

## مدلسازی سه بعدی جریان حول کلکتور برای تعیین ضرایب آیرودینامیکی و بار دینامیک سازه

رامین مهدی پور<sup>۱\*</sup>، زهرا بنی عامریان<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۱	در میان روش های تولید برق به کمک انرژی خورشیدی، مزرعه خورشیدی با آینه های سهموی شکل دارای هزینه رقابتی با نیروگاه های دیگر می باشد. یکی از اساسی ترین بخش های طراحی این نیروگاه ها، بخش سازه کلکتورهای سهموی می باشد. در این سازه ها نیروی باد مهمترین موضوع در بحث طراحی می باشد. در این مقاله نحوه تعیین نیروی باد و عوامل موثر بر میزان نیروی پسا تشریح شده است. برای محاسبه نیروی باد از روش دینامیک سیالات محاسباتی کمک گرفته شده است. در نهایت به کمک ضرایب آیرودینامیکی تحلیل تنش وارده بر کلکتور خورشیدی محاسبه شده و سازه کلکتور در برابر این باد بررسی می شود. برای مدلسازی از هندسه سه بعدی استفاده شده این موضوع باعث می شود که اثر لبه و شیارها دقیق تر مدل گردد و پروفیل فشار در کل آینه و ممان وارده بر سازه قابل محاسبه باشد. در نهایت محاسبات تنش انجام پذیرفته است. جریانهای مورد بررسی برای سرعت های ۵، ۱۰ و ۲۰ متر بر ثانیه معادل رینولدز ۱ الی ۴ میلیون بوده است. نتایج سه بعدی نشان داده است که اثر گردابه های پشت کلکتور قابل توجه بوده و این گردابه ها باعث نوسان و ایجاد بار دینامیک قابل توجه می شود. گردابه ها باعث نوسان در ضریب پسا و برا در حدود ۱۶/۴ درصد می شود و عدم مد نظر قرار دادن این موضوع باعث می شود که بار دینامیک محاسبه نشده و تنش بیشینه در حدود ۳۵/۳ درصد کمتر محاسبه گردد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴	
<b>واژگان کلیدی:</b> نیروگاه خورشیدی، نیروی آیرودینامیکی، ضرایب پسا و برا، طراحی سازه.	

### ۱- مقدمه

امروزه با افزایش تقاضا برای انرژی از یک سو و کاهش منابع فسیلی از سوی دیگر، اهمیت استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر را بیش از پیش نمایان می کند. ایران کشوری آفتابی بوده و از نظر مقدار دریافت انرژی تابشی خورشید در شمار بهترین کشورها محسوب می گردد. با عنایت به محدودیت منابع فسیلی و آلودگیهای ناشی از آنها و همچنین افزایش روز افزون تقاضای انرژی، بکارگیری تمهیداتی جهت بهره برداری بهینه از منبع سرشار انرژی خورشیدی در کشورمان امری ضروری به نظر می رسد.

نیروگاههای خورشیدی با کلکتورهای سهموی یکی از راه های استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید برق است که در بخش صنعتی صرفه اقتصادی بالایی دارد. در نیروگاه های خورشیدی استفاده از جمع کننده ها یا کلکتورهای سهموی خطی به دلیل راندمان بالا و نحوه گردش سیال انتقال دهنده حرارت بسیار متداول می باشند. کلکتورهای سهموی در این دهه توجه بسیاری را به خود جلب کرده است.

مدل ساده شده ی نیروگاه حرارتی خورشیدی با آینه های متمرکز کننده<sup>۲</sup> در شکل (۱) نشان داده شده است. طرح

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mehdiipour@tafreshu.ac.ir

۱. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش - تفرش  
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش - تفرش

<sup>2</sup> CSP (Concentrating solar power plant)

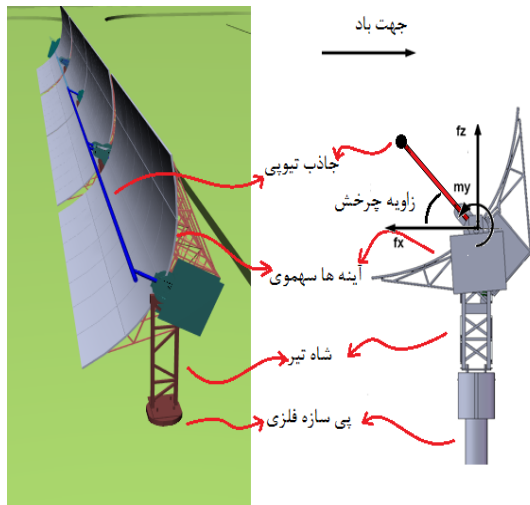
بهینه نیروگاه خورشیدی به گونه‌ای است که سطوح متمرکز کننده بزرگ، کارا (آینه‌هایی با ضریب انعکاس و تمرکز بالا) باشد که تابش دریافتی را به خوبی بر روی دریافت کننده متمرکز می‌کند و از سطح دریافت کننده کوچکی برخوردار باشد. دریافت کننده، مبدل حرارتی تابشی-همرفتی است که ضریب جذب بالا و ضریب انعکاس کوچک دارد و تا آن جایی که ممکن است شبیه جسم سیاه عمل می‌کند. به علاوه دریافت کننده‌ی ایده‌آل باید اتلافات حرارتی هدایتی و همرفتی کمی داشته باشد. در نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی، انرژی خورشیدی به سیال کاری منتقل می‌شود و سیال را به دمایی بالا می‌رساند، تا بتواند چرخه حرارتی را به کار بیندازد. معمولاً از سیستم خورشیدی در کنار نیروگاه چرخه ترکیبی و برای افزایش راندمان استفاده می‌گردد که به این مجموعه نیروگاه چرخه ترکیبی-خورشیدی گویند. با استفاده از سیستم خورشیدی، دمای روغن عبوری از خط کانونی کلکتور افزایش یافته و در مبدل‌های حرارتی که بلافاصله بعد از مزرعه خورشیدی قرار گرفته است، آب ورودی به بویلر را به بخار تبدیل می‌نمایند. لذا با این کار برای تبدیل آب به بخار در ورودی بویلر، نیاز به سوخت فسیلی کمتری می‌باشد یا در مواردی که بستگی به طراحی دارد به هیچ عنوان نیاز به سوخت فسیلی نیست. یک گردآور سهموی خطی<sup>۱</sup> دارای آینه‌ای است که اشعه‌های مستقیم خورشید را به لوله‌ی دریافت کننده واقع بر خط کانونی سهمی، متمرکز می‌کند. متمرکز کردن اشعه‌های خورشید سطح انتقال حرارت را کاهش می‌دهد و در نتیجه برآیند اتلافات حرارتی کاهش پیدا می‌کند. در مزرعه خورشیدی تعداد زیادی کلکتور سهموی نصب می‌گردد که اگر طراحی سازه به نحو مناسبی انجام پذیرد می‌تواند هزینه قابل توجهی را صرفه جویی نمود. به دلیل شکل سهموی آینه‌ها که باعث می‌شود که از لحاظ حرارتی عملکرد مناسبی از کلکتور مشاهده شود ولی این هندسه در مقابل باد دارای ضریب آیرودینامیکی بالایی دارد. در طراحی کلکتورهای خورشیدی نیروی باد مخرب‌ترین نیرو به حساب می‌آید. تعیین ضرایب آیرودینامیکی یکی از مهمترین مسائل در طراحی مزرعه خورشیدی می‌باشد. شکل (۲) شماتیکی از یک کلکتور سهموی را نشان می‌دهد.

