

## بررسی عددی تأثیر میزان هوادهی کوره‌های هوای گرم بر توزیع دمایی گلخانه‌ها

رسول محمدی<sup>۱</sup>، بابک بختی<sup>۲</sup>، بهرنگ سجادی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، rasool.mohammadi@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> مدیر محصول، شرکت انرژی کشور، تهران، babak.bakhti@energy-ind.com

<sup>۳\*</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، bsajadi@ut.ac.ir

### چکیده

گرمایش از کف با لوله‌های آب گرم یا هوای داغ یا کوره‌های هوای گرم مجهز به فن انجام می‌شود [۲-۳].

علی‌رغم وجود انتقال حرارت جابجایی به واسطه‌ی این وسایل، به علت اهمیت یافتن نیروهای شناوری، توزیع دمایی در تمام نقاط گلخانه یکنواخت نمی‌باشد. به این پدیده لایه‌ای شدن هوا گفته می‌شود که همین موضوع می‌تواند سبب آسیب رسیدن به گیاهان مجموعه شود. همچنین این وضعیت سبب افزایش اختلاف دمای قابل توجهی بین سقف و کف می‌گردد. افزایش دما در نزدیکی پوشش سقف که در مجاورت با هوای سرد بیرون قرار دارد، موجب اتلاف بیشتر حرارت هدایتی از پوشش گلخانه می‌شود. راهکار رایج برای رفع این معضل نصب فن‌های سقفی برای ایجاد یک جریان هوای دوم در گلخانه است [۴]. انجام شبیه‌سازی‌های عددی به جای آزمایشات تجربی راهکاری کم هزینه برای مطالعه‌ی این مورد و یافتن یک راه حل بهینه مسئله می‌باشد.

تعدادی از مطالعات به بررسی گلخانه به صورت گذرا<sup>۲</sup> در مدت مشخصی از روز پرداخته‌اند. معتضدیان و همکاران [۵]، به مدل‌سازی یک گلخانه نیمه مدفون و نیمه دوطرفه با استفاده از متغیرهای داخلی و خارجی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) پرداخته‌اند. مدل k-ε استاندارد برای مدل‌سازی آشفتگی انتخاب شد. در این تحقیق، داده‌های دما، رطوبت، و تابش خورشید به صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده و سپس از حل عددی برای بررسی توزیع انرژی و تغییرات دما در ارتفاع‌های ۱ و ۲ متری از سطح زمین استفاده شده است. گلخانه به صورت بسته مدل شده است. نتایج این تحقیق نشان داده‌اند که در مناطق گرم کشور، زمین به عنوان یک منبع مناسب برای دریافت گرمای انباشته در محیط گلخانه است و با افزایش رسانایی گرمایی پوشش سطح داخلی گلخانه، شار حرارتی به سمت عمق خاک افزایش می‌یابد.

تعدادی از مطالعات نیز با انجام یک سری فرضیات ساده کننده و با علم بر اینکه مسئله در شرایط مورد نظر پاسخ مستقل از زمان دارد، به حل پایایی توزیع دما در گلخانه پرداخته‌اند. تاج و همکاران [۶] بیان کردند که مکان و اندازه‌ی دستگاه‌های گرمایشی الگوهای جریان

در این پژوهش، گرمایش و توزیع دما و پدیده‌ی لایه‌ای شدن هوا در گلخانه‌های صنعتی با استفاده از کوره‌های هوای گرم به وسیله‌ی شبیه‌سازی‌های عددی به روش حجم محدود برای شرایط زمستانی مورد بررسی قرار گرفته است. در استاندارد EN17082 بازده جریان به عنوان یک عامل اصلی در تعیین بازده فصلی کوره‌های هوای گرم مطرح می‌شود. این پژوهش به راهکار افزایش هوادهی به منظور برطرف کردن مسئله‌ی لایه‌ای شدن هوا می‌پردازد. مدل فیزیکی سه بعدی گلخانه با ابعاد مشخص در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی‌ها با مدل SST k-ω انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها در چهار حالت مختلف انجام شده که در دو گلخانه با طول‌های ۲۵ و ۵۰ متر اجرا شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش هوادهی، دمای میانگین و بیشینه در کوره و امکان لایه‌ای شدن هوا کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش حجم گلخانه، پدیده‌ی لایه‌ای شدن هوا قابل مشاهده‌تر می‌شود. افزایش هوادهی منجر به بهبود یکنواختی دما، جلوگیری از لایه‌ای شدن هوا و در نتیجه کاهش مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها می‌شود.

### واژه‌های کلیدی

گلخانه، دینامیک سیالات محاسباتی، نرخ هوادهی، کوره‌ی هوای گرم.

