H. A numerical approach to the investigation of wind loading on an array of ground mounted solar photovoltaic (PV) panels. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 153(2016)60–70
- [23]. Yao X, Zhang H, Lemckert CH. Evaporation reduction by suspended and floating covers: overview, modelling and efficiency. Urban Water Security research Alliance Technical Report No. 28, 2010.
- [24]. Bitog JP, Lee IB, Hwang HS, Shin MH, Hong SW, Seo IH, Kwon KS, Mostafa E, Pang Z. Numerical simulation study of a tree windbreak. *Biosystems Engineering*. 2012 Jan 31;111(1):40-8.