برای بررسی ضرایب آیرودینامیکی روش‌های متفاوتی وجود دارد. تونل باد یکی از روش‌های دقیق در تعیین نیروی باد می‌باشد. در زمینه آزمایش کلکتور خورشیدی در تونل باد می‌توان مراجع متنوعی [۲-۹] را معرفی نمود. آقای رائی و همکاران [۲] مدل تست جدیدی برای تست کلکتور خورشیدی در تونل باد ارائه داده است. پترکا و همکاران در مجموعه مقالات و گزارشهای [۳-۵] نوصیحات کاملی در رابطه با نحوه تست و شرایط استاندارد تونل باد و نتایج تست ارائه داده اند. فوران و همکاران [۶] تست کلکتور دیشی را مبنای تحقیق خود قرار داده اند. در مرجع [۱۰] نحوه طراحی و بهینه سازی تونل باد و مشکلات کار در تونل باد بحث شده است. این روش نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی با هزینه بالا دارد. استفاده از روش‌های عددی با توجه به آنکه دقت کمتری دارد ولی هزینه آن پایین تر بوده و می‌توان جزئیات بیشتری از جریان بدست آورد. مدلسازی اثر باد بر کلکتور تحت در تحقیق‌های مختلفی دیده می‌شود [۱۱-۲۰]. در تحقیق [۱۲] نیرو در زوایای متفاوت باد و کلکتور محاسبه شده است. اثر کلکتورها برهم یا اثر سایه آیرودینامیکی<sup>۲</sup> نیز بررسی شده است. آقای شجاعی و همکاران [۱۳] جریان حول جاذب و تلفات حرارتی آن را عددی شبیه سازی نموده است. هاجیکا و همکاران [۱۴] شبیه سازی عددی جریان حول کلکتور سهموی را بحث کرده است. توریسیلا و همکاران [۱۵] محاسبه نیروی آیرودینامیکی حول کلکتور به کمک دینامیک سیالات محاسباتی را مبنای کار خود قرار داده و تونل باد را به صورت مجازی شبیه سازی نموده اند. بررسی اثر سقف یک ساختمان بر روی کلکتور خورشیدی به صورت تجربی در مرجع [۲۱] بررسی شده است. در بررسی آیرودینامیک در اشکال دیگر و مخصوصاً آیرودینامیک برج‌های بلند مرتبه اطلاعات و روش‌های مدلسازی جالبی ارائه شده است [۲۲]. حرکت جریان و پخش آلودگی در پشت ساختمان و حرکت باد بر روی چادر در مراجع [۲۳-۲۴] بحث شده است. تحلیل جریان حول دیش‌های مخابراتی مسئله‌ای نزدیک به مسئله کلکتورهای خورشیدی می‌باشد در این زمینه می‌توان مقالات [۲۵] و [۲۶] را معرفی نمود. در مقاله [۲۵] بیان شده است که ماکزیمم نیرو بر دیش در زاویه باد عمود اتفاق می‌افتد. بحث نحوه ساخت و جنس

<sup>2</sup> sheltering effect

<sup>1</sup> PTC ( parabolic trough solar collector)

یک محور گسترش پیدا کرده‌اند. شمایی از این نوع کلکتورها در شکل (۳) نمایش داده شده و زوایای استاندارد بر روی آن معرفی شده است.



شکل ۲- تصویری از یک متمرکز کننده سهموی خطی - به همراه زوایای آیرودینامیکی

منحنی کلکتور خورشیدی معمولاً سهموی شکل می‌باشد و با توزیع پر کاربرد زیر شبیه سازی می‌شود [۳۳]:

$$z = x^2/4f \quad (1)$$

$$f = 1.71$$

در رابطه (۱)، X و Z به ترتیب طول در راستای محور X و محور Z در دستگاه مختصات است. در علم آیرودینامیک، زوایای بر مبنای جهت باد تعریف می‌شوند. شکل (۲) زوایای استاندارد برای کلکتور خورشیدی را نمایش می‌دهد. بر این مبنا نیروهای وارده بر یک کلکتور خورشیدی و ضرایب پسا به صورت زیر تعریف می‌شود [۳]:

$$C_{fx} = \frac{f_x}{qLW} \quad (2)$$

$$C_{fz} = \frac{f_z}{qLW} \quad (3)$$

$$C_{my} = \frac{m_y}{qLW^2} \quad (4)$$

که در آن L طول کلکتور، W عرض دهانه کلکتور و  $m_y$  مومنتوم پیچشی می‌باشد. انرژی سینماتیک باد، q از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$q = 0.5\rho U^2 \quad (5)$$

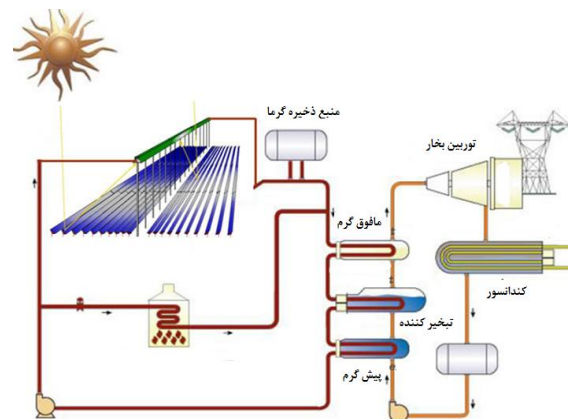
که در آن U سرعت باد و  $\rho$  دانسیته هوا می‌باشد. ضریب پسا موضعی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_p = \frac{P}{q} \quad (6)$$

ساختار کلکتورهای خورشیدی در مقاله [۲۷] بررسی شده است. مسائل تابش، بازتابش و حرارتی کلکتور در منبع [۲۸-۳۰] مورد بررسی قرار گرفته است. بنی عامریان و همکاران در مقاله‌های [۳۱-۳۲] به بررسی دو بعدی کلکتور خورشیدی و اثر سایه آیرودینامیکی حصار پرداخته‌اند.

پس از مشخص شدن رفتار جریان باد بر روی سازه کلکتور خورشیدی، نیاز است تا اثرات فشار باد بر روی کلکتور و میزان تنش‌های وارده به آن بررسی شود. نیروی باد یک نیروی نوسانی است که به دلیل ایجاد گردابه پشت آینه‌ها ایجاد می‌شود. این نیروی نوسانی سبب ایجاد تنش‌های نوسانی در نقاط مختلف سازه به خصوص در پایه‌های کلکتور می‌شود. اجزای فلزی کلکتور معمولاً از پروفیل‌های مختلفی از جنس ST37 ساخته می‌شود و آینه‌ها نیز معمولاً دارای ضخامت ۴ میلی‌متر هستند. در این مقاله نحوه تعیین نیروی آیرودینامیکی تشریح می‌شود و نتایج آیرودینامیکی برای تحلیل سازه، تعیین می‌گردند.