### مقدمه

طراحی مناسب گلخانه‌ها به جهت تأمین بخش قابل توجهی از مواد غذایی از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. به صورت رایج طراحی سیستم تهویه‌ی مطبوع این فضاها بر مبنای استانداردها و یا به صورت تجربی انجام می‌پذیرند که همین موضوع سبب شده تا مطالعات بسیار محدودی در این حوزه صورت گرفته باشد و مدیریت مصرف انرژی در این فضاها بخصوص در مناطق سردسیر چالش برانگیز باشد. دو سوم الی سه چهارم از کل انرژی مورد استفاده در گلخانه به گرمایش آن اختصاص دارد، که این نسبت نشان دهنده مصرف بسیار زیاد انرژی در این ارتباط است [۱]. گرمایش این مجموعه‌ها معمولاً به واسطه‌ی

<sup>2</sup> Transient

<sup>1</sup> Air stratification

شبیه‌سازی‌ها به منظور بررسی عملکرد کوره‌های حرارتی در حالت حداکثر توان و در شرایط زمستانی انجام می‌شود؛ به همین جهت از اعمال برخی جزئیات در برابر عوامل اصلی چشم پوشی می‌گردد. به عنوان مثال، صرف نظر از تابش خورشید در زمستان، گرمای ناشی از حضور گیاهان و بار حرارتی ناشی از اجزای ساختمان گلخانه نیز ناچیز شمرده می‌شوند؛ بنابراین موازنه انرژی ناشی از تقابل تولید گرمای کوره در مقابل اتلاف گرما از جداره‌ی گلخانه با هوای بیرون به روش جابجایی و اتلاف گرما از کف به روش هدایت یک بعدی تقریب زده می‌شود. پوشش گلخانه جهت شبیه‌سازی، یک لایه پلاستیک با ضخامت مشخص فرض می‌شود. همچنین، فرض می‌گردد که پوشش کامل بوده و نفوذ هوا ناچیز است. حرارت تولیدی و گرمای اتلافی از جداره‌ها و کف گلخانه مدتی پس از شروع به کار دستگاه به تعادل رسیده و شرایط پایا برقرار می‌گردد.

#### – معادلات حاکم

جهت انجام شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی، از نرم افزار تجاری انسیس فلونت نسخه‌ی ۲۰۲۲ استفاده می‌شود که بر مبنای روش حجم محدود معادلات را حل می‌کند. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی در شرایط پایا گسسته‌سازی و حل می‌شوند. این معادلات به شرح ذیل هستند:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \rho B - \nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho c_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} + c_p \mu_t / Pr_t) \nabla T \quad (3)$$

$$\tau = (\mu + \mu_t) (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) - \frac{2}{3} [(\mu + \mu_t) (\nabla \cdot \vec{u}) I + \rho k I] \quad (4)$$

که در آن  $\rho$ ،  $\mu_t$  و  $Pr_t$  به ترتیب چگالی، لزجت آشفته<sup>۴</sup> و عدد پرانتل آشفته<sup>۵</sup> را نشان می‌دهند. همچنین،  $p$  و  $B$  نیز به ترتیب نماینده‌ی فشار ترمودینامیکی و نیروهای شناوری است. مطابق شرایط فیزیکی مسئله، مدل SST k- $\omega$  برای حل مشخصه‌های توربولانسی جریان انتخاب شده است. این مدل معادلات زیر را برای پیدا کردن مقادیر انرژی جنبشی آشفته (k) و نرخ اضمحلال ویژه ( $\omega$ ) در نظر می‌گیرد:

$$\nabla \cdot (k \vec{u}) = P_k - \beta^* k \omega + \nabla \cdot \left[ (v + \frac{\sigma_k \mu_t}{\rho}) \nabla k \right] \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\omega \vec{u}) = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \nabla \cdot \left[ \left( v + \frac{\sigma_k \mu_t}{\rho} \right) \nabla \omega \right] + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_{\omega 2}}{\omega} \nabla k \nabla \omega \quad (6)$$

معادلات مومنتوم، انرژی، انرژی جنبشی آشفته و نرخ اضمحلال ویژه به روش مرتبه دوم بادسو<sup>۶</sup> گسسته شده و فشار نیز به دلیل قلیل توجه بودن نیروهای شناوری در این مسئله به کمک روش نیروهای حجمی<sup>۷</sup> درونیایی می‌شود. همچنین، در حلگر بر مبنای فشار، برای ارتباط فشار-سرعت از الگوریتم کاپلد<sup>۸</sup> استفاده شده است.

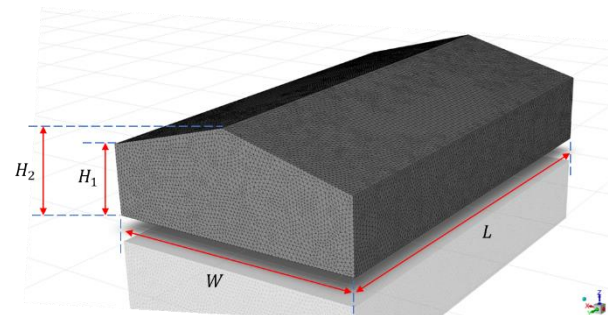
و توزیع دما در داخل گلخانه را تعیین می‌کند. هدف این پژوهش تجزیه و تحلیل جریان‌های جبهه‌جایی تولید شده در یک گلخانه‌ی تونلی با استفاده از شبیه‌سازی عددی بسته بوده است. گرمایش از طریق توزیع هوای گرم از لوله‌های سوراخ‌دار در مجاورت کف انجام می‌شود. مدل k- $\epsilon$  استاندارد برای توصیف آشفتگی انتخاب شد. نتایج به صورت نمودارهای فشار، سرعت و دما ارائه شده‌اند.

