


Numerical Study on the Effects of Spray System and Wet Pads on the Greenhouse Temperature Distribution by Fan Ventilation System

S.Shahriyari¹M.K. Moayyedi^{*2} 

University of Qom, Qom, Iran .

(Received: 2024/05/05, Revised: 2024/06/07, Accepted: 2024/07/06, Published: 2024/07/22)


DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.1.1.7>

ABSTRACT

In this research, the behavior of air flow, temperature, and humidity changes inside a greenhouse will be modeled using numerical simulation. To increase the humidity of the air flowing inside the greenhouse, water is sprayed into the air with two amounts of mass flow rate, through the greenhouse using three different methods. In the first method, two moisturized pads are used. In the second method, two water sprays at specific distances and a height of 3m from the greenhouse floor are used. In the third method, twenty-seven water droplet sprays in different locations are used. On the other side of the greenhouse hall, there are four fans with negative pressure, establishing fresh air flow inside the hall. The turbulence modeling approach was used to model the effects of turbulence in the flow field. After validating the numerical results, the outcome model has been used to study the flow behavior and the effect of the latent energy of water in greenhouse ventilation and relative humidity. By examining fourteen conditions of water droplet injection inside the greenhouse, the most suitable condition contains 50pa back pressure, 27 sprays, and a mass flow rate of droplet injection of 0.04 kg/s. On the other hand, if the mentioned plans are examined with the criterion of temperature changes and suitable environmental conditions. It can be seen that the outlet pressure of 100pa and mass flow rate of 0.08kg/s for water droplet injection in moisturized pad configuration, will be the best plan for the growth of plants such as Gladiolus in the greenhouse environment.

Keywords: Greenhouse Ventilation, computational Fluid Dynamics, Temperature Distribution, Humidity Ratio, Evaporation.

مطالعه عددی تأثیرات سیستم افشانه و پدهای مرطوب در توزیع دمای گلخانه‌ای با سیستم تهویه فن

محمد کاظم مؤیدی^{*2} سجاد شهریاری¹

دانشگاه قم، قم، ایران.

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶، انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱)

چکیده

در این پژوهش رفتار جریان هوا، تغییرات دما و رطوبت در یک سالن گلخانه به کمک شبیه‌سازی عددی مطالعه شده است. به منظور رطوبت‌دهی به هوای در حال جریان داخل سالن گلخانه، دو میزان ۰/۰۴ و ۰/۰۸ کیلوگرم بر ثانیه آب با سه روش متفاوت به هوای عبوری به سالن گلخانه پاشش می‌شود در روش اول دو پد رطوبتی با مجموع سطح مقطع ۱۵ متر مربع و در روش دوم دو افشانه در فاصله ۵ و ۳۰ متری از دیوار ابتدایی سالن و در ارتفاع ۳ متری از کف گلخانه عملیات پاشش آب را انجام می‌دهند. در روش سوم، بیست‌وهفت افشانه عملیات پاشش قطرات آب را در مختصات مختلف به هوای عبوری گلخانه پاشش می‌کنند. در سمت دیگر سالن گلخانه چهار فن با فشار منفی قرار دارند که جریان هوای تازه را در داخل سالن برقرار می‌کنند. پس از اعتبار سنجی نتایج، از مدل توسعه‌یافته به منظور بررسی رفتار جریان و تأثیر انرژی نهان آب در تهویه گلخانه و رطوبت نسبی بهره گرفته شده است. با بررسی چهارده حالت تزریق رطوبت به هوای گلخانه، بهترین حالت به ازای فشار خروجی فن برابر ۵۰ پاسکال، با مدل ۲۷ افشانه و نرخ جریان جرمی پاشش قطرات معادل ۰/۰۴ بدست آمده است. از طرفی اگر با معیار تغییرات دما و شرایط محیطی مناسب، طرح‌های اشاره شده مورد بررسی قرار گیرند، مشاهده می‌شود حالتی که از مدل پد رطوبت‌زنی با فشار فن ۱۰۰ پاسکال و نرخ جریان جرمی پاشش قطرات ۰/۰۸ استفاده می‌شود، بهترین طرح برای رشد گیاهانی چون گلایل در محیط گلخانه مورد بررسی خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: تهویه گلخانه، دینامیک سیالات محاسباتی، توزیع دما، نسبت رطوبت، تبخیر

