

## Numerical Simulations of Airflow Effects on Dust Deposition around a Set of Parabolic Solar Dishes for the Design of Automatic Dust Removing Systems

Khoshnavid, A.

Moayyedi, M. K.

University of Qom, Qom, Iran

(Received: 2022/04/30, Revised: 2022/06/30, Accepted: 2022/07/29, Published: 2022/08/23)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223278.1401.11.1.7.9>

### ABSTRACT

Today, the parabolic solar collector set is one of the most effective technologies for generating electricity. The performance of a solar cell changes under the accumulation of dust particles on its surface. In this research a three-dimensional flow model and the Eulerian approach with SST k-w based turbulence modeling are used to study the flow field around a set of solar cells, and the Lagrangian approach is used to model the displacement of dust particles. The numerical method used in this simulation is the SIMPLE Algorithm, whilst the upstream second-order method and the Trapezoidal method are applied for the particle motion equation integration. The results show an increase in the drag coefficient with the pitch angle. Also, the lift coefficient has an absolute maximum value at an angle of 30 degrees and approaches zero at the angles of zero and 90 degrees. In addition, the pitch torque at the center of the cell rotation has a maximum value at 30 and 45 degree pitch angles and the lateral torque has its maximum value at 90 ° angle. The particle settling behavior indicates that compared to other cells, the cell that faces the prevailing wind flow has more particle accumulation on it. Also, at low-speed airflow and high pitch angle, the particle deposition increases. The research outcomes show less efficiency reduction with increasing speed, and approximately the same efficiency at the pitch angle of 45, 60, and 75 degrees.

**Keywords:** Computational fluid Dynamics, Solar parabolic cell, dust deposition, Pitch angle, Solar cell efficiency

## شبیه‌سازی عددی اثرات جریان هوا بر جابجایی ذرات گرد و غبار روی سطح مجموعه سلول‌های سهموی خورشیدی به منظور طراحی سیستم غبارزدایی خودکار

محمد کاظم موبدی<sup>۲\*</sup>علیرضا خشنوید<sup>۱</sup>

دانشگاه قم، قم، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۰، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۷، انتشار: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱)

### چکیده

امروزه مجموعه گردآوردنده خورشیدی سهموی یکی از موثرترین فن‌آوری‌ها برای تولید الکتریسیته می‌باشد. عملکرد یک سلول خورشیدی تحت تأثیر انباشت ذرات گردوغبار روی سطح آن تغییر می‌کند. برای مطالعه میدان جریان اطراف مجموعه‌ای از سلول‌های خورشیدی، از مدل جریان سه‌بعدی و رویکرد اویلری همراه با مدل‌سازی اثرات آشفتگی مبتنی بر مدل SST k-w و برای مدل‌سازی جابجایی ذرات گردوغبار از الگوی لاگرانژی بهره‌برده شده‌است. روش حل عددی در این شبیه‌سازی (الگوریتم سیمپل، روش مرتبه دوم بالادست و روش دوزنقه‌ای جهت انتگرال‌گیری از معادله حرکت ذرات) می‌باشد. نتایج نشان از افزایش ضریب پسا با زاویه گام می‌دهد. همچنین ضریب برآ در زاویه ۳۰ درجه حداکثر مقدار مطلق خود را داشته و در زوایای صفر و ۹۰ درجه به مقدار صفر نزدیک می‌شود. علاوه بر این گشتاور پیچشی وارد بر مرکز دوران سلول، در زوایای گام ۳۰ و ۴۵ درجه و گشتاور سمتی در زاویه ۹۰ درجه حداکثر مقدار خود را دارد. رفتار نشست ذرات نشان‌دهنده نشست بیشتر ذرات بر روی سلول مقابل جریان غالب باد، درمقایسه با سلول‌های دیگر است. همچنین هرچه سرعت جریان هوا کمتر و زاویه گام بیشتر باشد، نشست ذرات بیشتر می‌شود. از دیگر نتایج می‌توان به کاهش کمتر بازده با افزایش سرعت اشاره کرد و زوایای ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه کاهش بازده حدوداً یکسانی دارند.

**واژه‌های کلیدی:** دینامیک سیالات محاسباتی، سلول سهموی خورشیدی، رسوب گرد و غبار، زاویه گام، راندمان سلول خورشیدی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد: alireza71khoshnavid@gmail.com

۲- استادیار: moayyedi@qom.ac.ir

## ۱- مقدمه

است؛ زیرا از یک سو این ذرات ریزمقیاس، انرژی خورشید را به خود جذب کرده و سبب پراکنده شدن نور آن شده و از سویی دیگر انباشت این ذرات در طول زمان وابسته به میزان و غلظت موجود بر روی سلول خورشیدی، کارایی آن را می‌تواند به‌طور چشمگیری کم کند. از این سو تمیز کردن این سلول‌ها هم زمان‌بر بوده و هم گران تمام می‌شود. به‌خصوص وقتی که در نواحی نصب شود که امکان دسترسی و تجهیزات پاک‌سازی چندان مقدور نباشد. پس باید با روش‌های مهندسی شده، راه‌حلی برای رفع این موضوع با استفاده از پیش‌بینی‌های دقیق میدان جریان یافت [۲].

دیر گوسنز و امانوئل ون کرسچایور آزمایش‌هایی به‌منظور اثر سرعت باد و غلظت ذرات گردوغبار موجود در هوا بر روی عملکرد سلول‌های فتوولتائیک انجام داد. آن‌ها نشان دادند که در سرعت‌های بالای باد، چگالی رسوب گردوغبار و همچنین تجمع ذرات بیشتر می‌شود. ولی در عین حال زمان نشست کمتر می‌باشد. این آزمایش‌ها بیانگر آن است که در سرعت‌های بیشتر پراکندگی نور بیشتر بوده ولی به نظر نمی‌رسد اثر این عامل نسبت به عامل قبلی چندان قابل توجه باشد. تمام آزمایش‌ها در یک تونل باد اجرا شد، یعنی محیطی که جریان هوا کاملاً ثابت بوده و سطح آشفتگی پایین است. در محیط طبیعی تغییرات زمانی و (فضایی) بیشتر رخ می‌دهد [۳]. در شرایط طبیعی، حتی در وضعیت بسیار آرام و بدون وجود باد، به علت آشفتگی، جابه‌جایی طبیعی یا حرکت افقی هوا همیشه حرکتی از هوا وجود دارد. از آنجاکه زمان واکنش ذرات گردوغبار کوچک بسیار پایین است، حمل و نقل ذرات بسیار کوچک حتی در سرعت‌های بسیار کم باد رخ می‌دهد [۴]. به گفته مژیا و کلیسی در طول یک دوره متوسط ۱۴۵ روز خشک‌سالی تابستانی، رسوب گردوغبار منجر به کاهش ۷/۴ درصدی بازده می‌شود. خاک گرفتگی میزان بازده مجموعه سلول‌های فتوولتائیک را که حدود ۱۵ درصد بوده در یک دوره خشک‌سالی ۱۴۵ روز به میزان ۱۳/۹ درصد کاهش خواهد داد [۵].

فرید سی کریستو شبیه‌سازی عددی را تحت عنوان مدل‌سازی عددی الگوهای باد در اطراف یک سلول سهموی خورشیدی با مقیاس کامل، انجام داد. این مطالعه روی پیش‌بینی‌های عددی میدان‌های سرعت، فشار و مسیر ذرات

با بررسی آمارهای جهانی می‌توان به این حقیقت پی برد که افزایش سرسام‌آور انرژی در سراسر جهان طی سال‌های متمادی، سبب یافتن راه‌حل‌های جایگزینی است که باید به‌صورت علمی موردبررسی قرار گیرد. حال باید به دنبال منابعی بود که بتواند جوابگوی این مقدار مصرف بوده و در یک چرخه طبیعی بازتولید بارها این هدف را برآورده سازد. به‌علاوه انرژی قابل‌دسترس و سازگار با محیط‌زیست باشد. به‌طورکلی، منابع انرژی که بتواند تعریف توسعه پایدار را به شکلی برآورده سازد. زمانی این هدف می‌تواند جای خود را در بین موضوعات مهم جهانی باز کند که از نظر اقتصادی هم مقرون‌به‌صرفه باشد. انرژی خورشیدی یکی از منابع برآورد جایگزین سوخت‌های فسیلی بوده که بشر توانسته با بهره‌برداری صحیح از آن، مقدار وابستگی خود به منابع تجدیدنپذیر را به‌طور هدفمند کم کند. روش مرسوم امروزی برای استفاده از انرژی خورشیدی، بهره بردن از صفحاتی است که نور خورشید را دریافت و به‌وسیله فرآیندی به انرژی‌های موردنیاز مصرف‌کننده تبدیل کند. این صفحات بیشتر در مناطقی نصب شده که بتواند بیشترین انرژی دریافتی از خورشید را کسب کند. به همین سبب انتخاب نواحی بیابانی، گرم و در محیطی باز می‌تواند انتخابی مناسب برای استحصال انرژی از نور موردنیاز خورشید باشد. همچنین برای رسیدن به بیشترین بازدهی باید موقعیت جغرافیایی (عرض جغرافیایی و تابش خورشیدی) و طراحی نصب (شیب، جهت و ارتفاع) را به‌صورت دقیق تعیین کرد.

گردوغبار یک اصطلاح عمومی برای هر ذره با قطر کمتر از ۵۰۰ میکرومتر می‌باشد که اندازه‌های معادل ابعاد یک فیبر نوری استفاده‌شده در ارتباطات یا ۱۰ برابر قطر موی انسان دارد. اندازه، اجزا و شکل ذرات گردوغبار با توجه به منطقه در سرتاسر جهان متفاوت است. علاوه بر این، ویژگی‌های رسوب و نرخ‌های ذرات در محل‌های مختلف، متفاوت است. این عوامل بر پایه جغرافیا، اقلیم (آب‌وهوا) و شهرسازی منطقه قرار دارد [۱]. گردوغبار موجود در هوا با قطرهایی در حد میکرون و جنس جامد که به آئروسول‌ها تعبیر می‌شود یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در چند دهه اخیر توجه پژوهشگران انرژی‌های تجدیدپذیر را به خود جلب کرده

خاصی از آلودگی هوا را دارد، بود. در طول دوره مطالعه، یک سلول فتوولتاییک هر روز تمیز شده بود، درحالی‌که آثار خاک گرفتگی طبیعی در سراسر سلول‌های دیگر مشاهده شد. حداکثر توان هر دو سلول‌های خورشیدی مورد مقایسه به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری شد. این مقادیر برای هر روز از ساعت ۹ صبح تا ۳ بعدازظهر که میانگین مقدار آن در روز می‌باشد، محاسبه شد. داده‌های مربوط به دما، بارندگی و رطوبت از هیدرولوژی (آب‌شناسی) و هواشناسی کاتماندو برای نزدیک‌ترین سایت هواشناسی در فرودگاه بین‌المللی (Tribhuvan TIA) جمع‌آوری شد. آنالیز رگرسیون چندگانه برای محاسبه اثر ترکیبی تمام متغیرها به سمت توان خروجی انجام شد که منجر به کاهش کارایی سلول شد [۸].