در این تحقیق، روشی عددی برای تعیین این ضرایب بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی معرفی شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای بررسی اثر شیارها، لبه کلکتور و حرکت گردابه‌ها مدل‌سازی هندسه به صورت سه بعدی لازم می‌باشد. در هندسه مدل‌سازی شده اثر شیارهای بین آینه‌ها و زمین دیده شده است. گردابه‌های ون کارمن کامل مدل شده و شرایط مناسب از نظر مشخصات مش و ابعاد ناحیه حل تعیین شده است و در نهایت حرکت گردابه‌ها و اثر آن بر نیروی دینامیکی وارد بر کلکتور شبیه سازی شده است.



شکل ۱- شماتیک و بخشهای اصلی نیروگاه خورشیدی [۱]

## ۲- تعاریف اولیه

کلکتورهای سهموی خطی، همان‌طور که از نامشان پیداست دارای پروفیل سهموی شکل هستند که از یک طرف و در راستای

کلکتورهای سهموی تغییر می‌یابد. چگونگی تغییر پروفیل‌های سرعت و باد به شدت به مشخصات ناهمواری‌ها بستگی دارد. بنابراین ابتدا می‌بایست فرضیات مرتبط با هر کدام از این فضاها (ناهمواری‌های زمین) و تأثیرات آن‌ها بر روی باد مورد بررسی قرار گیرد. بادی که از روی زمین عبور می‌کند تحت تأثیر پستی-بلندی‌های زمین قرار گرفته و لایه‌ی مرزی خاصی شکل می‌دهد. به پستی بلندی‌های زمین در اصطلاح عوارض زمین گفته می‌شود. پروفیل باد در هر منطقه بر اساس عوارض زمین آن منطقه تعیین می‌شود. معمولاً سرعت باد در منطقه در ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متری و با فاصله‌ی زمانی هر ۳ ثانیه یکبار توسط بادسنج‌های سازمان‌های هواشناسی (در مناطقی که دکل‌های هواشناسی موجود باشد) اندازه‌گیری می‌شود. برای تعیین پروفیل باد در ارتفاعی که کلکتورها نصب شده‌اند از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود [۳۳]:

$$u_{\text{mean}} / u_{\text{ref}} = (z / z_{\text{ref}})^n \quad (12)$$

در رابطه‌ی بالا  $u_{\text{ref}}$  سرعت ماکزیمم بادی است که در طول ۵۰ سال احتمال وقوع آن بیش از ۵٪ بوده است [۳۳] و  $z_{\text{ref}}$  ارتفاع دکل‌هایی است که سرعت‌ها در آن ارتفاع ثبت شده‌اند. پارامتر  $n$  در رابطه‌ی بالا با توجه به عوارض زمین در منطقه به دست می‌آید. دسته بندی عوارض زمین و اثر آن بر پروفیل جریان به صورت کاملتر در مرجع [۴] و جدول ۱ آورده شده است. از آن‌جا که کلکتورهای مد نظر در این مقاله در بیابان‌های یزد (اولین نیروگاه صنعتی خورشیدی ایران) نصب شده‌اند مقدار پارامتر  $n$  را می‌بایست برای عوارض بیابانی در نظر گرفت. مقدار  $n$  را برای زمین‌های بیابانی معادل ۰/۱۵ پیشنهاد داده است. با در نظر گرفتن ارتفاع ۱۰ متری به عنوان ارتفاع مرجع برای اندازه‌گیری سرعت باد و ۰/۱۵ برای پارامتر  $n$  رابطه‌ی زیر برای پروفیل باد پیشنهاد می‌شود:

$$u_{\text{mean}} = 0.68 u_{\text{ref}} z^{0.15} \quad (13)$$

پروفیل بالا به عنوان شرایط مرزی ورودی هوا مد نظر قرار می‌گیرد به کمک همین منبع و جدول ۱ می‌توان شدت آشفتگی را ۱۴ درصد در نظر گرفت.

#### ۵- هندسه و مش تولیدی

هندسه به کمک نرم افزار مدلسازی هندسه سه بعدی

$p$  نشان دهنده فشار است. ضریب پسا نهایی که از تفاوت نیروی فشاری در داخل و خارج کلکتور بدست می‌آید به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Cdp = \frac{P_f - P_b}{q} \quad (7)$$

رینولدز از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$Re = \rho u w / \mu \quad (8)$$

که در رابطه بالا  $\rho$  و  $\mu$  چگالی و لزجت هوا بوده و  $u$  سرعت باد و  $w$  دهانه کلکتور می‌باشد.

#### ۳- معادلات حاکم

برای به دست آوردن سرعت باد و فشار آن در هر نقطه ضروری است تا معادلات بقای جرم و ناویر-استوکس در حالت آشفته حل شوند. این معادلات به ترتیب به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (10)$$

در معادلات بالا بردارهای سرعت با  $\vec{v}$  مشخص شده و  $\bar{\tau}$  تانسور تنش است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - (2/3) \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (11)$$

در رابطه‌ی بالا  $\mu$  ضریب ویسکوزیته‌ی دینامیکی سیال بوده و  $I$  ماتریس همانی است. کلکتور در محدوده‌ای می‌باشد که جریان آشفته است.

مقالات [۳۴-۴۰] در رابطه با بحث مدلسازی کلکتور و روش مناسب آشفتگی بحث نموده اند. در این منابع بیشتر بر کارایی روش K-e بحث نموداند. در مقاله آقایی نایینی [۳۴] پیشنهاد شده است که از مدل آشفتگی K-e(RNG) استفاده شود و استفاده از تابع دیواره<sup>۱</sup> تاکید شده است. با توجه به منابع مذکور مدل آشفتگی K-e(RNG) به همراه روش تابع دیواره مبنای کاری قرار گرفته است. به دلیل آنکه سرعت سیال پایین می‌باشد فرض تراکم ناپذیری فرض مناسبی می‌باشد.

#### ۴- اثر عوارض زمین

پروفیل‌های سرعت و فشار باد در اثر برخورد به ناهمواری‌های زمین، حصار و سرانجام برخورد به

<sup>۱</sup> wall function

ترسیم گردید و سازه آن برای مدلسازی تنش شبیه سازی کامل شد. شکل (۳) نمای سه بعدی آینه ها و سازه را نشان داده است و شکل (۴) نمای یکپارچه سازه و آینه را نشان می دهد. گردابه های حاصله در پشت کلکتور بسیار مهم می باشد. از طرف دیگر اثر زمین و لایه مرزی حاصل در اثر وجود کلکتور و زمین در تعیین ابعاد ناحیه حل، اثر گذار است. هندسه های متفاوتی مورد مدلسازی و بررسی قرار گرفته است، نتایج مدلسازی نکات زیر را در تعیین ناحیه

حل مشخص کرده اند:

الف) فاصله کلکتور با ورودی جریان حداقل از سه برابر دهانه کلکتور بیشتر باشد.