۱- کارشناس ارشد: sajjad_shahriyari@yahoo.com

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): moayyedi@qom.ac.ir

۱- مقدمه

باتوجه به اهمیت تولیدات کشاورزی در تأمین مواد غذایی انسانی و دامی و همچنین صنعت داروسازی، تحقیقات و تلاش‌های زیادی در جهت بهبود شرایط ایده‌آل برای نگهداری و رشد و پرورش گیاهان و حیوانات انجام شده است. بخشی از این تحقیقات که از دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی رفتار جریان هوا، دما و رطوبت در مسائل مرتبط با صنعت کشاورزی و امور دامپروری استفاده کرده‌اند، توسط توماس نورتن و داوونسون [۱] جمع‌آوری شده است. گاروسیا و گاسومی [۲] فرآیند انتقال حرارت و انتقال جرم در یک انبار سیب‌زمینی به کمک شبیه‌سازی عددی را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها میزان انتقال حرارت تولید شده توسط متابولیسم محصولات، مقاومت پوسته محصولات در برابر هدررفت رطوبت و سایر پارامترهای نگهداری محصولات را به کمک یک شبیه‌سازی دوبعدی برای انبار سیب‌زمینی تحت انتقال حرارت جابه‌جایی از جدارها را مورد بررسی قرار داده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر از کار آیی دینامیک سیالات محاسباتی در صنعت کشاورزی، ژبانگلی و ژیان وانگ [۳] پس از اعتبارسنجی نتایج حل عددی با نتایج آزمایشی در حالت واقعی، به بررسی ابعاد پنجره‌های پشتی یک گلخانه پرداخته‌اند. ابعاد این دریچه در نحوه توزیع سرعت و دما در گلخانه تأثیر بسزایی داشته و در این مقاله سعی شده تا ابعاد بهینه این دریچه مورد بررسی قرار گیرد. در تحقیقی دیگر، راک وو کیم و همکارانش [۴، ۵] اثر تغییرات فشار بر روی سازه گلخانه مورد بررسی قرار دادند. آنها ابتدا با اعتبارسنجی از نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و داده‌های حاصل از آزمایش برای یک سالن گلخانه، به بررسی جریان هوا در محیط پیرامونی چند سالن گلخانه با ساختمان‌های متفاوت پرداختند. سی‌ونگ‌هانگ و همکارانش [۶]، با بررسی چهار مدل آشفتگی و با اندازه شبکه متفاوت به اعتبارسنجی این مدل برای جریان جابه‌جایی طبیعی حول یک گلخانه پرداخته‌اند. همچنین توانایی‌های این روش در تحلیل جریان سیالات در زمینه کشاورزی، از جمله تهویه انبارها که یک نمونه از آن توسط جینگ ژی و همکارانش [۷] برای یک انبار نگهداری بسته‌های سیب‌زمینی انجام گرفته است، مورد بررسی قرار گرفت. اهمیت و کار آیی این ابزار محاسباتی و بررسی شرایط مرزی مختلف از جمله وزش باد در جهات مختلف یا اضافه‌شدن حشره گیرها در

ورودی‌ها و حل توسط مدل‌های مختلف آشفتگی و بررسی کار آیی آنها توسط پیر امانوئل بوورنت و تیری بولارد [۸] انجام شده است. ساجدیه و صابریان [۹] در دانشگاه شهید چمران اهواز، در یک گلخانه که مجهز به سیستم فن و پد است، به بررسی چگونگی توزیع جریان هوا و دما پرداخته‌اند. آنها تأثیر زاویه تابش خورشید را بر توزیع دما و سرعت در سه زمان متفاوت در فصل تابستان را به صورت اندازه‌گیری آزمایشگاهی و نتایج حاصل از تحلیل با نرم‌افزار فلونتت اندازه‌گیری کرده‌اند. یکی از روش‌های گرمایش سالن گلخانه، استفاده از لوله‌های حرارتی حامل آب یا بخار آب گرم می‌باشد. منکران دیمان [۱۰]، گلخانه‌ای که مجهز به این سیستم گرمایشی بود را به کمک نرم‌افزار انسیس فلونتت شبیه‌سازی و چگونگی توزیع دما و سرعت هوا در نقاط مختلف گلخانه را بررسی کرد. علی پاکری و سعود قانی [۱۱] نیز به مقایسه نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی یک گلخانه در تونل باد و شبیه‌سازی عددی آن پرداختند. گلخانه مدنظر آنها مجهز به بادگیر بود. آنها پس از اعتبارسنجی، شبیه‌سازی جریان هوا در ورودی بادگیرها را بهینه‌سازی کردند. در کار مشترک دیگری که این دو محقق [۱۲] انجام دادند، با مدل‌سازی یک سالن گلخانه در منطقه‌ای نیمه‌گرمسیری، به بررسی کنترل ورود نور موردنیاز توسط پنجره‌های کوچک‌تر به داخل گلخانه برای گیاه گوجه‌فرنگی و انتقال گرمای مازاد ناشی از تشعشع خورشید پرداختند. بررسی نشان داد ۸۰ درصد از انرژی لازم برای سرمایش گلخانه را می‌توان کاهش داد. ویلگران و همکارانش [۱۳] بر توزیع بهینه جریان هوا در سه مدل از گلخانه و در یک منطقه استوایی پرداختند. آنها با نظر گرفتن وزش باد از شمال به جنوب، تحلیل و بررسی خود را به صورت دوبعدی و گذرا مدل کردند. سعود قانی و همکارانش [۱۴] پژوهشی بر روی یک گلخانه در کشور قطر انجام دادند. آنها ابتدا نتایج اندازه‌گیری‌های خود را با نتایج حاصل دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه کرده و سپس به بررسی تغییرات دما، سرعت هوا، رطوبت و تشعشع در انواع گلخانه‌های ساخته شده بر اساس استاندارد ASHRE^۱ پرداختند. ساپوناس [۱۵] هم یک گلخانه مجهز به سیستم فن و پد را مدل کرد، با این تفاوت که اثرات بررسی تبخیر آب بر روی پدها در نظر