یکی دیگر از مطالعات عددی، پژوهش مینگزی ژائو و همکاران می‌باشد. آن‌ها به شبیه‌سازی ضرایب فشار باد و روند توزیع غلظت ذرات گردوغبار پیرامون سلول‌های سهموی خطی پرداخت. همچنین از مدل ترکیبی دوفازی اوپلری بهره گرفت. در این پژوهش زاویه رو به باد سلول در حال تغییر است زیرا سلول نیاز به ردیابی موقعیت خورشید داشته و جهت باد ثابت نمی‌باشد. این تغییرات باعث ایجاد میدان جریان در اطراف سلول می‌شود. در نتیجه بر خصوصیات فشار باد آن تأثیر می‌گذارد. در این شبیه‌سازی عددی، توزیع فشار سطح تحت تأثیر زاویه وزش، از ۹۰- تا ۹۰+ با گام ۳۰ درجه در نظر گرفته شده و تأثیر زاویه باد بر انحلال گردوغبار با افزودن ذرات شن و ماسه مورد مطالعه قرار گرفت. در این بررسی ذرات گردوغبار کروی همسان با قطر و حجم موردنظر، سیال تراکم‌ناپذیر با چگالی ثابت، سرعت ورودی ذره برابر با سرعت گاز به‌نحوی که هیچ لغزشی وجود نداشته باشد، شرایط مسئله موردبررسی بود [۹].

مطالعه دیگری توسط مینگگوو یو و همکاران انجام گرفت و در این بررسی، آن‌ها به شبیه‌سازی تأثیر عبور جریان هوا ناشی از ایجاد شکافی در آینه برای سلول خورشیدی پرداختند. همچنین نشان دادند که اندازه شکاف آینه رابطه مستقیمی با بازده حرارتی و هزینه ساخت دارد. تغییر شکل (ایجاد شکاف) بسیار ریز در سلول رو به باد شدید بر دقت تمرکز تأثیر گذاشته و نیاز به استحکام ساختاری سلول را افزایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که

گردوغبار در جریان‌های پایا و ناپایا اطراف یک سلول سهموی‌وار خورشیدی استوار است. محاسبات برای سه سرعت باد ۴/۱۶، ۹/۷۲ و ۱۵/۲ متر بر ثانیه و زاویه گام سلول سهموی صفر تا ۱۸۰ انجام گرفته است. ساختار میدان جریان، ضرایب پسا و برآ برای هر پیکربندی جریان محاسبه شده است. جریان در حالت ناپایا به‌وسیله گردابه‌های پایدار در پشت سلول سهموی برای اکثر پیکربندی‌های جریان به‌جز زوایای ۶۰ و ۱۵۰ درجه مشخص شده است. در این زوایا ریزش گردابه با یک نوسان شدید جریان در جهت پائین‌دست سلول در حال گسترش است. برای زاویه گام زیر ۳۰ (سطح سلول رو به روی باد) نرخ رسوب ذرات بر روی سطح عملاً قابل‌اغماض است. اما در زاویه‌های گام بزرگ‌تر به‌صورت خطی با زاویه افزایش یافته و در زاویه بزرگ‌تر از ۱۲۰ ثابت می‌شود. بالاترین نرخ رسوب در زاویه ۱۲۰ تا ۱۵۰ رخ می‌دهد. این جهت‌گیری مربوط به زمانی از روز است که سرعت باد به بالاترین مقدار خود می‌رسد [۶]. محمد یوزار و همکارانش به‌منظور بررسی رفتار جریان سه‌بعدی در اطراف سلول خورشیدی سهموی از روش شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی بهره برد. این مطالعه به دو صورت کمی و کیفی با هم مقایسه شد. در حالت کمی محاسبات سه‌بعدی برای مدل مقیاس شده ۱:۳۳ سلول سهموی در زاویه‌های گام مختلف از ۹۰ درجه (وزش باد مستقیم و از روبه‌رو بر سطح سلول) تا ۹۰- درجه (وزش باد در پشت سلول سهموی) انجام شد. پدیدارسازی جریان اطراف ساختار سلول سهموی شکل با استفاده از دود انجام شد که اجازه می‌دهد نتایج شبیه‌سازی به‌صورت کیفی تأیید شود. در مطالعه کیفی، مشاهده می‌شود که حداکثر اغتشاش لایه برشی در زاویه ۹۰ درجه می‌باشد. اغتشاش در لایه برشی با کاهش زاویه کاهش یافته و می‌توان مشاهده کرد که حداقل گسیختگی در لایه برشی در مورد زاویه صفر درجه (زمانی که دهانه سلول به‌صورت عمودی به سمت بالا) می‌باشد. همچنین افزایش در لایه برشی با افزایش زاویه گام را می‌توان با جریان هوا از سمت پشت سلول مشاهده کرد [۷]. آزمایش‌هایی به‌وسیله باسنت راج پودیال و شری راج شکیا بر روی سقف یک ساختمان متصل شده به یک جاده شلوغ در محل مؤسسه مهندسی دانشگاه ترابهیون نیپال از ۱۳ آگوست ۲۰۱۵ تا ۱۰ ژانویه ۲۰۱۶ انجام شد. نمونه مطالعاتی آن‌ها، شهر کاتماندو که شرایط

سلول خورشیدی، مستقیماً متناسب با مقادیر تابش خورشیدی است. علاوه بر این، حداکثر توان خروجی برای سلول تمیز بیشتر از سلول غبارگرفته در طول روز در ترازهای مختلف تابش خورشیدی بود [۱۱].

هدف از این مطالعه عددی این است تا با استفاده از تغییرات سرعت جریان و تغییر زاویه گام سلول سهموی شکل، بتوان راه‌حلی جهت کاهش انباشت ذرات ریزمقیاس گردوغبار بر روی سطح سلول به‌صورت خودکار پیدا کرد. همچنین با تخمین دقیق ساختار جریان بتوان تغییرات فشار و میدان سرعت اطراف سلول موردنظر را یافت و با پیدا کردن بهترین شکل قرارگیری، نیروها و گشتاورهای اعمالی برای جهت‌گیری سلول محاسبه خواهد شد. پس با اعمال گشتاور بر مرکز سلول و تغییر زاویه در زمان انباشت گردوغبار می‌توان از اثرات این ذرات در طول زمان متمادی کاست.

## ۲- معادلات حاکم

هر شبیه‌سازی مستلزم استفاده از معادلاتی است که بتواند شرایط مسئله را به بیان ریاضی تبیین می‌کنند. در این پژوهش سیال هوا با لزجت و چگالی ثابت در نظر گرفته شده که ذرات ریزمقیاس جامد در آن پخش شده است. ذرات می‌تواند از توده سیال اثر گیرد و جریان دوفازی به وجود می‌آید. تقابل دو فاز به‌صورت کوپل یک‌راهه می‌باشد. جهت دنبال کردن ذرات از دیدگاه لاگرانژی بهره گرفته شده است. روشن است دو دسته معادلات وجود خواهد داشت. دسته اول معادلاتی که به توصیف رفتار سیال پرداخته و دسته دوم معادلاتی که به توصیف فاز پراکنده (جدا شده) جامد مربوط می‌شود.

### ۲-۱- معادلات جریان سیال

معادلات حاکم بر حرکت سیال تراکم ناپذیر، لزج و نیوتنی شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت خطی بوده که در شکل بی‌بعد به‌صورت رابطه (۱) می‌باشند:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + (\mu + \mu_T) \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

بار باد بر روی سلول به موقعیت عملیاتی مانند زاویه گام ۳۰ درجه و زاویه سمتی ۶۰ درجه حساس است. این شکاف باعث توزیع نامتوازن ضریب فشار متوسط بر روی سلول می‌شود. در نتیجه خطر لرزش ناشی از باد در سلول را افزایش می‌دهد. در حالت کلی نیروی باد بر روی سلول در حالت بیشینه زاویه عملکردی نیروی پسا، شکاف آینه‌ای می‌تواند نیروی باد را تا حدود ۳/۵۴٪ (با افزایش شکاف آینه) کاهش داده که عمدتاً به دلیل کاهش قابل توجه ناحیه رو به باد است؛ بنابراین شکاف آینه باید تا حد امکان کوچک‌تر باشد. [۱۰].

دیدار و همکاران آزمایش‌ها را تحت عنوان ائتلاف توان خروجی سلول‌های فتوولتائیک سیلیکون بلوری به دلیل انباشت گردوغبار در محیط صحرا انجام داد. در مطالعه او اثر تابش خورشید، رسوب گردوغبار و طوفان‌های شن بر عملکرد سلول‌های کریستالی فتوولتائیک نصب شده در محیط صحرا به‌صورت تجربی بررسی شد. علاوه بر این، مشخصات گردوغبار رسوب شده با استفاده از یک طیف‌سنج XRF، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که تغییر در عملکرد سلول‌های فتوولتائیک در جنوب الجزایر بسیار وابسته به انباشت گردوغبار بود. هم‌توان خروجی و هم‌جریان اتصال کوتاه سلول با تابش خورشید متناسب مستقیم و با چگالی تجمع گردوغبار تناسب عکس داشت. همچنین افزایش مدت‌زمان تابش تحت شرایط خارجی بدون تمیزکاری (دستی یا طبیعی) منجر به افت عملکرد سلول فتوولتائیک به دلیل افزایش چگالی غبار رسوب‌گذاری شده می‌شود. توان خروجی سلول گردوفاکی پس از دو هفته تماس در فضای باز ۵/۷۱٪ کاهش یافت. این مقدار پس از هشت هفته نوردهی در فضای باز در مقایسه با سلول تمیز به ۸/۴۱٪ افزایش یافت. به‌علاوه طوفان شن منجر به رسوب مقدار زیادی گردوغبار در سطح سلول شد که عملکرد آن را کاهش داد. نتایج نشان داد که یک روز طوفان شن تولید برق نیروگاه بیش از ۳۲٪ کاهش یافت. در این مقاله، تغییرات حداکثر توان خروجی برای سلول‌های تمیز و گردوفاکی در مقایسه با تغییر شدت تابش خورشیدی در زمان‌های مختلف روز (۱۰ جولای ۲۰۱۸) نشان می‌دهد که حداکثر خروجی قدرت برای هر دو

## ۲-۲- مدل آشفتگی

فرضیاتی که برای ذرات گردوغبار در این مطالعه در نظر

گرفته شده به شرح زیر می‌باشد:

- ا. کروی شکل
- ب. قطر یکسان به اندازه ۱۰
- ج. نشست ذرات بدون حضور رطوبت
- د. حجم ذرات به کل فضا کمتر از ۱۰٪
- ه. محیط ذرات رقیق

همچنین تزریق ذرات از نوع سطحی، ذرات از نوع بی‌اثر و از شرط مرزی بازتاب استفاده شده است. معادله حاکم بر حرکت ذرات به شرح زیر می‌باشد:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (5)$$

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24}, \quad Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu}$$

خط مسیر یک ذره فاز گسسته، با ترکیب کردن تعادل نیرو بر ذره که در چارچوب مرجع لاگرانژی نوشته می‌شود، پیش‌بینی می‌شود. در معادله (۵)،  $\rho_p$ ،  $u_p$  و  $d_p$  به ترتیب بردار سرعت، چگالی و قطر ذرات گردوغبار و همچنین  $\rho$ ،  $u$  و  $\mu$  چگالی، سرعت و لزجت هوا می‌باشد. به علاوه  $F_D$  نیروی پسا (به صورت نرمال شده بر جرم) وارد بر ذره می‌باشد. این نیرو ناشی از اختلاف سرعت ذره و جریان هوا بوده و هرچه جابه‌جایی ذره بیشتر شود، مقدار آن افزایش می‌یابد. همچنین بخش دوم معادله (۵) شامل یک عبارت مرتبط با شتاب جاذبه بر روی ذره بوده که متأثر از نسبت چگالی سیال به ذره می‌باشد.