مطالعه‌ی گرمایش و توزیع دمای گلخانه‌های صنعتی با استفاده از کوره‌های هوای گرم تاکنون در ادبیات موضوع مورد بررسی قرار نگرفته است. این پژوهش با به کارگیری شبیه‌سازی‌های عددی، به بررسی لایه‌ای شدن هوا در گلخانه‌های صنعتی در شرایط پایا زمستانی می‌پردازد. راهکار افزایش هوادهی برای برطرف کردن این مسئله پیشنهاد شده و اثر آن بر توزیع دمایی را مورد بررسی قرار می‌گیرد. موفقیت آمیز بودن این راهکار می‌تواند سبب کاهش اتلافات حرارتی، مصرف سوخت و حذف فن‌های سقفی در گلخانه‌های بزرگ شود که در هزینه‌های اولیه و جاری دیده خواهند شد. همچنین در جدیدترین نسخه از استاندارد EN17082 که الزامات و ضرورت‌های طراحی کوره‌های هوای گرم را ارائه می‌کند، به منظور نزدیکتر شدن به کارکرد واقعی دستگاه، بازه انرژی فصلی<sup>۱</sup> جایگزین بازه گرمایی<sup>۲</sup> شده است [۷]. این تعریف جدید هم پوشش دهنده‌ی بازه گرمایی دستگاه و هم پوشش دهنده‌ی بازه جریان<sup>۳</sup> دستگاه می‌شود. محاسبات تحلیلی نشان می‌دهند که افزایش هوادهی با بهبود بازه جریان رابطه‌ی مستقیم خطی دارد؛ بنابراین افزایش هوادهی کوره‌ها علاوه بر رفع مشکل لایه‌ای شدن هوا، می‌تواند افزایش بازدهی دستگاه را نیز به دنبال داشته باشد.

#### مواد و روش‌ها

##### – بیان مسئله و فرضیات

مدل فیزیکی سه بعدی گلخانه به طول  $L$ ، عرض دهانه‌ی  $W$ ، ارتفاع دیوار  $H_1$  و ارتفاع تاج  $H_2$  به صورت شکل ۱ در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش عرض دهانه و ارتفاع‌های دیوار و تاج به ترتیب ۱۵، ۴ و ۶ متر و ثابت در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱: مدل فیزیکی و ابعاد هندسی گلخانه

<sup>1</sup> Seasonal space heating efficiency

<sup>2</sup> Thermal efficiency

<sup>3</sup> Emission efficiency for specific air flow

<sup>4</sup> Turbulent viscosity

<sup>5</sup> Turbulent Prandtl number

<sup>6</sup> Second-order upwind

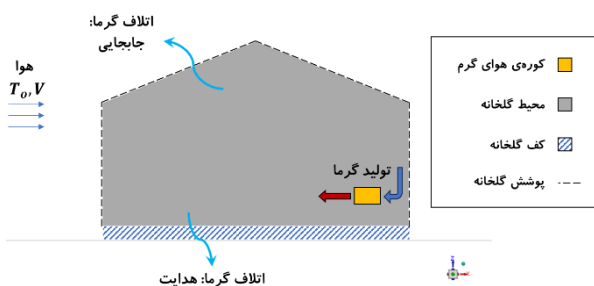
<sup>7</sup> Body force weighted

<sup>8</sup> Coupled

شرایط مرزی

$$q_{cond} = -\lambda_f \frac{dT_f}{dz} \quad (9)$$

در این رابطه  $\lambda_f$  ضریب هدایت حرارتی خاک و معادل  $0.525$  وات بر متر درجه سلسیوس در نظر گرفته می‌شود [۹]. نرخ گرادیان دما در خاک نیز با توجه به مرجع [۵] برابر  $4/38$  درجه سلسیوس بر متر تخمین زده می‌شود که در مجموع به اتلاف حرارتی  $2/3$  وات بر متر مربعی منتج می‌گردد.