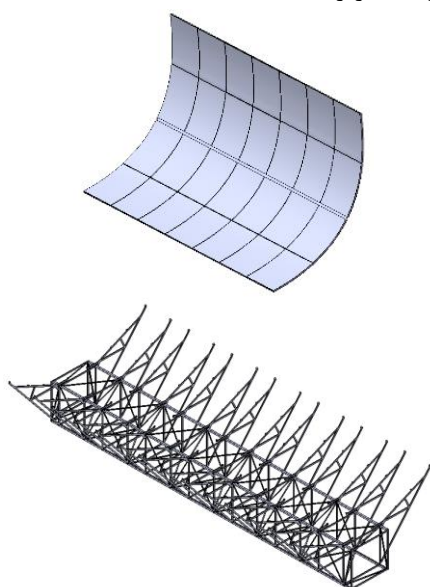
ب) ارتفاع دامنه حل از سه برابر دهانه کلکتور بیشتر باشد.

ج) برای آنکه گردابه های جریان کامل دیده شود فاصله پشت کلکتور مهمترین اثر را در نتایج نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که فاصله پشت از ده برابر دهانه کلکتور بیشتر باشد.

جدول ۱. اثر عوارض زمین بر پروفیل جریان باد [۴]

درصد شدت آشفستگی @ (۱۰ متر)	توان فرمول پاور لا <sup>۱</sup> (n)	نوع عوارض	نماینده مقدار Zo(m)	Zo (m)
۳۴	۰/۳۵	در منطق شهری و جنگلی	۰/۷	۰/۵- ۱/۵
۳۴	۰/۲۷- ۰/۳	جنگلهای فشرده با ارتفاع درخت متفاوت		
۳۴	۰/۲۳- ۰/۲۵	جنگلهای فشرده با ارتفاع درخت متفاوت		
۲۶	۰/۲۴	شهرهای کوچک و یا نواحی حواشی شهر	۰/۳	۰/۱۵- ۰/۵
۲۱	۰/۲	مناطق روستایی و کشاورزی	۰/۱	۰/۰۵- ۰/۱۵
۱۴	۰/۱۵	مناطق چمنی، بیابانی با درخت محدود	۰/۰۱	۰/۰۰۷- ۰/۰۱۵
۱۳	۰/۱۳	زمین پوشیده از برف و یا سطح دریا که مواج باشد	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱۵- ۰/۰۰۷
۱۱	۰/۱۱	زمین مسطح، دریاچه و یا دریای آرام	۰/۰۰۱	< ۰/۰۰۱۵

استاندارد باید زیر ۴ باشد).



شکل ۳. مدل سه بعدی آینه های کلکتور خورشیدی و سازه نگهدارنده

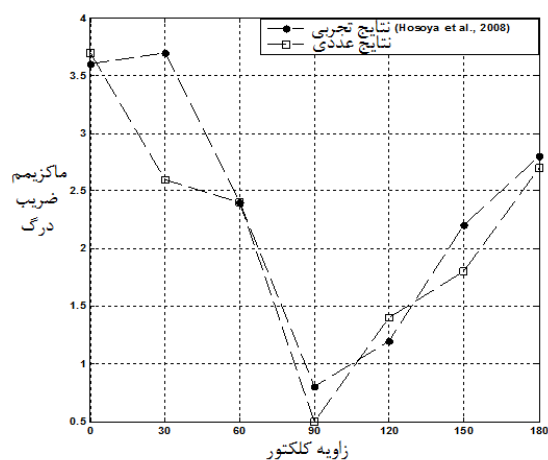
با توجه به این موضوع طول ناحیه حل ۱۵ برابر دهانه کلکتور و ارتفاع ناحیه حل ۵ برابر دهانه کلکتور انتخاب شده است. در هندسه مورد بررسی دهانه کلکتور ۵/۷ متر و عرض کلکتور ۱۲ متر می باشد.

برای تولید شبکه از نرم افزار گمبیت استفاده شده است و از سلول های ۴ وجهی (هرمی) برای تولید مش سه بعدی استفاده شده است نمونه مش حاصله برای نواحی نزدیک یک کلکتور در شکل (۵) نشان داده شده است. برای آن که بتوان جریان بین شیارهای آینه ها و مقادیر آیرودینامیکی دقیق مدل شود مش در نزدیکی آینه بسیار ریز شده است در شکل (۵) این موضوع نشان داده شده است. برای تولید مش تولیدی از لحاظ یکنواختی مش، معیارهای مطرح در دینامیک محاسباتی رعایت شده است به عنوان مثال معیار کشیدگی المان ۲ در دو بعد عدد ۱/۷ (در استاندارد باید زیر ۳ می باشد) و در ۳ بعد عدد ۳/۵ بدست آمده است (در

<sup>۱</sup> Power law exponent

<sup>۲</sup> Aspect ratio

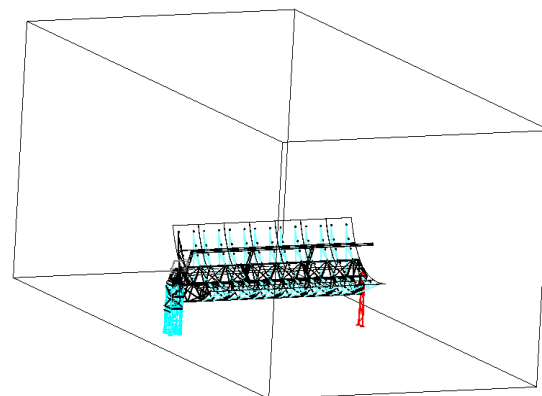
ضرایب آیرودینامیکی گزارش شده است. در تونل باد مدل با نسبت ۴۵ به ۱ قرار داده شده است و در این آزمایش رینولدز ۵۰۰۰۰ مبنای کاری بوده و زاویه کلکتور از صفر تا ۱۸۰ درجه تغییر کرده است. شکل (۶) مقایسه نتایج عددی مدلسازی معرفی شده با نتایج تجربی این مرجع را نشان می دهد. نتایج نشان دهنده همخوانی خوبی بین مدلسازی و نتایج تجربی می باشد. متوسط خطا ۱۷/۵ درصد می باشد. بهترین عملکرد در زاویه ۶۰ درجه حاصل شده است. عدم وابستگی به ابعاد مش در مدل سه بعدی در شکل (۷) مورد بررسی قرار گرفته است. معیار مورد بررسی ضریب بی بعد پسا بوده است. شرایط کلکتور در رینولدز ۵۰۰۰۰ و زاویه ۶۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که مش بیش از یک میلیون هشتصد هزار عدد اثر قابل توجهی بر روی نتایج ضرایب آیرودینامیکی نمی گذارد و درصد خطا کمتر از ۱ درصد (۰/۸٪) است و افزایش مش تنها باعث بالا رفتن حجم محاسبات می گردد. نکته مهم در این مدلسازی مشخصات مش حول کلکتور می باشد، مش در نزدیکی کلکتور بسیار ریز بوده و این پارامتر نسبت به تعداد کل مش پارامتر مهمتری است.