## ۳- شبکه محاسباتی و شرایط مرزی

در این پژوهش، سه سلول سهموی با هندسه با مشخصات فیزیکی مفروض مدل‌سازی شده است. این سلول‌ها با قطر دهانه و تورفتگی به ترتیب ۲ m و ۰/۵ m و با ضخامت ۰/۰۲ m درون حجم کنترل مکعبی با ابعاد ۳ m<sup>3</sup> ۱۰×۲۰×۳۰ قرار گرفته‌اند. برای شبیه‌سازی عددی میدان جریان با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی باید ابتدا میدان حل برای آن مشخص شده و سپس شبکه محاسباتی برای آن تولید شود. در شکل ۱ مدل هندسی موردنظر، شرایط مرزی و نوع شبکه‌بندی برای مسئله نشان داده شده

معادلات دیگری که برای شبیه‌سازی اثرات آشفتگی در جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد، مربوط به مدل آشفتگی است. مدل استفاده شده در این مطالعه، SST k- $\omega$  بوده که یک مدل دو معادله‌ای می‌باشد. این مدل از لحاظ ظاهری بسیار شبیه به مدل استاندارد k- $\omega$  می‌باشد، البته لازم به ذکر است که مدل استاندارد k- $\omega$  بر مبنای مدل ویلکوکس k- $\omega$  بازسازی شده است، اما در این میان از برخی اصطلاحات مربوط به «اثرات عدد رینولدز پائین»، «اثرات تراکم‌پذیری» و نیز «اثرات پراکندگی جریان برشی» در آن استفاده شده است. مدل SST k- $\omega$  علاوه بر قابلیت‌های معمول موجود در مدل k- $\omega$ ، شامل بهینه‌سازی‌های دیگری نیز می‌باشد [۱۲].

$$\frac{\partial k}{\partial t} = (u \cdot \nabla)k = P - \beta^* \omega k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = (u \cdot \nabla)\omega = \frac{\gamma}{\nu_T} P - \beta^* \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right\} + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_\omega^2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$\mu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (4)$$

در معادلات فوق،  $\beta^*$  ضریب اثرات مربوط به اعداد رینولدز پائین را در معادلات وارد می‌کند.  $\sigma_\omega$  و  $\sigma_k$  اعداد پیرانتل  $F_1$  و  $F_2$  تابع تغییر وضعیت و  $a_1$  و  $a_2$  ثوابت می‌باشد؛ همچنین  $C_\mu$  ضریب ثابتی می‌باشد [۱۳].

## ۲-۳- معادلات حرکت ذرات گردوغبار

در جریان دو فاز جامد-گاز حرکت ذرات معلق جامد درون یک گاز بررسی می‌شود. به‌عنوان نمونه شبیه‌سازی جریان‌های جوی همراه با ذرات معلق در آن و محاسبه میزان آلودگی هوا و تعداد ذرات معلق در آن در همین شاخه قرار می‌گیرد [۱۴]. مدل فاز مجزا، از رویکرد لاگرانژی بهره می‌برد. فاز سیال با معادله ناویر-استوکس و فاز مجزا به‌وسیله ردیابی تعدادی ذره مدل می‌شود. در این مطالعه فاز سیال پیوسته از جنس گاز و هوا در نظر گرفته شده است در حالی فاز گسسته و جداگانه از جنس جامد می‌باشد [۱۵].

برای حل عددی معادلات انرژی جنبشی و نرخ اضمحلال آشفته‌گی نیز از روش مرتبه دوم بالادست بهره برده شده است. همچنین معادلات حرکت ذرات گردوغبار با استفاده از روش دوزنقه‌ای حل شده است [۱۶].

#### ۴-۱- بررسی استقلال حل از شبکه

به منظور بررسی استقلال از شبکه در حل عددی، مسئله با چهار شبکه بندی با اندازه‌های متفاوت در همه زوایای مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی استقلال حل از شبکه در خط تقارن مرکزی در راستای عرضی (Z)، تغییرات فشار بر روی سطح سلول (S) برای زوایای متفاوت و در سرعت-های مختلف مقایسه شده است. در شکل ۳ تغییرات ضریب فشار برای زاویه ۴۵ و ۶۰ درجه و سرعت ۵ متر بر ثانیه، که به دلیل گرادیان سرعت و جهت گیری سلول می‌تواند یکی از حالت‌های بحرانی این مطالعه باشد، نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است بیشترین مقدار فشار در زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه حدوداً مرکز سلول شماره ۱ و همچنین همیشه کمترین فشار در لبه‌هایی انتهایی سلول می‌باشد. همچنین در جدول ۱ تعداد المان‌های مربوط به این شبکه‌ها مشخص شده است. طبق رابطه (۶)  $S_0$  مرکز سلول شماره ۱ بوده که دارای مختصات  $(x_0, y_0)$  در مبدأ می‌باشد. همچنین  $S_1$  مختصات جدید تعریف شده است.

$$S_1 = S_0 + \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \quad (6)$$

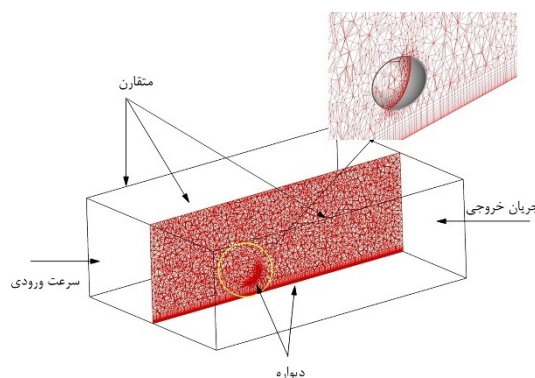
همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر فشار در راستای جریان در تعداد شبکه بندی مختلف تقریباً یکسان بوده که نشان دهنده نتیجه مطلوب در کیفیت شبکه بندی می‌باشد. نتایج حاصل از استقلال حل از شبکه در تمامی حالت هم تقریباً این صحت سنجی را تأیید می‌کند.

جدول (۱). مشخصات شبکه‌های محاسباتی مختلف در

زاویه گام ۴۵ درجه

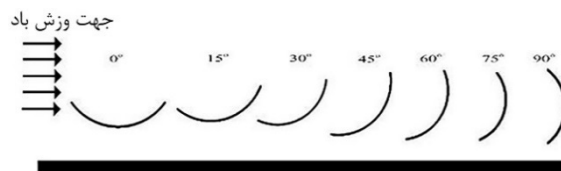
تعداد سلول‌ها	شبکه بندی
۶۶۸,۱۹۰	Mesh 1
۱,۰۷۰,۰۰۲	Mesh 2
۱,۴۹۱,۴۳۵	Mesh 3
۲,۶۷۸,۹۲۱	Mesh 4

است. در ورودی حجم کنترل شرط مرزی سرعت ورودی، در خروجی از شرط مرزی جریان خروجی، برای سلول سهمی-شکل و سطح آن، شرط مرزی عدم لغزش و برای مرزهای اطراف حجم کنترل از شرط مرزی تقارن استفاده شده است؛ همچنین شبکه بندی اطراف سلول سهمی که به صورت یک شبکه ترکیبی است، نشان داده شده است. برای این فرم از شبکه در نواحی نزدیک به جسم از شبکه لایه مرزی استفاده شده است.



شکل (۱). هندسه مسئله، شرایط مرزی مورد نظر و شبکه محاسباتی

در این شبیه سازی، مطابق با شکل ۲، در مرحله اول اثر باد با سرعت‌های مختلف از ۰/۵ تا ۵ متر بر ثانیه در زوایای گام سلول‌ها  $(\theta)$  از صفر تا ۹۰ درجه با افزایش گام ۱۵ درجه نسبت به سطح افق مورد بررسی قرار گرفته است. سپس در مرحله دوم با تزریق ذرات ریزمقیاس از روی سطح سلول، نحوه پراکندگی، نشست و اثر آن بر روی بازده سلول خورشیدی مورد بررسی ارزیابی قرار گرفته است.

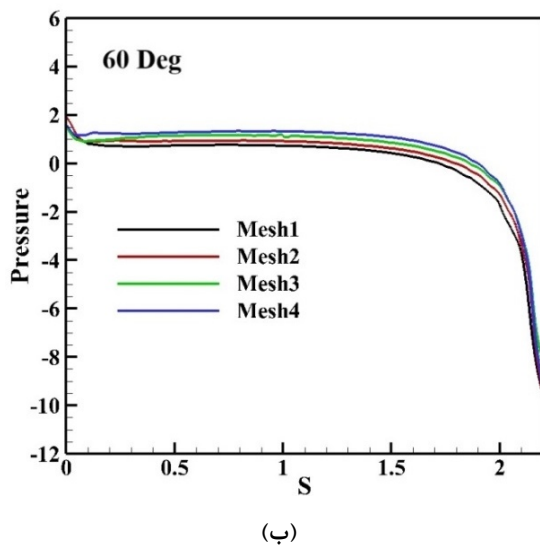
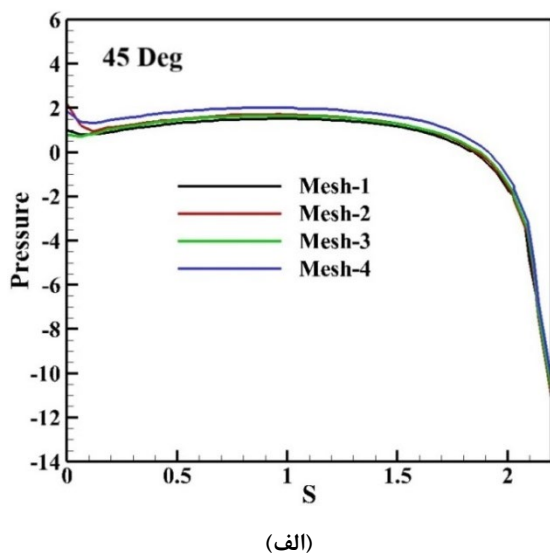


شکل (۲). نحوه تغییر زوایای گام سلول در برابر جریان هوا

#### ۴- روش حل عددی

همان‌طور که اشاره شد به منظور حل معادلات حاکم بر میدان جریان، معادلات آشفته‌گی و حرکت ذرات گردوغبار از روش عددی استفاده شده است. معادلات میدان جریان با روش حجم محدود مرتبه دوم بالادست جداسازی شده و

پیش‌بینی‌شده برحسب تغییرات زاویه گام حاصل از این پژوهش با بیان تحلیلی پیشنهادشده توسط کریستو، نتایج تجربی ارائه‌شده توسط وانگر و همچنین داده‌های شبیه‌سازی عددی بوزار مقایسه شده است. مشاهده می‌شود هنگامی که سلول سهموی به طرف بالا و عمود بر جریان قرار دارد این ضریب مقدار صفر و زمانی که عمود بر جهت جریان می‌باشد، مقدار ضریب حداکثر می‌باشد. شکل ۴ نشان از تطابق قابل قبول حل عددی با داده‌های تجربی مشابه می‌باشد.