شکل ۳: شرایط مرزی حل مسئله

برای مدل‌سازی اتلاف گرما از پوشش گلخانه نیز شرط مرزی جایجایی حرارتی به تمام جداره‌ها اعمال می‌شود و شار حرارت اتلافی طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$q_{conv} = h(T - T_o) \quad (10)$$

فرض می‌شود که جریان هوا با دمای  $T_o = 0^\circ\text{C}$  و سرعت  $V = 5 \text{ m/s}$  جریان داشته باشد و برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جایجایی سمت بیرون گلخانه با پوشش پلاستیک از رابطه‌ی پیشنهادی گارزولی و بلکول [۱۰-۱۱] استفاده می‌شود:

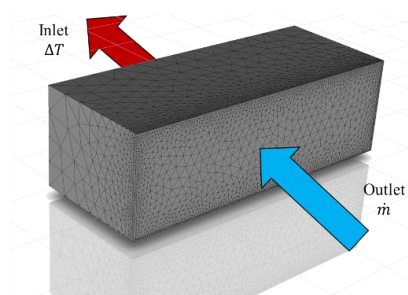
$$h = 7.2 + 3.84V \quad (11)$$

که نهایتاً ضریب انتقال حرارت جایجایی را معادل  $26/4$  وات بر متر مربع درجه سلسیوس تقریب می‌زند. یادآور می‌گردد که پوشش گلخانه یک جداره‌ی نایلونی با ضریب هدایت حرارتی  $2/1$  وات بر متر درجه سلسیوس و ضخامت  $1$  میلی‌متر مدل می‌شود.

### اعتبارسنجی و استقلال نتایج از شبکه

برای این منظور چهار شبکه با ابعاد مختلف برای شبیه‌سازی گلخانه‌ای با طول  $25$  متر برای شرایط توضیح داده شده با افزایش دمای  $38$  درجه‌ای و دبی جرمی  $5/44$  کیلوگرم بر ثانیه در کوره انجام شد. جدول ۱ نتایج بررسی استقلال نتایج دمای میانگین میدان حل را از ابعاد شبکه نشان می‌دهد. دیده می‌شود که شبکه‌ی «ریز» با سلول‌های چهاروجهی به ضلع  $0/3$  متر برای هدف مورد نظر کافی بوده نیازی به شبکه‌ی ریزتر نیست. بایستی توجه نمود که به علت استفاده از مدل آشفتگی SST k- $\omega$ ،  $10$  لایه سلول لایه مرزی روی دیواره‌ها اعمال شده تا مقدار  $Y^+$  به حدود  $1$  نزدیک شود.

پیش‌تر در بخش فرضیات توضیح داده شد که تولید گرما در دامنه‌ی حل توسط یک کوره‌ی حرارتی انجام می‌پذیرد. این کوره توسط یک بلوک مکعبی به طول  $5/4$  متر و دهانه‌ی پرتاب  $0/4$  در  $1/26$  متر مربع مدل می‌شود [۸] که در یکی از گوشه‌های دامنه‌ی حل و با  $1$  متر فاصله از دیواره‌های اطراف و رو به یکی از دیواره‌ها قرار گرفته است. مدل‌سازی محاسباتی کوره‌ی حرارتی به کمک مجموعه شرط مرزی گردش مجدد<sup>۱</sup> در نرم افزار انجام می‌شود. این شرط مرزی یک خروجی برای مکش هوا با دبی جرمی ثابت ( $\dot{m}$ ) و یک ورودی برای دمش در محیط با مقدار افزایش دمای مشخص و ثابت ( $\Delta T$ ) نیاز دارد که در شکل ۲ به ترتیب با رنگ‌های آبی و قرمز مشخص شده اند. چهار وجه دیگر نیز به عنوان دیوار عایق انتخاب شده اند.



شکل ۲: شرایط مرزی کوره‌ی حرارتی

از آنجایی که کوره‌های حرارتی مجهز به فن‌های محوری هستند، هوا را در دبی حجمی ثابت منتقل می‌کنند و دبی جرمی هوا از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (7)$$

بر همین حساب، میزان افزایش دمای هوا در خروجی کوره را می‌توان از طریق توان حرارتی خروجی کوره ( $P_{out}$ ) به نرخ هوادهی ( $\dot{V}$ ) آن مرتبط کرد:

$$\Delta T = \frac{P_{out}}{\rho \dot{V} c_p} \quad (8)$$

که در آن  $c_p$  ظرفیت گرمایی ویژه‌ی هوا را نشان می‌دهد. کوره‌ی هوای گرمی که در این پژوهش مورد مطالعه قرار می‌گیرد از نوع GF2060 بوده که به صورت پیش‌فرض توان خروجی مفید حدود  $178000$  کیلوکالری بر ساعت را با هوادهی  $16000$  متر مکعب بر ساعت و افزایش دمای  $38$  درجه سلسیوس به محیط ارائه می‌کند. سازنده این دستگاه را برای محیط با حجم بین  $3000$  الی  $5000$  متر مکعب توصیه می‌کند [۸].

سایر شرایط مرزی مسئله نیز در شکل ۳ به نمایش در آمده اند. تمام دیواره‌ها بدون لغزش در نظر گرفته می‌شوند. اتلاف گرما از کف به روش هدایت حرارتی و به صورت یک‌بعدی فرض شده و شار حرارتی اتلاف شده از این روش نیز از رابطه‌ی قانون فوریه حساب می‌شود:

<sup>1</sup> Recirculation

جدول ۱: تغییرات دمای میانگین گلخانه در برابر اندازه‌ی شبکه‌ی حل

نام شبکه	ضلع هر سلول (m)	تعداد سلول	دمای میانگین (°C)	خطای نسبی (%)
درشت	۱	۲۲۶۲۸۰	۵۱/۳۱	۴/۷
متوسط	۰/۵	۳۹۵۱۵۲	۴۸/۹۰	۲/۱
ریز	۰/۳	۹۹۷۸۸۹	۴۷/۹۱	۰/۳
ریزتر	۰/۱	۲۴۸۰۴۱۵	۴۷/۷۷	-

با افزایش هوادهی، دمای میانگین نیز کاهش می‌یابد. برای توجیه این قضیه می‌توان گفت که در حالتی که هوادهی بیشتر باشد، مقداری از انرژی به صورت دینامیکی صرف جابجایی بیشتر هوا در گلخانه می‌گردد.