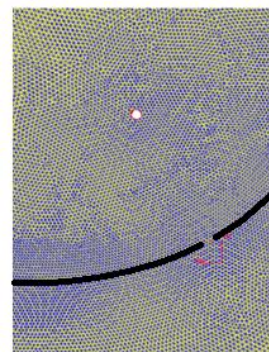
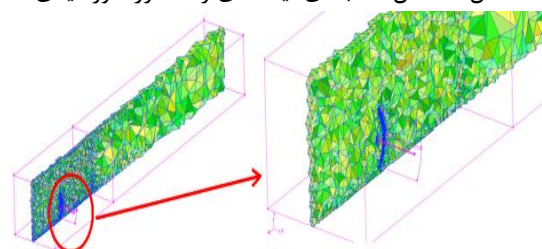
شکل ۶- مقایسه نتایج مدلسازی با نتایج تجربی مرجع [۳]

## ۷- نتایج

در مدلسازی سه بعدی پدیده هایی مانند اثر شیارهای بین آینه ها و اثر دو انتهای کلکتور قابل شبیه سازی هستند. از طرف دیگر تعیین تنش وارده بر یک بخش آینه میزان مقاوت چسبندگی هرگز از آینه نسبت به سازه را تعیین می کند. معمولا هر بخش از آینه با چسبهای خاص به سازه متصل می گردد. به کمک مدلسازی سه بعدی ممان وارد بر



شکل ۴- مدل سه بعدی آینه های و کلکتور خورشیدی



شکل ۵- مش تولیدی سه بعدی با طول مناسب

در حل دینامیک محاسباتی برای کاهش حجم محاسبات سازه مدل نشده است و اثر این موضوع در نتایج آیرودینامیکی قابل توجه نیست ولی زمین و شیارها مدل شده اند. برای افزایش دقت نتایج آیرودینامیکی مش در حول کلکتور ریزتر می باشد این موضوع در شکل (۵) نمایش داده شده است. المانهای مورد استفاده در تحلیل سازه از نوع میله<sup>۱</sup> سه بعدی با دو گره و ۶ درجه آزادی برای هر گره هستند و برای آینه ها نیز از المان صفحه<sup>۲</sup> سه بعدی با ۴ گره و ۶ درجه آزادی در هر گره استفاده شده است.

## ۶- صحت سنجی نتایج

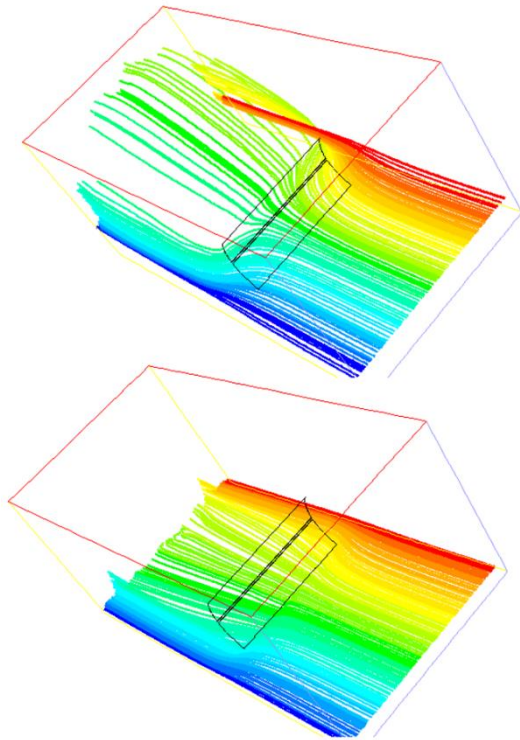
برای بررسی درستی مدلسازی از نتایج مرجع [۳] کمک گرفته شده است. در این مرجع هندسه استاندارد کلکتور سهموی در تونل باد مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج

<sup>2</sup> shell

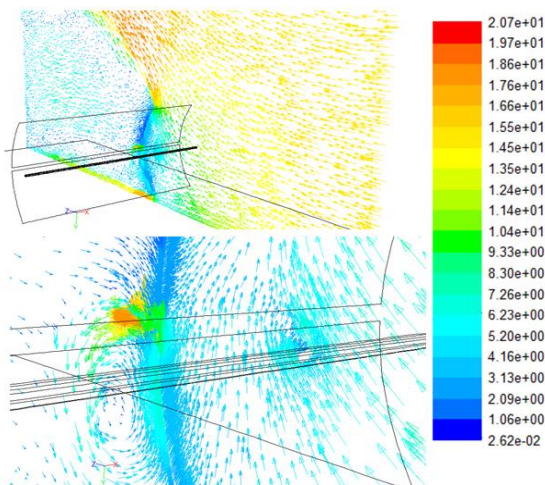
<sup>1</sup> Beam



دارای دو بخش است و بخش نهایی نوسانی می باشد علت این امر ایجاد گردابه و حرکت آن است. نتایج نشان می دهد که ضریب پسا دارای نوساناتی در حدود ۱۶/۴٪ نسبت به ضریب پسا متوسط می باشد. باید توجه نمود که این نوسانات باعث بار دینامیک بر کلکتور خورشیدی می گردد.



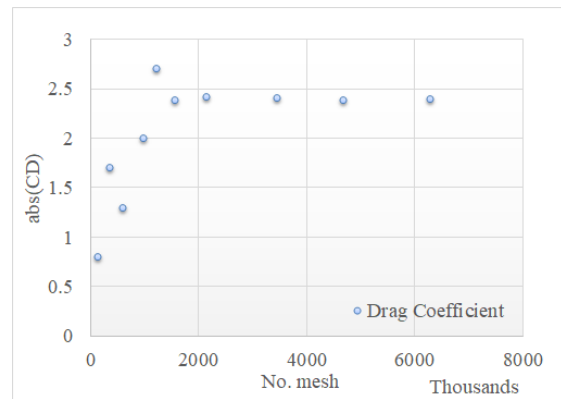
شکل ۸- نمای ایزومتریک جریان حول کلکتور در مقاطع با ارتفاعهای متفاوت ( نزدیک به زمین و بالا نسبت به آینه)



شکل ۹- بردار سرعت در اطراف کلکتور (m/s)

نتایج فشار تعیین کننده میزان نیروی وارده بر سازه کلکتور خورشیدی می باشد. یک روش تعیین ضریب پسا استفاده پروفیل فشار و انتگرال گیری بر روی سطح کلکتور می

سازه به صورت دقیق تر قابل محاسبه است و تنش وارد بر سازه و نقاط مورد نیاز برای تقویت مشخص می گردد.