شکل (۳). تغییرات فشار روی سطح سلول سهمی شماره ۱ در زاویه ۴۵ (الف) و ۶۰ (ب) درجه به ازای ۴ شبکه‌بندی مختلف برای سرعت ۵ متر بر ثانیه

نکته بسیار مهم در بررسی استقلال حل از شبکه که معمولاً برای دریافت تغییرات زیاد در پاسخ برای شبکه‌های بزرگ‌تر، کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد این نکته حائز اهمیت است که استقلال حل از شبکه برای شبکه‌های مختلف باید به شرط این صورت پذیرد که مقدار  $y^+$  برای اولین سلول در تمامی شبکه‌ها برابر با مقدار مناسب مسئله باشد؛ از این رو در این پژوهش برای تمامی شبکه‌های استفاده شده، مقدار  $y^+$  محاسبه و مشخص شد که تغییرات در محدوده مناسب می‌باشد. بر طبق جدول (۲-۵) مقدار این کمیت بر روی سطوح رو به باد سلول‌ها، عددی در حدود ۲۵ برای سرعت ۱ متر بر ثانیه، تعداد سلول‌های شبکه از ۰/۵ تا ۲/۶ میلیون و به ازای زاویه گام ۳۰ درجه بوده که نشان از یکسان بودن مقدار  $y^+$  برای شبکه‌بندی‌های مختلف دارد. به علاوه چون با ریز کردن تعداد شبکه‌بندی در مقدار  $y^+$  تغییر مشاهده نشد، پس می‌توان نتیجه گرفت که شبکه‌بندی از کیفیت نسبتاً قابل قبولی برخوردار است.

جدول (۲). مقدار  $y^+$  در زاویه ۳۰ درجه و سرعت ۱ متر بر ثانیه برای شبکه‌بندی‌های مختلف

تعداد سلول‌ها	مقدار $y^+$
۵۰۰۰۰۰	۲۴/۹۵
۸۷۰۰۰۰	۲۵/۲۹
۱۱۰۰۰۰۰	۲۵/۲۷
۲۶۰۰۰۰۰	۲۵/۴۷

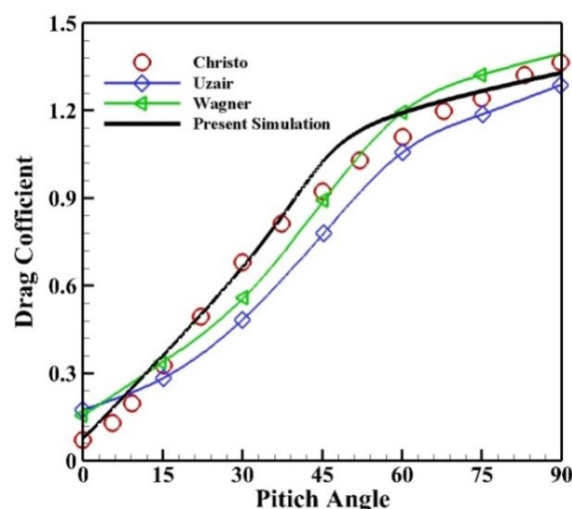
#### ۲-۴- صحت سنجی نتایج حل عددی

به منظور صحت‌گذاری روش حل عددی، نتایج حاصل از آن با داده‌های آزمایشگاهی و همچنین شبیه‌سازی‌های مشابه در سرعتی حدود ۳/۲ متر بر ثانیه مقایسه شده است [۸ و ۹]. بدین منظور از مدل آشفتگی SST k-w برای جریان آشفته همراه با شرط مرزی عدم لغزش روی دیواره و سرعت جریان ورودی مشابه با آن، بهره برده شده است. مدل مورد نظر یک سلول سهموی با قطر دهانه ۱/۵ متر می‌باشد. مشخصات هوا با چگالی و لزجت ثابت در نظر گرفته شده است. در شکل ۴ مقادیر ضریب پسا

مورد را با توجه به سرعت‌ها و زوایای گام متفاوت سلول و محاسبه نیروهای آیرودینامیکی و گشتاورهای عمل‌کننده بر مرکز چرخش سلول مبتنی بر داده‌های حل عددی می‌توان یافت.

#### ۵-۱- شبیه‌سازی میدان جریان پیرامون صفحات خورشیدی

هنگامی که سیال از روی یک جسم ساکن عبور می‌کند، می‌توان با ثابت کردن دستگاه مختصات بر روی جسم موردنظر، جریان خارجی حول آن را مدل‌سازی نمود. روشن است میدان‌های جریان و هندسه‌ها برای بیشتر مسائل جریان خارجی بسیار پیچیده‌تر از آن بوده که بتوان آن‌ها را به صورت تحلیلی حل کرد؛ از این رو می‌بایست به روابط بر مبنای اطلاعات تجربی و یا شبیه‌سازی‌های پیشرفته با کامپیوتر تکیه کرد [۱۷]. در شکل ۵ میدان جریان حول مجموعه سلول‌های خورشیدی مفروض در زوایای گام صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه به ترتیب نشان داده شده است. ایجاد جریان گردابی در پائین دست در زوایای مختلف مؤید این حقیقت بوده که گرادیان فشار ایجاد شده در پشت سلول موردنظر، شرایط حبس جریان را بیشتر می‌کند. از این موضوع می‌توان دریافت که پایداری ذرات در پشت سلول‌ها در زوایای گام مشخصی بیشتر است. همچنین ایجاد مناطق کم‌فشار در پائین دست جریان، طبق رابطه برنولی، سبب افزایش سرعت محلی در این ناحیه می‌شود. همیشه کمترین سرعت در لحظه برخورد جریان به دیواره سلول سهموی اتفاق می‌افتد چراکه اجازه عبور جریان داده نمی‌شود. در زوایای صفر، ۱۵ و ۳۰ درجه به علت زاویه نسبتاً کم سلول با زمین از ایجاد گردابه جلوگیری شده است. در زوایای ۴۵ و ۶۰ به علت ایجاد یک گردابه قوی، منظم و پایدار در پائین دست جریان و پشت سلول‌ها نیاز به طراحی سازه‌ای با استحکام بیشتر برای سیستم خورشیدی بوده چراکه سبب افزایش نیروی پسای فشاری می‌شود. به علاوه شرایط حبس جریان را بیشتر نموده که در طول زمان می‌تواند سبب آسیب ساختاری به سلول شود. اما در زوایای ۷۵ و ۹۰ درجه قدرت تبدیل به گردابه پایدار را از دست داده‌اند.



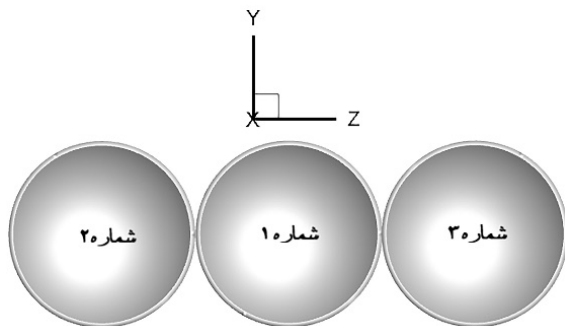
شکل (۴). مقایسه تغییرات ضریب پسا برحسب زاویه گام حاصل از پژوهش حاضر با داده‌های گزارش شده برای سرعت جریان ۳/۲ متر بر ثانیه [۹ و ۸]

#### ۵- نتایج و بحث

در این قسمت نتایج حاصل از پژوهش ارائه شده است. شبیه‌سازی برای یک دسته سه تایی از سلول‌های خورشیدی سهموی با قطری معادل ۲ متر انجام شده است. برای این منظور میدان جریان به ازای هر مقدار سرعت جریان ورودی، زاویه گام به صورت پایا شبیه‌سازی شده است. بعد از رسیدن به معیار همگرایی مطلوب، می‌توان پارامترهای مهم انتقال، انتشار و جابه‌جایی ذرات ریزمقیاس جامد را به عنوان مسئله وابسته به زمان در نظر گرفت. برای مسئله مفروض، پراکندگی ذرات ریزمقیاس در زمان حل شده و تغییر غلظت در این حالات مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، زوایای گام از صفر تا ۹۰ درجه با گام‌های ۱۵ درجه و همچنین سرعت جریان از صفر تا ۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شده بود یکی از اهداف این پژوهش یافتن راه‌حل مهندسی با تکیه بر داده‌های شبیه‌سازی، به منظور جلوگیری از انباشت ذرات می‌باشد. بر این اساس می‌توان برای هر سلول خورشیدی سیستم اتوماتیکی طراحی نمود که با تغییرات ساعت، زاویه تابش خورشید و همچنین نشست ذرات گردوغبار وابسته به سرعت جریان بتوان به وسیله تغییر زاویه سلول در کوتاه‌ترین زمان از اثرات کاهش بازده جلوگیری نمود. این



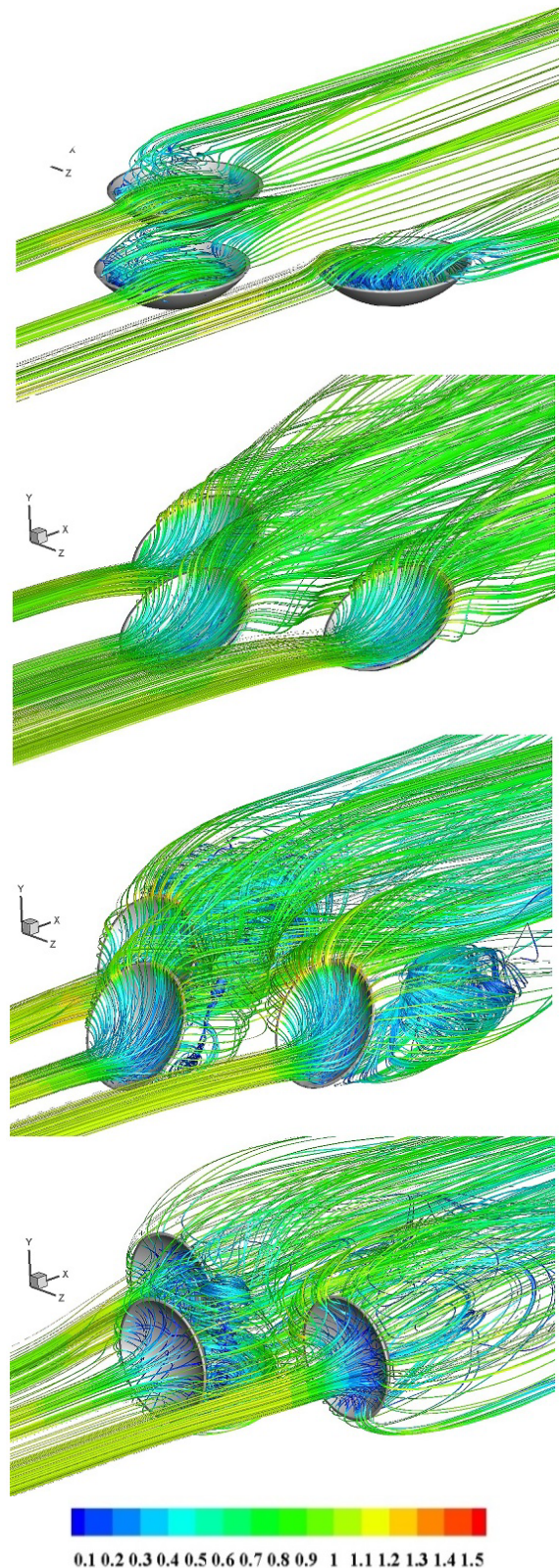
این نکته بر روی تحلیل استاتیکی فشار می‌تواند حائز اهمیت باشد. از خطوط جریان نشان داده شده می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین مقدار مطلق سرعت در هنگام عبور از لبه بالایی سلول سهموی رخ می‌دهد. به منظور مشخص کردن دقیق سلول‌ها به تفکیک در شکل ۶، شماره‌گذاری سلول‌ها نمایش داده شده است. در شکل ۷، خطوط هم‌تراز فشار استاتیک بر روی سلول سهموی شماره ۱، نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است بر روی هر سلول سهموی شکل، کمترین فشار بر روی لبه بالایی سلول می‌باشد. این ناحیه جایی است که سرعت جریان به واسطه مواجه شدن با یک سطح در مقابلش، کاهش می‌یابد. این شرایط سبب افزایش نیروی فشاری شده و در نتیجه منجر به انباشت محلی بیشتر ذرات در این نواحی خواهد شد. با توجه به شکل ۵ در ناحیه پشت سلول نواحی کم‌فشار با جریان برگشتی تقویت شده ایجاد شده است. این بخش‌ها می‌تواند به افزایش مقدار نیروی پسای فشاری کمک بیشتری کرده و سبب افزایش مقدار نیروی پسا به صورت کلی شود.