جدول ۲: خلاصه شبیه‌سازی‌های انجام شده در این پژوهش.

مدل	طول گلخانه (L) [m]	افزایش دما در کوره (ΔT) [°C]	هوادهی کوره (V) [m <sup>3</sup> /h]	دبی جرمی کوره (m) [kg/s]	دمای میانگین گلخانه (T <sub>ave</sub> ) [°C]	دمای بیشینه گلخانه (T <sub>max</sub> ) [°C]
۱	۲۵	۳۸	۳۳۱۲	۵/۴۴	۴۷/۸۷	۸۳/۸۵
۲	۲۵	۲۵	۵۰۳۵	۸/۲۷	۴۱/۸۹	۶۴/۲۹
۳	۵۰	۳۸	۳۳۱۲	۵/۴۴	۳۰/۵۳	۶۷/۰۰
۴	۵۰	۲۵	۵۰۳۵	۸/۲۷	۲۷/۳۲	۵۲/۴۱

از همین نتایج جهت بررسی روش شبیه‌سازی نیز استفاده نمود. در فصل ۲۵ از «هندبوک اشرفی: کاربردها» [۱۲]، یک بخش به طراحی سامانه‌های گرمایشی گلخانه اختصاص داده شده است و در آن توان مورد نیاز به صورت مجموع اتلاف از جداره و اتلاف به صورت نفوذی تخمین زده می‌شود:

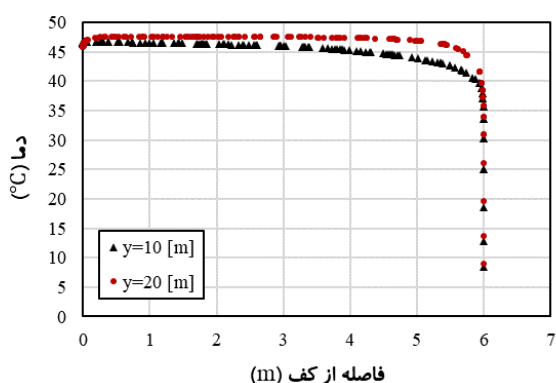
$$Q_t = UA(T_i - T_o) + Q_i \quad (12)$$

در این رابطه U ضریب انتقال حرارت کلی بوده و مقدار آن برای پوششش پلاستیک یک لایه معادل ۶/۸ وات بر متر مربع درجه سلسیوس داده شده است. A مساحت پوشش را نشان می‌دهد.  $T_i$  و  $T_o$  نیز دماهای مشخصه‌ی داخل و بیرون را تعیین می‌کنند. همچنین  $Q_i$  بار نفوذ هوا را نشان می‌دهد که با توجه به فرضیات ارائه شده برابر صفر است. با فرض اینکه دمای مشخصه در معادله (۱۲) برابر دمای میانگین دامنه‌ی حل باشد، می‌توان نتایج شبیه‌سازی را با مقایسه‌ی  $Q_t$  و  $P_{out}$  اعتبارسنجی کرد. با در نظر گرفتن نتایجی که از استقلال شبکه به دست آمد، توان مورد نیاز حدود ۲۰۷۰۰۰ کیلوکالری برآورد می‌شود که با توان اعمال شده در شرایط مرزی حدود ۱۳/۹٪ اختلاف قابل قبولی دارد.

## نتایج

به منظور بررسی اثر هوادهی بر توزیع دمای گلخانه‌ها در این پژوهش مجموعاً ۴ شبیه‌سازی با مشخصات جدول ۲ انجام شده‌اند. دو گلخانه با طول‌های ۲۵ و ۵۰ متر جهت مطالعه‌ی پدیده‌ی لایه‌ای شدن هوا در گلخانه‌های با سقف بلند انتخاب شدند و هر کدام در دو هوادهی مختلف مورد آزمون قرار گرفتند که به ترتیب منجر به افزایش دمای ۳۸ و ۲۵ درجه‌ای هوا در کوره می‌شوند. دمای میانگین و بیشینه در میدان جریان سیال نیز در این جدول گزارش شده‌اند. مطابق انتظار با افزایش حجم گلخانه از ۱۸۷۵ متر مکعب به ۳۷۵۰ متر مکعب، دمای هوای داخل مجموعه به طرز محسوسی کاهش می‌یابد. در مدل‌های ۱ و ۲ که حجم گلخانه از مقدار توصیه شده توسط سازنده کوچک‌تر است، دمای میانگین بسیار زیاد بوده در مدل‌های ۳ و ۴ به مقادیر منطقی برای کاربرد مورد نظر نزدیک می‌شود. بررسی دمای بیشینه نیز که همان دمای دهانه‌ی پرتاب کوره است، نشان می‌دهد که با افزایش هوادهی و کاهش رشد دما در کوره از ۳۸ درجه سلسیوس به ۲۵ درجه سلسیوس، بیشینه دما تقریباً ۲۲٪ کاهش می‌یابد. این کاهش دما سبب مطلوب‌تر شدن هوای پرتابی و آسیب کمتر به گیاهان می‌شود. نکته‌ی قابل برداشت دیگر آن است که در حجم ثابت