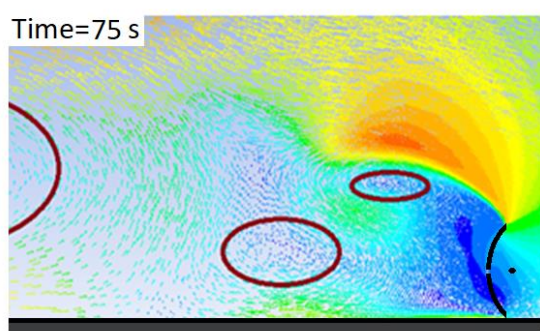
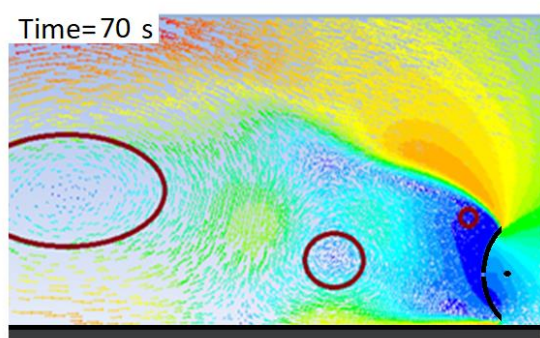
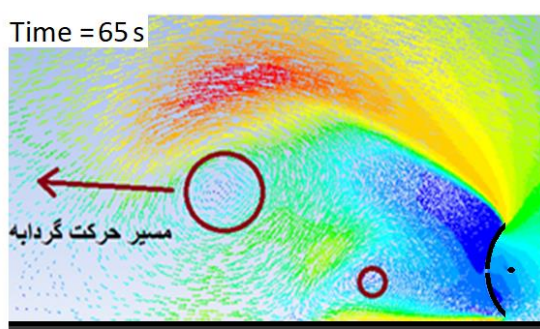
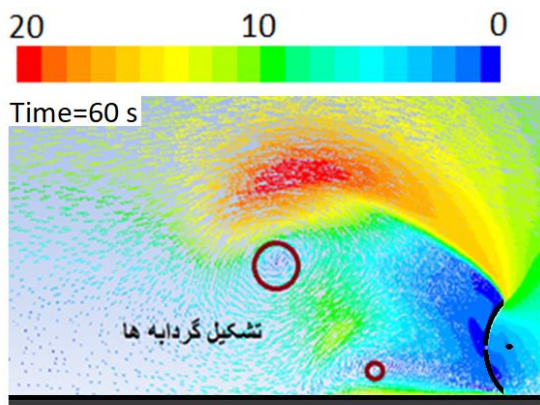


شکل ۷- نتایج عدم وابستگی به مش

در شکل (۸) خط جریان حول کلکتور در نماهای متفاوت رسم شده است. این نتایج مربوط به جریان با زاویای استاندارد صفر می باشد. در شکل (۹) گردابه حاصل از شیار بین دو آینه نمایش داده شده است. می توان اثر زمین بر بردار سرعت را در این اشکال مشاهده نمود. شکل (۱۰) نتایج بردار حول کلکتور در زمانهای متفاوت از نمای دو بعدی را نشان می دهد. در این شکل نحوه تشکیل گردابه ها و حرکت آن نمایش داده شده است. گردابه های فوق گردابه های فون کارمن می باشد. گردابه های فوق در فاصله زمانهای مشخصی در پایین و بالای کلکتور شکل می گیرند و جدا می شوند. اثر زمین باعث می شود که گردابه های فوق به سمت بالا حرکت کنند.

گردابه های فوق تشکیل گردابه ها حول کلکتور تاثیر بسزایی بر میزان ضرایب آیرودینامیکی دارد. لذا مدلسازی دقیق گردابه ها در حالت سه بعدی باعث می شود که بتوان با دقت بهتری ضریب پسا را محاسبه نمود. از طرف دیگر نوسانات نیروی وارده نشان دهنده طول عمر و خستگی کلکتور می باشد. میزان ضریب پسا و لیفت برای زاویای استاندارد صفر در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. این ضرایب در تعیین میزان نیروی پسا وارد بر سازه بسیار مهم می باشد. در مرجع [۳] بیان شده است که رینولدز اگر از ۴۶۰۰۰ بیشتر باشد میزان ضریب پسا دیگر با رینولدز تغییر نمی کند. معمولا سرعت باد ماکزیمم مناطق بیابانی از رینولدز بالاتری نسبت به معیار معرفی شده برخوردار است و این موضوع مبنای کار تونل باد و شبیه سازی ها قرار می گیرد و تعیین ضریب پسا در یک سری سرعت های مشخص مبنای کار طراح است. در این شکل ضریب پسا

میانی اتفاق می افتد و این مقدار زیاد تنش، نشان دهنده لزوم استفاده از دیوار بادشکن یا تقویت سازه می باشد.



شکل ۱۰- بردار سرعت حول کلکتور خورشیدی و حرکت گردابه ها در زمانهای متفاوت (m/s)

در تحقیقات مشابه اثر گردابه های پشت کلکتور دیده نمی شود و بار ثابت اعمال می گردد. بار دینامیک اثر تخریبی بالایی ایجاد می کند. عدم مدلسازی بار دینامیک باعث می

باشد. میزان نیرو و فشار وارده در دو سمت کلکتور متفاوت می باشد. در شکل (۱۲) پروفیل فشار در دو سمت کلکتور (نسبت به باد) نمایش داده شده است. توجه شود پروفیل فشار در هر سرعت باد متفاوت است ولی ضریب پسا و برا معمولاً ثابت می باشد. تنش های ایجاد شده در سازه، به مقدار نیرو یا فشار وارده و همچنین جهت اعمال نیرو یا فشار بستگی دارد. با توجه به عمود بودن فشار باد بر آینه ها، تنش های برشی در جهت جریان باد و تنش های قائم تکرار شونده در سازه بیشتر از تنش های برشی عرضی تاثیر دارند.

در بررسی سازه کلکتور خورشیدی از آیین نامه مقررات ملی ساختمان استفاده گردیده و طبق آیین نامه، تنش مجاز در اجزای فلزی سازه ها برابر با  $0/6$  تنش تسلیم فولاد است و هیچ تنشی در سازه نباید از این مقدار فراتر رود. با توجه به تنش تسلیم فولاد (۲۴۰ مگاپاسکال)، تنش مجاز در سازه برابر ۱۴۴ مگاپاسکال می شود. برای تعیین تنش از روش اجزا محدود کمک گرفته شده است.

با توجه به اینکه در زاویه صفر درجه قرارگیری کلکتور، ضریب پسا وارده به کلکتور شبه سینوسی است، مقدار فشار بیشینه و کمینه بر روی آینه ها به ترتیب برابر  $269/01$  پاسکال و  $195/85$  پاسکال به دست می آید. با اعمال فشار سینوسی بر آینه ها، نقطه خطرناک سازه، انتهای پایه عادی میانی است و نیروهای موجود در این نقطه نیز به دلیل ماهیت نوسانی نیرو، نوسانی اند. از میان نیروها و ممان های موجود در این نقطه، نیروی برشی در جهت باد و نیروی قائم به دلیل گشتاور ایجاد شده ناشی از باد، بیشترین مقدار را دارا هستند.