شکل (۶). شماره‌گذاری سلول‌های سهموی

### ۵-۱-۲- محاسبه ضرایب و نیروهای آیرودینامیکی وارد بر سلول خورشیدی

جریان سیال حول اجسام جامد عامل ایجاد اثر فیزیکی به نام نیروهای آیرودینامیکی می‌باشد. نیروی وارد شده در جهت جریان از طرف یک سیال در حال جریان بر یک جسم، پسا نامیده می‌شود. این نیرو ناشی از اثرات ترکیبی نیروهای برشی دیواره و نیروهای فشاری می‌باشد؛ همچنین



شکل (۵). خطوط جریان اطراف سلول‌های خورشیدی رنگی شده با مقدار سرعت محلی برای سرعت ورودی ۱ متر بر ثانیه و در زوایای مختلف (صفر تا ۹۰ درجه با گام‌های ۳۰ درجه و از بالا به پائین)

نیروهای فشاری و برشی وارد شده بر مساحت دیفرانسیلی  $dA$  در سطح، به ترتیب  $PdA$  و  $\tau_\omega$  بوده که در آن زاویه  $\theta$  زاویه بین بردار عمود بر سطح  $dA$  با جهت مثبت جریان می‌باشد. (در اینجا  $\theta$  متمم زاویه گام می‌باشد). هنگامی که  $\theta = 90^\circ$  است نیروی پسا فقط به برش در دیواره بستگی دارد (پسای اصطکاک پوستی). چراکه برای جریان موازی با لبه‌های سلول سهموی، مقدار ضریب پسا بسیار نزدیک به ضریب پسا اصطکاک شده و نسبت مستقیمی با لزجت سیال دارد. زمانی که  $\theta = 0^\circ$  می‌باشد، (عمود بر جهت جریان) نیروی پسا تنها به فشار وابسته خواهد بود.

$$dF_D = -PdA \cos \theta + \tau_\omega dA \sin \theta \quad (7)$$

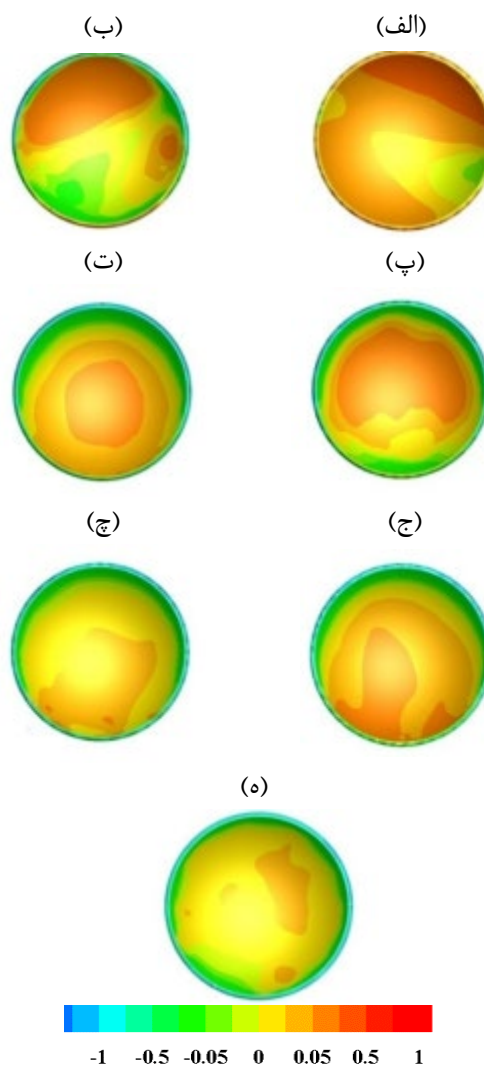
$$dF_L = -PdA \sin \theta - \tau_\omega dA \cos \theta$$

چنانچه نمودار نیروهای آیرودینامیکی برحسب سرعت ترسیم شود، به دلیل وابستگی شدید این نیروها به سرعت (تابعی از مجذور سرعت)، مطابق شکل ۸، مشخص می‌شود با افزایش مقدار این کمیت، این نیروها به‌طور کلی از نظر مقدار افزایش خواهند یافت. اگر در یک سرعت جریان آزاد ثابت، زاویه گام افزایش یابد، نیروی پسا رشد افزایشی چشمگیری دارد چراکه نیروی مقاوم بیشتری در جهت جریان ایجاد شده و سبب کند شدن آن می‌شود. این افزایش زاویه در زاویه گام  $90^\circ$  درجه مقداری برابر با صفر را برای نیروی برآ نمایش داده و در زاویه گام  $30^\circ$  درجه بیشترین مقدار را به خود می‌گیرد. بنابراین زاویه گام برای نیروی برآ به‌مانند نیروی پسا نمی‌تواند از یک الگوی مستقیم پیروی کند.

#### ۵-۱-۳- محاسبه گشتاورها حول محور چرخش سلول

مطابق شکل ۹، سطح نوری بازتابنده، یک دیسک سهموی است. شکلی که با چرخش یک سهمی حول محور خود به دست می‌آید. آن یک سطح پیوسته و یا چندوجهی می‌باشد [۱۰]. نیروی سیال ممکن است گشتاورهایی را نیز تولید کرده و موجب چرخش جسم شود. گشتاور حول محور موازی با جهت جریان، گشتاور حول محور در جهت عمود بر جریان و گشتاور حول محور نیروی جانبی از آن جمله بوده که به ترتیب گشتاور غلتشی، گشتاور سمتی (گشتاور

مؤلفه نیروهای فشاری و برشی دیواره در جهت عمود بر جریان تمایل به حرکت جسم در آن جهت داشته که جمع آن‌ها نیروی برآ کلی را نتیجه می‌دهد. نیروهای پسا و برآ بیش از سایر موارد به چگالی سیال، سرعت جریان بالادست، شکل هندسی و جهت‌گیری جسم بستگی دارد. در این بخش با استفاده از نتایج مراحل قبل می‌توان ضرایب آیرودینامیکی را به دست آورد. در مسئله موردبحث، مساحت مؤثر معمولاً مساحت پیشانی (مساحت تصویر شده بر صفحه عمود بر جهت جریان) جسم می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر، این سطح، مساحت مشاهده‌شده توسط ناظر در جهت جریان است؛ همچنین ضریب پسا می‌تواند سبب تغییر نیروی پسا شود.

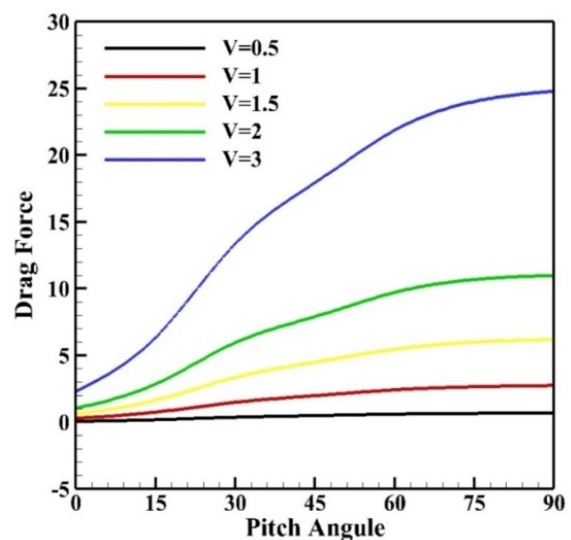


شکل (۷). توزیع فشار بر روی سطح جلویی سلول شماره ۱ برای سرعت ورودی ۱ متر بر ثانیه زاویه صفر تا  $90^\circ$  درجه (از الف تا ه) با افزایش زاویه گام  $15^\circ$  درجه

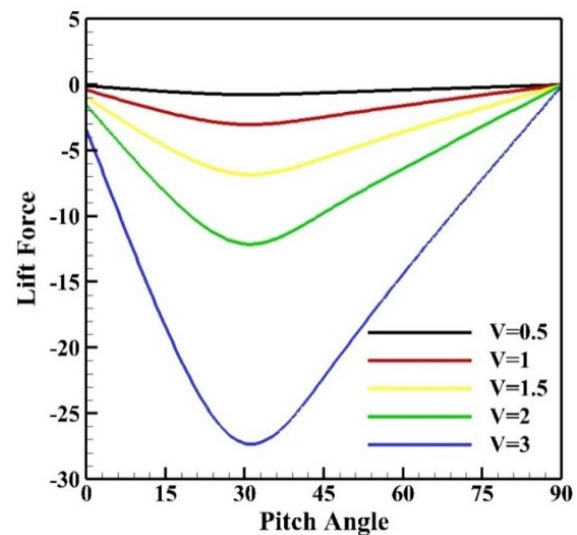
شکل ۱۰ تغییرات گشتاورهای پیچشی و سمتی را برحسب تغییر زاویه گام در سرعت‌های صفر تا ۳ متر بر ثانیه نمایش می‌دهد. برای اجسامی که دارای تقارن حول صفحات پسا-برآ باشد، هنگامی که جریان هوا موازی با لبه‌های سلول قرار می‌گیرد (زاویه گام صفر درجه)، گشتاور سمتی حدوداً صفر می‌شود. آنچه برای این‌گونه اجسام باقی می‌ماند، نیروهای پسا، برآ و گشتاور پیچشی است. در شکل ۱۰ می‌توان مشاهده کرد که در زاویه گام صفر درجه مقدار گشتاور سمتی به‌ویژه در سرعت‌های پائین کاهش می‌یابد. پس در این زاویه باید عملگر قرار داده شده در مرکز سلول بتواند بر گشتاور پیچشی غلبه کند. همچنین مادامی که لبه‌های سلول عمود بر جریان سیال باشد (زاویه گام ۹۰ درجه)، تنها نیروی پسا و گشتاور سمتی باقی می‌ماند. بنابراین در زاویه گام ۹۰ درجه که لبه‌های سلول عمود بر نیروی ناشی از جریان هوا می‌باشد، گشتاور پیچشی به مقدار صفر نزدیک شده است. در این زاویه، مقدار نیروی پسا و گشتاور سمتی تعیین‌کننده جهت حرکت سلول می‌باشد. در این زاویه هرچه سرعت افزایش یابد به تبع آن مقدار نیرویی که در جهت جریان به سلول وارد می‌شود، افزایش خواهد یافت.