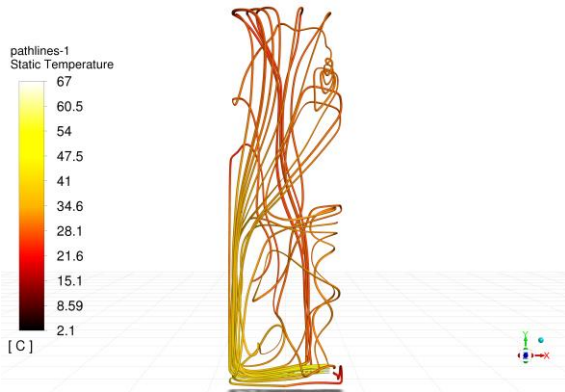
همینطور انتظار می‌رود که با افزایش هوادهی از لایه‌ای شدن هوا کاسته شود. این مورد با بررسی نمودارهای دمای عمودی زیر تاج گلخانه قابل دریافت است. شکل ۴، گرادیان دمای عمودی زیر تاج گلخانه‌ی مدل ۱ را در دو مقطع در فواصل ۱۰ و ۲۰ متری از دهانه‌ی ورودی گلخانه نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با توجه به کوچک بودن حجم گلخانه در برابر ظرفیت کوره، هم دما به مقدار محسوسی افزایش یافته و هم این که توزیع دما از کف تا نزدیکی سقف یکنواخت شده است؛ بنابراین می‌توان گفت که هوا لایه‌ای نشده است.



شکل ۴: گرادیان دمایی زیر تاج گلخانه‌ی مدل ۱

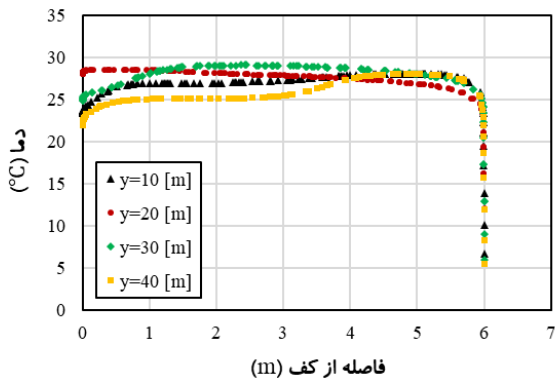
همین نتیجه برای مدل ۲ که نمودار آن در شکل ۵ نشان داده شده است نیز قابل استنتاج است. با توجه به این تصویر نیز برداشت می‌شود که توزیع دما یکنواخت بوده و لایه‌های هوایی دیده نمی‌شوند. اما دمای مقاطع مختلف نسبت به مدل ۱ مقداری کاهش یافته‌اند. در

نتیجه با توجه به حجم کوچک این گلخانه تغییر هوادهی دستگاه اثری خنثی دارد.



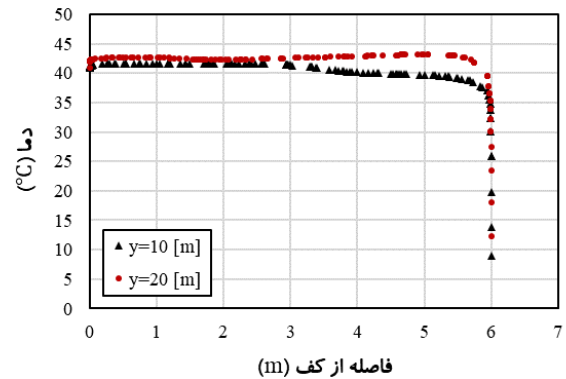
شکل ۷: خطوط جریان در مدل ۳ از نمای بالای گلخانه

مدل ۴ به بررسی کوره‌ای با افزایش دمای ۲۵ درجه‌ای و هوادهی بالاتر از حالت پیشین به ازای توان خروجی یکسان اختصاص دارد. این مدل سبب افزایش طول پرتاب باد در ازای افزایش اندکی در مصرف توان الکتریکی به واسطه‌ی استفاده از فن بزرگتر می‌گردد. انتظار می‌رود با افزایش هوادهی سرعت گرمایش و رسیدن دما به مقدار مطلوب افزایش یابد که موجب کاهش قابل توجه مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها می‌شود. همین موضوع در کنار کاهش رشد دما در کوره سبب بهبود یکنواختی دما در کل مجموعه خواهند شد. شکل ۸ این موضوع را تصدیق می‌کند. در این حالت بیشترین گرادیان دمایی مربوط به مقاطع انتهایی گلخانه می‌شود (تقریباً ۶ درجه سلسیوس). این در حالی است که در مقاطع ۱۰ و ۲۰ متری از ورودی، عملاً گرادیان دمایی و پدیده‌ی لایه‌ای شدن هوا مشاهده نمی‌شوند.