در واقعیت به دلیل بزرگی دهانه آینه ها و تاثیرات مخرب نیروی باد، از یک دیوار بادشکن در مقابل مزرعه استفاده می گردد که وجود دیوار بادشکن باعث کاهش قابل ملاحظه فشار باد به سازه می شود. لذا به دست آوردن ابعاد بهینه برای کلکتوری که در معرض مستقیم جریان باد است، باعث بزرگی بیش از حد ابعاد پروفیل های سازه می گردد. با توجه به طراحی صورت گرفته برای سازه کلکتور خورشیدی و با توجه به نیروهای مختلف اعمالی از قبیل وزن، زلزله و غیره، ابعاد بهینه ای برای سازه به دست آمده که با این ابعاد بهینه، تنش بیشینه ناشی از جریان باد بدون حضور بادشکن برابر  $208$  مگاپاسکال می شود که در انتهای پایه عادی



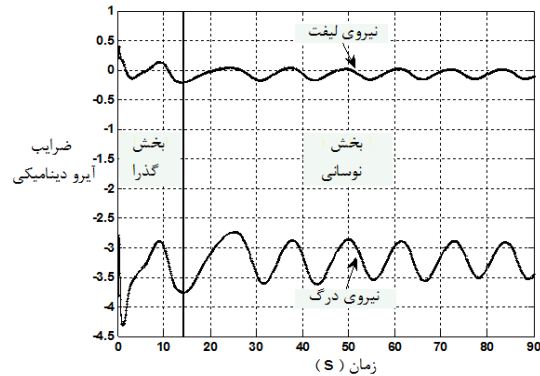
### ۸- نتیجه گیری

مهم ترین نیرو در تعیین مشخصات سازه کلکتورهای مزرعه خورشیدی، نیروی آیرودینامیکی می باشد. در این تحقیق، روشی عددی برای تعیین این ضرایب بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی معرفی شده است. نتایج نشان داد که برای بررسی اثر شیارها، لبه کلکتور و حرکت گردابه ها مدل سازی هندسه به صورت سه بعدی لازم می باشد. در هندسه مدل سازی شده اثر شیار های بین آینه ها و زمین دیده شده است. گردابه های ون کارمن کامل مدل شده و شرایط مناسب از نظر مشخصات مش و ابعاد ناحیه حل تعیین شده است و در نهایت حرکت گردابه ها و اثر آن بر نیروی دینامیکی وارد بر کلکتور شبیه سازی شده است. نتایج نشان داده است که عدم مدل سازی بار دینامیک باعث می شود که تنش بیشینه در حدود ۳۵/۳٪ کمتر تخمین زده شود. در ادامه میزان ضرایب، پروفیل فشار و سرعت جریان در حول کلکتور خورشیدی تعیین شده است. در نهایت به کمک ضرایب محاسبه شده، تنش وارد بر سازه محاسبه شده است.

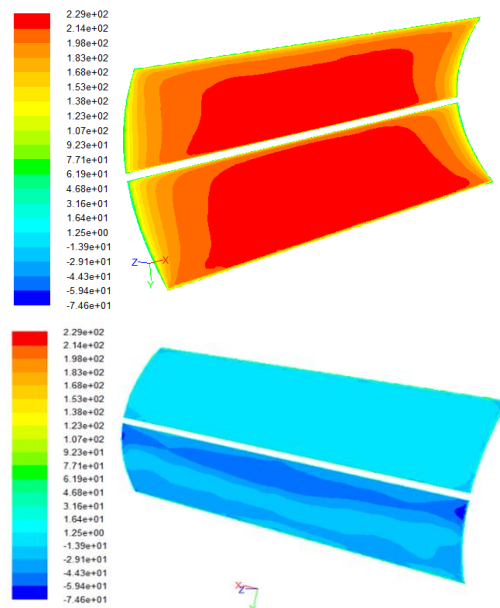
### تشکر و قدردانی

از شرکت مونتکو به دلیل حمایت های لازم برای انجام این تحقیق تشکر می شود.

شود که تنش بیشینه در حدود ۳۵/۳٪ کمتر تخمین زده شود. نتایج حاصله نشان می دهد که مدل سازی اثر گردابه ها بر کلکتور پارامتر مهمی می باشد. در مزرعه خورشیدی وجود حصار و کلکتورهای دیگر اثر گردابه ها را کاهش داده و اثر بار دینامیک را کم می کند.



شکل ۱۱- ضرایب لیف و پسا نسبت به زمان برای کلکتور تنها (کلکتور نسبت به باد دارای زاویه صفر می باشد)



شکل ۱۲- الف) پروفیل فشار در سطح خارجی کلکتور  
ب) پروفیل فشار در سطح داخلی کلکتور ( پاسکال)

### مراجع

- [1] J. D. Pye , System Modelling of the Compact Linear Fresnel Reflector, A thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy, May, 2008.
- [2] J. Rhee, C. Nguyen and M. Grace, "An Effective, Low-Cost Mechanism for Direct Drag Force Measurement on Solar Concentrators", J. Wind Eng. Indust. Aerodyn, Vol. 99, No. 5, 2011, pp. 665–66.
- [3] N. Hosoya, J. A. Peterka, R. C. Gee and D. Kearney, "Wind Tunnel Tests of Parabolic Trough Solar Collectors. National Renewable Energy Laboratory", report no. NREL/SR-550-32282, May, 2008.