همچنین با افزایش سرعت، مقدار گشتاور سمتی، پیچشی و نیروی برآ در زاویه ۳۰ درجه بیشترین مقدار خود را دارد. این زاویه می‌تواند به‌عنوان یک زاویه برای اعمال بارگذاری و تأثیر جریان هوا بر سازه در نظر گرفته شود. پس هنگام وزش باد شدید مخصوصاً در زاویه ۳۰ درجه برای غلبه بر تغییر جهت‌گیری سلول بین نیروها و گشتاورهای مؤثر، می‌توان یک موازنه‌ای برقرار نمود تا از مقدار نیروها و گشتاورها بر سلول کاست. از طرفی جهت‌گیری سلول از زاویه ۳۰ به ۴۵ درجه تغییر در گشتاور سمتی رخ داده که می‌تواند ناشی از گرادیان فشار نشان داده شده در شکل ۷ باشد. با بررسی دقیق‌تر در زاویه‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه در شکل ۱۰ می‌توان دریافت که سلول تمایل به گردش در سرعت‌های بالا در جهت گشتاور پیچشی دارد. در زوایای ۴۵ تا ۷۵ درجه به دلیل قرارگیری سلول از مقدار گشتاور سمتی بر حرکت سلول کم شده و عوامل محرک اصلی در جابه‌جایی آن، نیروهای پسا، برآ و گشتاور پیچشی می‌باشد.

واژگونی و گشتاور پیچشی نامیده می‌شوند [۱۷]. همچنین مطابق با شکل ۹ در این شبیه‌سازی می‌توان با قرار دادن مکانیزم عمل‌کننده‌ای<sup>۱</sup> در مرکز هر سلول در زمان موردنیاز به‌وسیله این مکانیزم، حرکت داد. در این پژوهش، گشتاورهای سمتی ( $M_y$ ) و پیچشی ( $M_z$ ) حائز اهمیت بوده چراکه سلول خورشیدی، فقط قادر به حرکت در این راستاها است. در این راستا مقادیر گشتاورهای نامبرده حول مرکز دوران سلول خورشیدی و به ازای زوایای گام متفاوت محاسبه و بررسی شده‌اند



(الف)



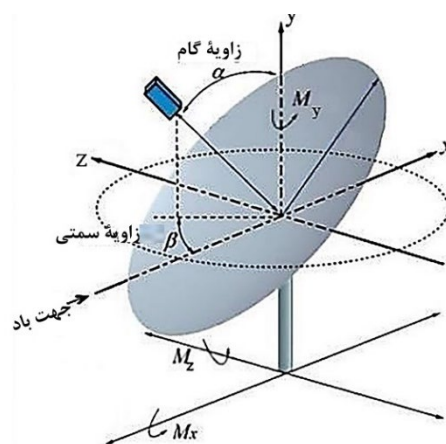
(ب)

شکل ۸). تغییرات نیروهای (الف) پسا و (ب) برآ برحسب زوایای گام مختلف در سرعت‌های متفاوت

<sup>1</sup> Actuator

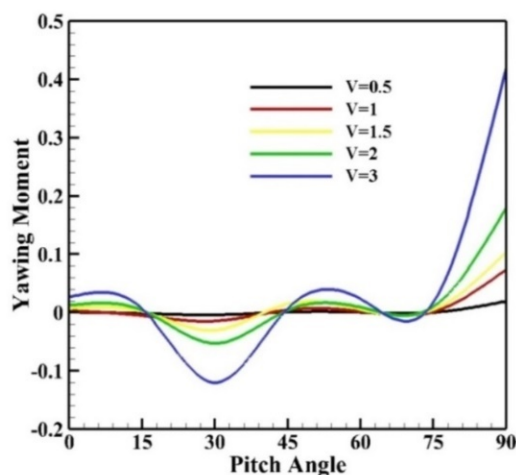
## ۵-۲- شبیه‌سازی جریان و انتشار ذرات گردوغبار در حالت ناپایا به ازای تغییرات سرعت

به‌منظور مطالعه دینامیک ذرات غبار، محاسبات وابسته به زمان برای میدان جریان و حرکت ذرات بکار گرفته شده تا تأثیر تغییرات مشخصه‌های جریان سیال بر میزان انباشت و جابه‌جایی ذرات روی سطح سلول‌ها مورد بررسی قرار گیرد. از این‌رو، برای یافتن مسیر حرکت ذرات در لحظات مختلف، معادلات مربوط به فاز مجزا به‌صورت وابسته به زمان حل شده است. گام زمانی به‌گونه‌ای انتخاب شده که هم شبیه‌سازی میدان جریان و حرکت ذرات با دقت قابل قبولی صورت گیرد و هم هزینه محاسباتی افزایش پیدا نکند. از این‌رو گام زمانی به مقدار ۰/۰۱ ثانیه انتخاب شده و حل برای تعداد گام زمانی ۱۰۰۰ صورت گرفته است. با توجه به اینکه فاز گسسته با فاز پیوسته تبادل جرم ندارد، ذرات به‌صورت راکد (بدون مقدار سرعت مشخصی برای ذرات و صرفاً تحت تأثیر سرعت ذرات سیال) در نظر گرفته شده است. ذرات از روی سطح جلویی سلول‌ها و به‌صورت تزریق سطحی، پاشش شده‌اند. از آنجایی که همبستگی بین ذره و سیال از نوع کوپل یک‌راهه می‌باشد، ابتدا جریان سیال تا همگرایی کامل حل شده و سپس ذرات به مدت ۱ ثانیه به داخل جریان تزریق می‌شود. محاسبات به‌صورت وابسته به زمان و برای مدت ۱۰ ثانیه و با در نظر گرفتن یک زمان نشست ۱ ثانیه انجام می‌شود. این بازه زمانی بدین دلیل در نظر گرفته شده که پس از گذشت ۱۰ ثانیه دیگر تغییرات محسوسی در تجمع و جابه‌جایی ذرات بر روی سطح سلول دیده نمی‌شود. با توجه به اندازه گام زمانی، مسئله موردنظر در یک بازه زمانی ۱۰ ثانیه حل شده است. این مقیاس‌های زمانی با استفاده از هندسه و ویژگی‌های جریان اطراف سلول سهموی تخمین زده شده و دقت کافی برای استخراج دینامیک میدان جریان و ذرات گردوغبار را دارد. ضرایب برآ و پس‌در جریان ناپایا با مقادیر پیش‌بینی شده جریان پایا مشابهت محسوسی دارد. مسیر ذرات گردوغبار با استفاده از مدل ذرات گسسته شبیه‌سازی شده که به‌اندازه کافی برای بار حجمی پایین (کمتر از ده درصد) از گردوغبار هوا دقیق می‌باشد. در این روش، میدان جریان که می‌تواند آشفتگی هم

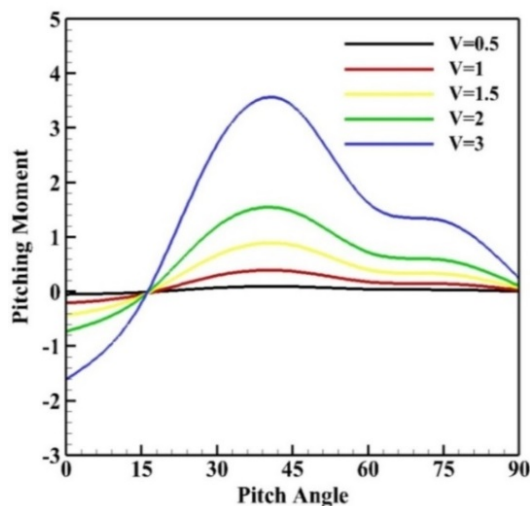


شکل (۹). ساختار کلی یک سلول سهموی به سبک دایره کامل

[۱۲]



(الف)



(ب)

شکل (۱۰). تغییرات (الف) گشتاورهای سمتی و (ب) و پیچشی برحسب زاویه گام به ازای تغییرات سرعت برای سلول شماره ۱

می‌یابد. این موضوع می‌تواند به دلیل این باشد که این سلول‌ها مستقیماً رو به روی جریان هوا قرار نگرفته‌اند. همچنین در این سلول‌ها نشست ذرات با افزایش زاویه گام از ۱۵ به ۷۵ و با گام ۳۰ درجه نشست ذرات حدوداً در هر مرحله ۲ برابر می‌شود. پس در طی مدت‌زمانی می‌توان زاویه گام را کاهش داد و بدین‌وسیله سبب کاهش نشست ذرات شد. ولی در سلول شماره ۱ باید جهت‌گیری سلول را در طی زمان از ۴۵ درجه به زوایای کمتر یا بیشتر تغییر داد. شکل ۱۲ نشان‌دهنده تغییرات مجموع غلظت بر روی سطح سلول‌های شماره ۱، ۲ و ۳ در زاویه گام ۱۵ درجه می‌باشد. در شکل ۱۳ تغییرات مجموع غلظت بر روی سطح سلول‌های شماره ۱، ۲ و ۳ در زاویه گام ۴۵ درجه نمایش داده شده است. در این زاویه نسبت به زاویه ۱۵ درجه، اختلاف مقدار غلظت رسوب شده در سرعت‌های مختلف کمتر شده و این نشانگر قدرت کمتر ذرات برای نشستن در روی سطح می‌باشد.

شکل ۱۴ تغییرات انباشت ذرات بر روی سه سلول در زاویه ۷۵ درجه نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان غلظت انباشتی برحسب شبیه‌سازی عددی در یک زاویه خاص با سرعت رابطه معکوسی دارد. دلیل این امر این است که ذرات گردوغبار سبک بوده و با سرعت سیال بالاتر به راحتی از روی سلول موردنظر برخاسته خواهند شد.