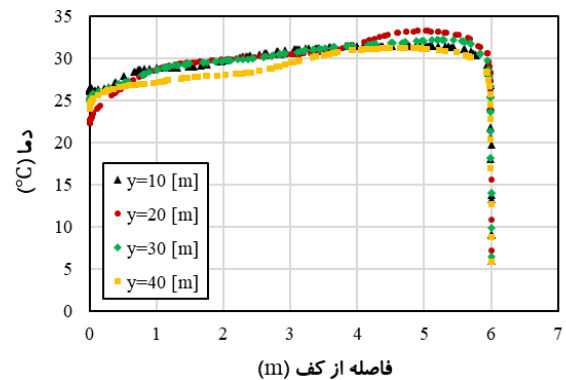
شکل ۸: گرادیان دمایی زیر تاج گلخانه‌ی مدل ۴

شکل ۹ به منظور مقایسه‌ی توزیع سرعت جت خروجی از دهانه‌ی کوره در مدل‌های ۳ و ۴ ترسیم شده است. با توجه به این تصویر جت در مدل ۳ به راحتی پس از حدود ۸ متر پیمایش مسیر مستقیم تحت اثر شناوری قرار گرفته و با کاهش مومنتم افقی به سمت بالا منحرف می‌شود. این موضوع به معنای آن است که جت هوای گرم را به همراه خود به سمت سقف مجموعه سوق می‌دهد. این افزایش دما در زیر پوشش سقف که از بیرون در مجاورت هوای سرد قرار دارد، یک گرادیان دمایی بزرگ بین دو سمت پوشش ایجاد



شکل ۵: گرادیان دمایی زیر تاج گلخانه‌ی مدل ۲

با افزایش حجم گلخانه (مدل ۳)، پدیده‌ی لایه‌ای شدن هوا نمود پیدا کرده و در نتیجه‌ی آن به طرز محسوس‌ی دمای هوای نزدیک سقف از دمای پایین گلخانه پیشی می‌گیرد. این پدیده در شکل ۶ به صورت واضح قابل مشاهده است. طبق این تصویر، برای کوره‌ای با افزایش دمای ۳۸ درجه سلسیوس، با دورتر شدن از دهانه‌ی پرتاب کوره، گرادیان دما در راستای ارتفاع ابتدا شدیدتر و سپس ضعیف‌تر می‌گردد. به عنوان مثال در فاصله‌ی ۱۰ متری از دهانه، گرادیان دما بین کف و ارتفاع ۵ متری، معادل ۷ درجه سلسیوس است و همین گرادیان در فاصله‌ی ۲۰ متری به ۱۰/۵ درجه سلسیوس رسیده و مجدداً در فاصله‌ی ۴۰ متری (انتهای گلخانه) به ۸ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد.



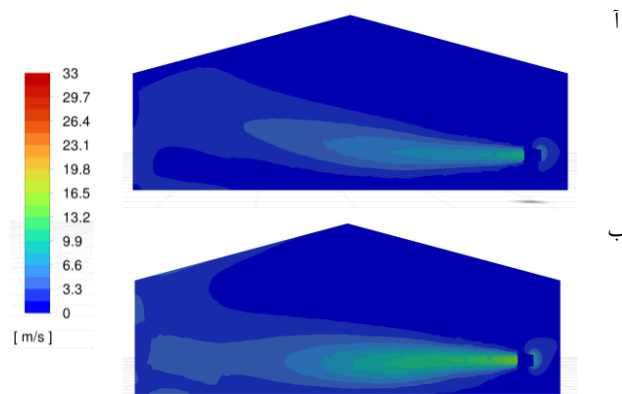
شکل ۶: گرادیان دمایی زیر تاج گلخانه‌ی مدل ۳

دلیل فیزیکی این حساسیت به فاصله را می‌توان به کمک خطوط جریان دریافت. همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود، جریان هوای داغ پس از خروج از دهانه‌ی کوره به صورت یک جت برخوردی در دیواره‌ی مقابل برخورد کرده و به سمت انتهایی گلخانه منحرف می‌شود. عمده‌ی جریان ابتدا تا انتهایی گلخانه را طی کرده و سپس به سمت فن کوره کشیده می‌شود. بنابراین هوای ناحیه‌ی مرکزی کمترین جریان را داشته و بیشتر دچار پدیده‌ی لایه‌ای شدن می‌گردد.