- [4] J. A. Peterka, N. Hosoya, B. Bienkiewicz and J. E. Cermak, "Wind Load Reduction for Heliostats", Solar Energy Res. Inst 1986, SERI/STR 253-2859.
- [5] J. A. Peterka, Z. Tan, B. Bienkiwicz and J. E. Cermak, "Wind Loads on Heliostats and Parabolic Dish Collectors, Solar Energy Research Institute", SERI/STR 253-3431, 1988.
- [6] R. K. Foran, Vibration and Flow Field Characteristics of a Hemispherical Solar Concentrator, Texas Tech University, for the Degree of Master of science, 1984.
- [7] R. L. Ewald, J. A. Peterka and J. E. Cermak, "Heliostat-Array WindTunnel Study", Technical Report for Martin Marietta Aerospace, ReportNo. CER78-79RLE-JAP-JEC31, 1979.
- [8] J. E. Cermak, "Laboratory Simulation of the Atmospheric Boundary Layer", AIAA Journal, Vol. 9, No. 9, 1971, pp. 1743-1754.
- [9] P. Mendis, T. Ngo, N. Haritos, A. Hira, B. Samali and J. Cheung, "Wind Loading on Tall Buildings", J. Cheung, EJSE Special Issue: Loading on Structures, Vol.3, 2007, pp. 41-54.
- [۱۰] مرتضی جوادپور، سعید فراهت و حسام‌الدین ابن‌الدین، "بهینه‌سازی یک دیفیوزر تونل باد مافوق صوت با دیواره‌های انعطاف پذیر با کمک الگوریتم ژنتیک"، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۰، شماره ۲۸، سال ۱۳۹۱، صفحه ۱۹-۲۹.
- [11] M. Shademan and H. Hangan, "Wind Loading on Solar Panels at Different Inclination Angles", 11th Americas conference on wind engineering- san juan Puerto rico, 2009, pp. 22-26.
- [12] K. M. Chung, K. C. Chang and C. C. Chou, "Wind Loads on Residential and Large-Scale Solar Collector Models", J. WindEng. Ind. Aerodyn, Vol. 99, No. 1, 2011, pp. 59-64.
- [13] S. M., Shojaee, M. A. Moradian and M. Mashhoodi, "Numerical Investigation of Wind Flow around a Cylindrical Trough Solar Collector", Vol.3, No. 1, 2015, pp. 1-10.
- [14] A. Hachicha, I. Rodriguez, J. Castro and A. Oliva, "Numerical simulation of wind flow around a parabolic trough solar collector", Applied Energy, Vol. 107, No. C, 2013, pp. 426-437.
- [15] M. Torrecilla, E. Herrera and M. Doblaré, "Numerical calculation of wind loads over solar collectors", Energy Procedia, Vol. 49, 2014, pp. 163 – 173.
- [16] X. Zhou and S. Yuan, "Wind effects on a solar updraft power plant", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 170, 2017, pp. 294-305.
- [17] J. Bootello, M. M. Torrecilla, M. Doblaré and M.S. Pérez, "Aerodynamics of new solar parametric troughs: Two dimensional and three dimensional single module numerical analysis", Solar Energy, Vol. 135, 2016, pp. 742-749.
- [18] M. Eswaran, R. K. Verma and G. R. Reddy, "Wind-induced loads and integrity assessment of hyperboloid reflector of solar power plants", Alexandria Engineering Journal, Vol.55, No. 2, 2016, pp. 837-850.
- [19] P. K. Saha, A. YoshidaRei and O. Y. Tamura, "Reduction of Mean Wind Forces on Photovoltaic System using Aerodynamic Appendages", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 22, No. 9, 2018, pp.3395-3400.
- [20] W. Jingxue, Q.S. Yang and T. Yukio, "Effects of building parameters on flat-roof-mounted solar panels" Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 174, 2018, pp. 210-224.
- [21] B. E. Lee and R. A. Evans, "The Measurement of Wind Flow Patterns over Building Roofs", Building and Environment, Vol. 19, No. 4, 1984, pp. 235-241.
- [22] J. Holmes, Y. Tamura and P. Krishna, "Comparison of Wind Loads Calculated by Fifteen Different Codes and Standards, for Low, Medium and High-Rise Buildings", 11th Americas conference on wind engineering- San juan Puerto rico june 22-26, 2009.

[۲۳] بنت‌الهدی سازگارن و حسن حاجی کاظم، "بررسی فشار باد بر سقف‌های چادری با فرم کیفی به روش شبیه‌سازی عددی"، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۱، سال ۱۳۹۶، صفحه ۱۱-۱۷.

[۲۴] قاسم حیدری نژاد و امیرمحمد جدیدی، "شبیه‌سازی نحوه پخش آلودگی در پشت یک ساختمان با استفاده از یک روش RANS-LES، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، سال ۱۳۹۶، صفحه ۱۷-۲۷.

- [25] J. D. Holmes, R. W. Banks and G. Roberts, "Drag and Aerodynamic Interference on Microwave Dish Antennas and Their Supporting Towers", *J Wind Eng. Ind. Aerodyn*, Vol. 50, 1993, pp. 263–269.
- [26] G. Lombardi, "Wind-Tunnel Tests on a Model Antenna Rotating in a Cross Flow", *Eng. Struct.* Vol. 13, No. 4, 1991, pp. 345-350.
- [27] A. V. Arasu and T. Sornakumar, "Design, Manufacture and Testing of Fiberglass Reinforced Parabola Trough for Parabolic Trough Solar Collectors", *Solar Energy*, Vol. 81, No. 10, 2007, pp. 1273–1279.
- [28] G. K. Manikandan, S. Iniyan and R. Goic, "Enhancing the optical and thermal efficiency of a parabolic trough collector – A review", *Applied Energy*, Vol. 235. No. 1, 2019, pp. 1524-1540.
- [29] M. Campos Garcia , A. Peña-Conzuelo, O. Huerta-Carranza, D.R. Diaz- Uribe, U.E. Espinoza- Nava and V.E. Moreno- Olvia, "Testing the surface quality of a reflective parabolic trough solar collector with two flat null-screens", *Applied Optics*, Vol. 58. No. 4, 2019, pp. 752-763.
- [30] A. Hafez, , A. S. Attia, H. O. Eltwab, A. Elkousy, A. G. Afifi, A. N. Abdelhamid, A. Abdelqader and F. Seif-Eddeen, "Design analysis of solar parabolic trough thermal collectors". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 82, No. 1, 2018, pp.1215-1260.
- [31] Z. Baniamerian and R. Mehdipour, "Studying effects of fence and sheltering on the aerodynamic forces experienced by parabolic trough solar collectors", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 139, No. 3, 2017, pp.1-11.
- [32] Z. Baniamerian, R. Mehdipour and F. Kargar, "A Numerical Investigation on Aerodynamic Coefficients of Solar Troughs Considering Terrain Effects and Vortex Shedding", *International Journal of Engineering (IJE)*, Vol. 28, No. 6, 2015, pp. 940-948.
- [33] Ch. Geurts and C. Bentum, "Wind Loads on Solar Energy Roofs", *HERON*, Vol. 52, No. 3, 2007, pp. 201-222.
- [34] N. Naeeni and M. Yaghoubi, "Analysis of Wind Flow around a Parabolic Collector (1) Fluid Flow", *Renewable Energy*, Vol. 32, No. 11, 2007, pp. 1898–1916.
- [35] N. Naeeni and M. Yaghoubi, "Investigate the Aerodynamic of 2D Solar Collectors and Obtained the Aerodynamic Forces", *Renewable Energy*, Vol. 32, 2007, pp. 898–916.
- [36] N. Naeeni, and M. Yaghoubi, "Analysis of Wind Flow around a Parabolic Collector (2) Heat Transfer from Receiver Tube", *Renewable Energy*, Vol.32, No. 8, 2007, pp. 1259–1272.
- [37] R. N. Meroney and D. E. Neff, "Wind Effects on Roof-mounted Solar Photovoltaic Arrays: CFD and Wind-Tunnel Evaluation", *Numerical Simulation of the Turbulent Wind Flow Around a Large Parabolic Solar Collector*. In: *Proceedings of APCWEVI*, 151, Korea, 2005.
- [40] M. Yaghoubi and E. Velayati, "Undeveloped Convective Heat Transfer from an Array of Cubes in Cross-Stream Direction", *Int. J. Therm. Sci*, Vol. 44, No. 8, 2005, pp.756–765 *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering*, 2010.
- [38] A. K. Saha, G. Biswas and K. Muralidhar, "Numerical Study of the Turbulent Unsteady Wake behind a Partially Enclosed Square Cylinder Using RAANS". *Int. J. Comput. Methods Appl Mech Eng*, Vol. 178, No. 3, 1999, pp. 323–341.
- [39] B. Samareh and A. Yaghoubi, "Two Dimensional