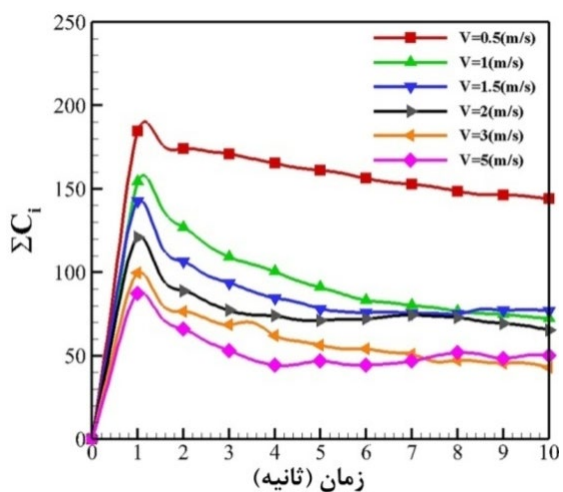
از دیگر نتایج جالب در انتهای بازه زمانی مدل‌سازی عددی در زاویه ۴۵ درجه و سرعت ۵ متر بر ثانیه این است که میزان غلظت بر روی سطح سلول‌های ۲ و ۳ به مقدار صفر نزدیک شده است. درحالی‌که با سرعت کمتر امکان غلبه نیروی برآ بسیار اندک است. نتایج بیانگر این است که در سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه، شرایط به نحوی است که قدرت جابه‌جایی ذرات را به مقدار کافی ندارد. در مقابل هرچه سرعت زیادتر شود، امکان توزیع، انتشار و انتقال ذرات ریزمقیاس جامد سبک، بیشتر خواهد شد. برای مثال در سرعت ۵ متر بر ثانیه با تغییر زاویه از ۱۵ به ۴۵ درجه نشست ذرات در مدت ۱۰ ثانیه بیشتر و حدود ۲ برابر شده و این مقدار در زاویه ۷۵ درجه بیشتر می‌شود. این موضوع

باشد با استفاده از فرمولاسیون اوپلری محاسبه شده و حرکت ذرات با استفاده از دیدگاه لاگرانژی شبیه‌سازی شده است. مشخصات ذرات گردوغبار به شرح جدول ۳ می‌باشد [۶].

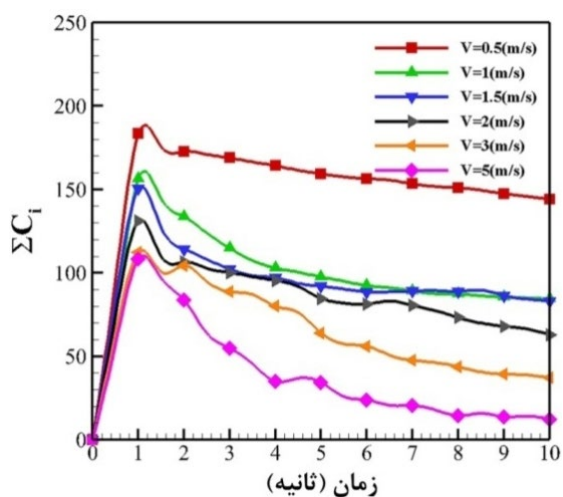
جدول (۳). مشخصات ذرات گردوغبار

جنس ذرات	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	قطر (میکرومتر)
خاک رس	۲۵۶۰	۱۰

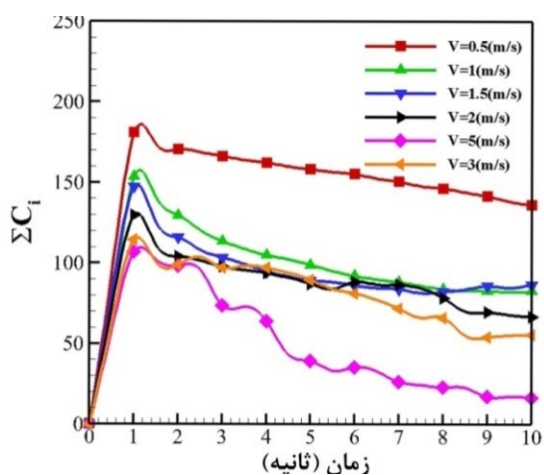
در شکل ۱۱ مسیر حرکت ذرات گردوغبار پیرامون سه سلول سهموی در زوایای گام ۱۵، ۴۵ و ۷۵ نمایش داده شده است. در این شبیه‌سازی از شرط مرزی بازتاب (ذرات با یک برخورد الاستیک یا غیر الاستیک می‌تواند مجدد به محیط بازگردد)، استفاده شده است. رسوب ذرات در یک سرعت و زاویه گام مشخص، بر روی سلول شماره ۱ از دو سلول دیگر بیشتر می‌باشد. افزایش تجمع ذرات به علت قرارگیری مستقیم این سلول در معرض ذرات و جهت‌گیری آن می‌باشد. به همین جهت، شرایط حبس ذرات بر روی این سلول بیشتر است. همچنین تقارن دو سلول دیگر سبب ایجاد حدوداً برابر ته‌نشینی ذرات بر روی آن‌ها می‌شود. در این مطالعه فرض شده که سرعت اولیه ذرات برابر سرعت غالب جریان هوا است. همچنین شرط مرزی دیوار بر روی تمامی سلول‌ها در نظر گرفته شده است. این فرض می‌تواند سناریوی دقیق از حالت تجمع ذرات گردوغبار در این شبیه‌سازی باشد. زاویه گام موردبررسی صفر تا ۹۰ درجه در شبیه‌سازی لحاظ شده است. شبیه‌سازی‌ها برای سرعت‌های بین ۰/۵ تا ۵ متر بر ثانیه انجام گرفته است. افزایش فشار بر روی سلول‌ها می‌تواند سبب کاهش حبس ذرات بر روی آن‌ها شود. با توجه به شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ می‌توان دریافت که تمرکز گردوغبار محلی در مرکز و تقعر سلول شماره ۱ در زاویه ۴۵ درجه بسیار بیشتر از زوایای ۱۵ و ۷۵ درجه می‌باشد. چراکه شرایط حبس ذرات بیشتر می‌گردد. به‌علاوه سلول‌های شماره ۲ و ۳ در زوایای ۱۵، ۴۵ و ۷۵ از این الگو پیروی نکرده و با افزایش زاویه گام نشست ذرات افزایش



(الف)



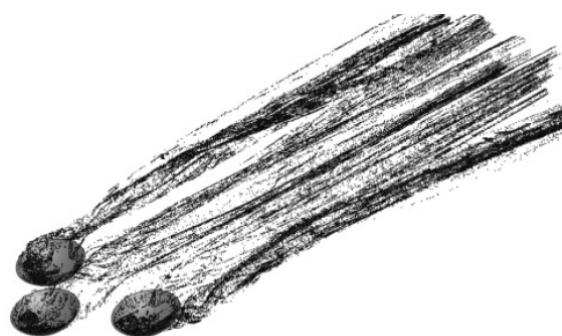
(ب)



(ج)

شکل (۱۲). مقایسه تغییرات مجموع غلظت ذرات گردوغبار نسبت به زمان (الف) سلول شماره ۱، (ب) سلول شماره ۲ و (ج) سلول شماره ۳ در زاویه گام ۱۵ درجه

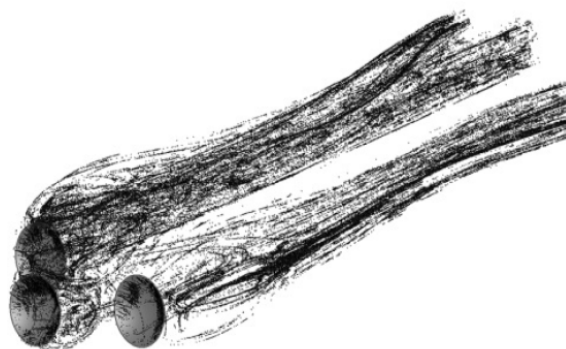
نشان می‌دهد نشست ذرات در زاویه ۴۵ درجه بیشتر است. وجود ذرات موجود در تقعر سلول سهموی، می‌تواند شدت تابش اشعه خورشید رسیده به سلول را کاهش دهد. پراکندگی بالقوه تابش خورشیدی منعکس‌شده (متمرکز شده) به وسیله ذرات گردوغبار معلق می‌تواند اثر برجسته‌ای (و مضر) بر عملکرد سلول داشته باشد.



(الف)

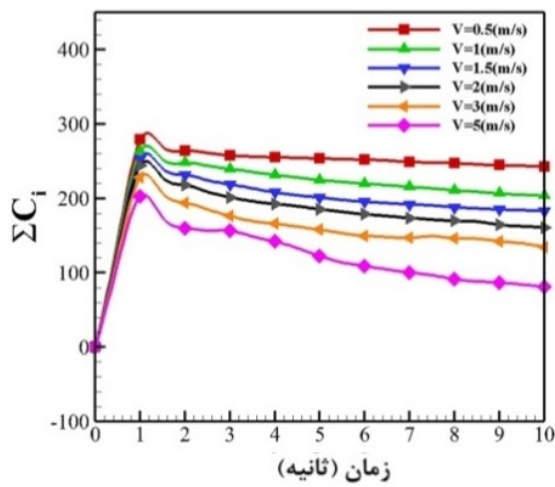


(ب)

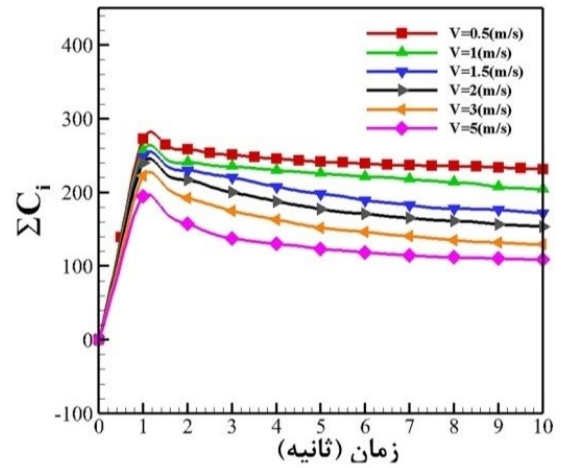


(ج)

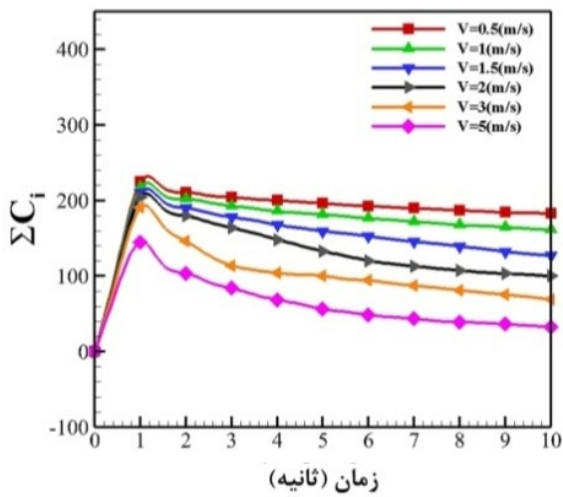
شکل (۱۱). مسیر حرکت ذرات گردوغبار در سه زاویه گام (الف) ۱۵، (ب) ۴۵ و (ج) ۷۵ درجه



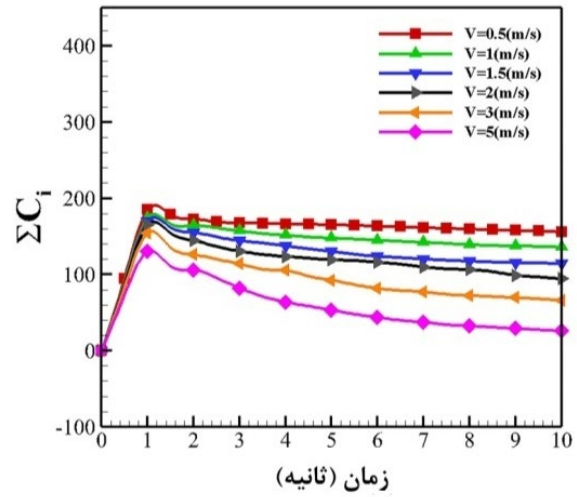
(الف)