## مراجع و منابع

- [1] Pakari, A., Ghani, S., 2019. "Evaluation of a novel greenhouse design for reduced cooling loads during the hot season in subtropical regions". *Solar Energy*, 181, 234-242.
- [2] Tadj, N., Bartzanas, T., Fidaros, B., Draoui, B. and Kittas, C., 2010. "Influence of heating system on greenhouse microclimate distribution". *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 53(1), pp.225-238.
- [3] Teitel, M., Segal, I., Shklyar, A. and Barak, M., 1999. "A comparison between pipe and air heating methods for greenhouses". *Journal of Agricultural Engineering Research*, March, 72(3), pp.259-273.
- [4] Li, S., Willits D. H., 2008. "An experimental evaluation of thermal stratification in a fan-ventilated greenhouse". *Transactions of the ASABE*, 51(4), pp.1443-1448.
- [5] معتضدیان فرخ، تاکی مرتضی، فرهادی روح اله، رحمتی جنیدآباد مصطفی، ۱۴۰۱. "شبیه‌سازی جریان انرژی گلخانه نیمه‌دوطرفه شیشه‌ای با ساختار ویژه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)". *نشریه ماشین‌های کشاورزی*، جلد ۲۱، شماره ۴، زمستان ۲۴۴۲، ص ۴۹۴-۳۲۵.
- [6] Tadj, N., Nahal, M.A., Draoui, B. Constantinos, K., 2017. "CFD simulation of heating greenhouse using a perforated polyethylene ducts". *Int. J. Engineering Systems Modelling and Simulation*, 9(1), pp.3-11.
- [7] The British Standards Institution, 2019, Domestic and non-domestic gas-fired forced convection air heaters for space heating not exceeding a net heat input of 300 kW (BS EN 17082:2019). *BSI Standards Publication*.
- [8] [www.energy-ind.com](http://www.energy-ind.com) کوره هوای گرم گازی GF 2060. وب سایت شرکت انرژی کشور
- [9] Bu-Hamdeh, N. H., Reeder, R. C., 2000. "Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter". *Soil Science Society of America Journal*, 64(4), 1285-1290.
- [10] Garzoli K., Blackwell J., 1987. "An analysis of the nocturnal heat loss from a double skin plastic greenhouse". *Journal of Agricultural Engineering Research*, 36, 75-85.
- [11] J. C. Roy, T. Boulard, C. Kittas, S. Wang, 2002. "PA—Precision Agriculture: Convective and Ventilation Transfers in Greenhouses, Part 1: the Greenhouse considered as a Perfectly Stirred Tank". *Biosystems Engineering*. 83 (1), 1-20.
- [12] ASHRAE., 2019. 2019 ASHRAE Handbook Heating Ventilating and Air-Conditioning Applications (SI Edition). *American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Incorporated*.

می‌کند که مطابق قانون هدایت حرارتی فوریه سبب افزایش اتلاف از جداره می‌شود. در حالی که در مدل ۴، جت با حفظ مومنوم افقی و بدون اثرپذیری از نیروی ارشمیدس به دیواره‌ی مقابل برخورد می‌کند. این موضوع سبب شده تا در مقاطع ابتدایی گلخانه نسبت به دهانه‌ی پرتاب، کمترین گرادیان دمایی ایجاد شود که به بهبود یکنواختی توزیع دما خصوصاً در مقاطع نزدیک به محل نصب کوره‌ی هوای گرم می‌شود. با فاصله گرفتن از ابتدای گلخانه، به تدریج از مومنوم جریان کاسته می‌شود و نیروی شناوری اثر غالب بر جریان می‌گردد. در نتیجه همانطور که در شکل ۸ دیده شد، در مقاطع انتهایی گلخانه لایه‌ای شدن هوا تا حدی قابل مشاهده خواهد بود.



شکل ۹: توزیع سرعت دهانه‌ی پرتاب کوره برای (آ) مدل ۳ و (ب) مدل ۴

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی شده تا با شبیه‌سازی‌های عددی پدیده‌ی لایه‌ای شدن هوا در گرمایش گلخانه‌های صنعتی مشاهده و تأثیر راهکار احتمالی افزایش هوادهی یک کوره‌ی حرارتی به ازای توان خروجی یکسان، مورد مطالعه و بررسی قرار گیرند. دو افزایش دمای ۲۵ و ۳۸ درجه‌ی سلسیوس با هوادهی متناظر ۵۰۳۵ و ۳۳۱۲ متر مکعب بر ثانیه‌ای به این منظور بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که در گلخانه‌های با حجم کوچک این پدیده مشاهده نمی‌شود و با افزایش حجم گلخانه این پدیده با افزایش اختلاف دمای کف و نزدیک سقف شناسایی می‌شوند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش هوادهی، می‌توان از این اختلاف دما به مقدار چشمگیری کاست و توزیع هوای یکنواخت‌تری ایجاد نمود. افزایش نرخ هوادهی و کاهش گرادیان دمایی سبب تسریع در گرمایش گلخانه و همینطور کاهش مصرف انرژی می‌گردد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان از مجموعه‌ی محترم شرکت انرژی جهت در اختیار قرار دادن اطلاعات و حمایت از این پژوهش کمال تشکر را به عمل می‌آورند.