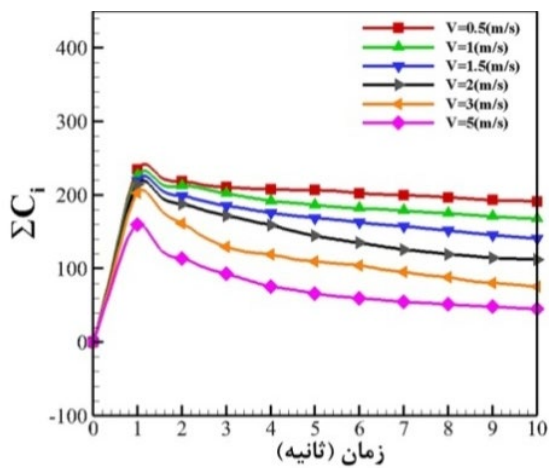
(الف)



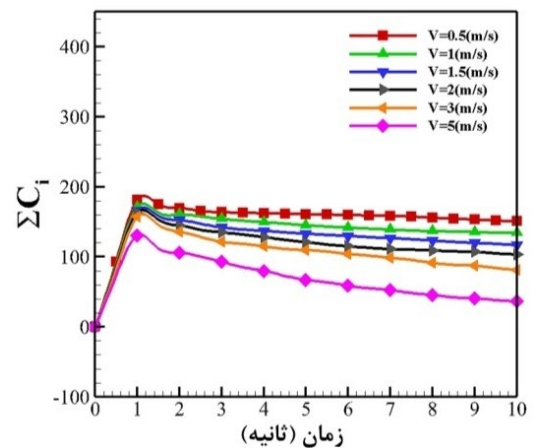
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل (۱۴). مقایسه تغییرات مجموع غلظت ذرات گردوغبار نسبت به زمان (الف) سلول شماره ۱، (ب) سلول شماره ۲ و (ج) سلول شماره ۳ در زاویه گام ۷۵ درجه

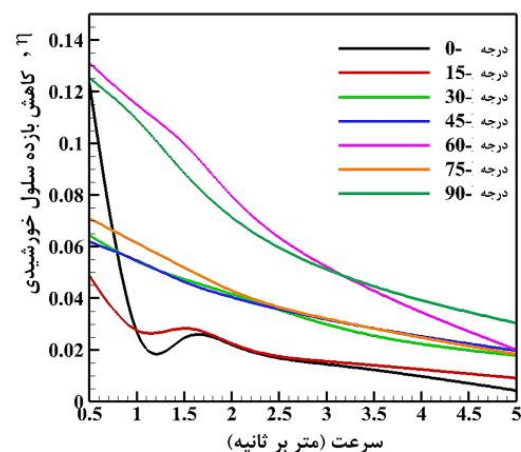
شکل (۱۳). مقایسه تغییرات مجموع غلظت ذرات گردوغبار نسبت به زمان (الف) سلول شماره ۱، (ب) سلول شماره ۲ و (ج) سلول شماره ۳ در زاویه گام ۴۵ درجه

### ۵-۳- تغییرات بازده سلول خورشیدی

برای بررسی اثرات گردوغبار بر میزان کارایی سلول سهموی، معادله تجربی به دست آمده توسط جیانگ و همکاران که بر اساس اندازه‌گیری‌های تجربی آن‌ها بوده در این پژوهش استفاده شده است. رابطه بین نسبت کاهش کارایی سلول و چگالی رسوب گردوغبار از رابطه ۸ تخمین زده می‌شود [۱۸]:

$$\frac{E_{reduction}}{E_{clean}} = \kappa \rho_{deposition} \quad (8)$$

$E_{reduction}$  و  $E_{clean}$  بازده خروجی سلول با/ بدون آلودگی گردوغبار می‌باشد. همچنین  $\rho_{deposition}$  چگالی رسوب گردوغبار بوده و  $K_i$  فاکتور برازش از داده‌های تجربی که برای این پژوهش ۰/۱۱۵ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۱۵) نشان داده شده به ازای تمامی زوایای گام سلول، با افزایش سرعت، کاهش بازده سلول کاسته شده و مشخصاً این نتیجه به‌طور منطقی قابل‌انتظار می‌باشد. با بررسی دقیق‌تر نمودارها مشاهده می‌شود بیشترین نرخ کاهش بازده برای سلول سهموی در زاویه ۶۰ و ۹۰ درجه بوده و در زوایای گام ۳۰، ۴۵ و ۷۵ درجه تقریباً این نرخ تقریباً یکسان می‌باشد.



شکل (۱۵). مقایسه کاهش بازده روی سلول‌های سهموی بر حسب سرعت در زوایای مختلف

به‌منظور چگونگی تأثیر آن در محاسبه ضرایب نیروهای و گشتاورهای آیرودینامیکی انجام شده است. همچنین به‌منظور بررسی چگونگی تأثیر تجمع ذرات گردوغبار روی سطح سلول‌ها و جابه‌جایی آن‌ها در اثر عبور جریان هوا، مدل‌سازی حرکت این ذرات نیز انجام گرفته است. در این مطالعه، از روش فاز جداگانه برای مدل‌سازی جابه‌جایی ذرات گردوغبار استفاده شده است. برای مدل‌سازی میدان جریان سیال از یک مدل سه‌بعدی و برای مدل‌سازی اثرات آشفتگی از مدل SST k-w بهره برده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود و نتایج نشان دادند، در اثر افزایش سرعت، غلظت ذرات ریزمقیاس بر روی سلول‌ها کمتر می‌شود. همچنین می‌توان مشاهده کرد که سرعت افزایش یافته در اطراف سلول‌ها، می‌تواند سبب ایجاد جریان چرخشی، تولید انرژی جنبشی بالا و افزایش شدت وریسیته در پایین دست برخی از سلول‌ها به‌ویژه در زوایای ۷۵ و ۹۰ درجه شود. یکی دیگر از اهداف این مطالعه، یافتن مقدار دقیق گشتاورهایی است که می‌تواند سبب جابه‌جایی سلول در جهت‌های مختلف مختصاتی شده تا به‌وسیله آن بتوان غلظت ذرات گردوغبار را روی سطح سلول را به حداقل رساند و راندمان سلول را به مقدار قابل‌توجهی افزایش داد. همچنین در این پژوهش مقدار گشتاورهای اعمالی محاسبه شده و در نتیجه می‌توان با قرار دادن یک مکانیزم عملگر چرخشی در مرکز هریک از سلول‌ها (مرکز دوران) بر این گشتاورها غلبه کرد و سلول‌ها را در دو جهت چرخاند. بدین ترتیب مشاهده شد به ترتیب در زوایای ۳۰ و ۴۵ درجه مقدار گشتاور واژگونی بیش‌ترین مقدار است. همچنین زاویه ۹۰ درجه بحرانی‌ترین زاویه برای حرکت سلول در جهت حرکت تندبادهای شدید می‌باشد.

### ۷- مراجع

1. Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., and Kazmerski, L. L. "A Comprehensive Review of the Impact of Dust on the Use of Solar Energy: History, Investigations, Results, Literature, and Mitigation Approaches", Renewable and Sustainable Energy Reviews, No. 22, pp. 698-733, 2013.
2. Moayyedi, M.K., and Khoshnavid, A. "Numerical Simulation of Air Flow Pattern and Dust Particle Deposition on the Surfaces of a Collection of Parabolic Solar Cells", 18<sup>th</sup> Conference on Fluid Dynamics, 2019. (In Persian)

### ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به شبیه‌سازی عددی میدان جریان اطراف مجموعه‌ای از سلول‌های خورشیدی با شکل سهموی پرداخته شده است. بررسی ساختار جریان در اطراف جسم



11. Dida, M., Boughali, S., Bechki, D., and Bouguettaia, H. "Output Power Loss of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules due to Dust Accumulation in Saharan environment," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, pp. 109787., 2020
12. Sanieenejad, M., "Introduction to Turbulent Flow Concepts and Their Modeling", Danesh Negar Publications, 2018. (In Persian)
13. Saadati, E., and Zin al-Abedini M. "Principles of Basic and Advanced Simulation of Computational Fluid Dynamics using FLUENT and CFX Software" , Engineering and Training Services Company Perdad Petro Danesh (PTEC), Pp. 427-475, 2015. (In Persian)
14. Ghazanfarian, J., "Modern Fluid Mechanics from a Simple Viewpoint", First volume, 2018. (In Persian)
15. Tohidi, A. and Ghaffari Ghahroodi, H., "A Comprehensive Guide to ANSYS FLUENT", Publications of Dibagaran Cultural and Artistic Institute of Tehran, 2013. (In Persian)
16. Moayyedi, M.K., and Khoshnavid, A. "Investigating the Effect of Accumulation and Deposition of Dust Particles on the Efficiency of Solar Cells using Numerical Simulation", 27<sup>th</sup> Annual and International Conference of Iranian Society of Mechanical Engineering, Tarbiat Modaress University, 2019. (In Persian)
17. Cengel, Y., and Cimbala, J.M., "Fundamental and Applications Solar Engineering of Thermal Processes", 3<sup>rd</sup> edition, McGraw-Hill, New York, 2014.
18. Jiang, H., Lu, L., and Sun, K. "Experimental Investigation of the Impact of Airborne Dust Deposition on the Performance of Solar Photovoltaic (PV) Modules" , *Atmospheric Environment*, 45(25), pp. 4299-4304, 2011.19.11
3. Goossens, D., and Van Kerschaever, E. "Aeolian Dust Deposition on Photovoltaic Solar Cells: The Effects of Wind Velocity and Airborne Dust Concentration on Cell Performance", *Solar Energy*, 66(4), pp. 277-289, 1999.
4. Offer, Z.I., and Goossens, D. "Airborne Dust in the Northern Negev Desert (January–December 1987): General Occurrence and Dust Concentration Measurements", *Journal of Arid Environments*, 18(1), pp. 1-19, 1990.
5. Mejia, F.A., and Kleissl, J. "Soiling Losses for Solar Photovoltaic Systems in California", *Solar Energy*, 95, pp. 357-363, 2013.
6. Christo, F.C. "Numerical Modelling of Wind and Dust Patterns around a Full-Scale Paraboloidal Solar Dish", *Renewable Energy*, 39(1), pp. 356-366, 2012.
7. Uzair, M., Anderson, T., Nates, R., and Jouin, E. "A Validated Simulation of Wind Flow around a Parabolic Dish, In Proceedings of the Asia Pacific Solar Research Conference, 2015.
8. Paudyal, B.R., and Shakya, S.R. "Dust Accumulation Effects on Efficiency of Solar PV Modules for off Grid Purpose: A Case Study of Kathmandu", *Solar Energy*, 135, pp. 103-110, 2016.
9. Zhao, M., Zhang, X., Zhang, X., Zou, L., and Kang, X., "Numerical Simulation of Wind Pressure Coefficient and Distribution Trend of the Dust Concentration for Parabolic Trough Solar Collector", In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 63, No. 1, p. 012009). IOP Publishing, 2017.
10. Yu, M., Gong, J., and Cai, H. "Numerical Simulation of Impact on Wind Load due to Mirror Gap Effect for Parabolic Dish Solar Concentrator", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 233(8), pp. 1056-1067, 2019.