^۱ American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

داده‌های آزمایشگاهی پرداخته و متوجه شدند در مدل شامل پدهای خشک و تر، میزان درستی نتایج حاصل از حل عددی متفاوت است. ژیاثولیانو چن و همکارانش [۲۳]، یک گلخانه مجهز به سیستم فن و پد و سایه‌بان را مورد بررسی قرار دادند. آنها با مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی دریافتند که نتایج حل عددی برای این منظور قابل اطمینان بوده و پس از آن به بررسی ارتفاع جانمایی فن و پدها پرداختند.

در تحقیق حاضر، پس از اعتبارسنجی نتایج به کمک نمودار رطوبت سنجی، یک گلخانه با ابعاد 12×60 و ارتفاع $3/4$ به صورت سه بعدی مدل شده است. در این تحقیق سه روش سرمایش تبخیری به کمک پدهای رطوبت زن، مه پاشی توسط دو افشانه و مه پاشی توسط بیست و هفت افشانه برای گلخانه مذکور مدل شده است. در روش اول آب در ورودی، یعنی جایی که دو پنجره در آن تعبیه شده است، به دو میزان $0/04$ و $0/08$ کیلوگرم بر ثانیه پاشش شده است. در روش دوم نیز آب به دو میزان مشابه حالت قبل توسط دو افشانه پاشش می‌شود و در مدل سوم بیست و هفت افشانه آب را پاشش می‌کنند. نتایج حاصل با توجه به شاخص‌های تهویه گلخانه و رشد و باروری گیاهان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. لازم به توضیح است در این تحقیق از ماژول فلوننت بسته نرم افزاری انسیس بهره گرفته شده است.

۲- معادلات حاکم بر میدان جریان

معادلات حاکم بر جریان شامل معادله پیوستگی و اندازه حرکت خطی به شرح زیر می‌باشد.

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho f - \nabla P + \mu_{effective} \nabla^2 V \quad (2)$$

که در آن V بردار سرعت، P فشار، f نیروهای حجمی و $\mu_{effective}$ لزجت موثر می‌باشد.

۲-۱- مدلسازی آشفستگی

باتوجه به اینکه جریان مورد بررسی، آشفته می‌باشد، لازم است تا اثرات آن نیز در میدان جریان مدل‌سازی شود. در این پژوهش از مدل آشفستگی $k-\omega$ -SST استفاده شده است. این مدل ترکیبی از مدل‌های $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ بوده که

گرفته نشد و فقط اختلاف دمای ناشی از عبور هوا از روی پدها را لحاظ کرد. در نهایت به بررسی توزیع دما در داخل سالن گلخانه باتوجه به دبی متفاوت هوا در فن‌ها پرداخت. ساپوناس [۱۶] در پژوهشی دیگر با مدل‌سازی یک گلخانه چند سالنه و محیط پیرامونی آن، توزیع دما، رطوبت، تشعشع و سرعت هوا در داخل سالن گلخانه باتوجه به جهت وزش باد منطقه احداث گلخانه که در غرب کشور ترکیه قرار داشت، را بررسی کرد. بارتناز [۱۷] پس از اعتبارسنجی نتایج دینامیک سیالات محاسباتی و مدل‌سازی جریان هوای داخل سالن گلخانه به صورت جریان طبیعی، نشان داد که بزرگ‌تر شدن ابعاد دریچه‌های تهویه شرط لازم در تنظیم دمای هوای داخل گلخانه و جریان هوا نمی‌باشد. داوید پیسکا و همکارانش [۱۸] با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و داده‌های تجربی از یک گلخانه واقعی به این نتیجه رسیدند که نتایج این روش محاسباتی در خصوص برآورد رطوبت نسبی با واقعیت همخوانی کامل دارد. آنها با مدل‌سازی جریان طبیعی در یک سالن گلخانه به هنگام شب، میزان رطوبت میعان شده بر روی دیواره گلخانه را برآورد کردند و در این زمینه به نتایج قابل توجهی رسیدند. ژانگ و فو و همکارانشان [۱۹] یک گلخانه که به سبک چینی‌ها ساخته شده بود، را شبیه‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد تهویه طبیعی همراه با افزایش بازشوهای دریچه افزایش یافته و باعث افت رطوبت هوا و دما در گلخانه خورشیدی می‌شود، این تغییرات رابطه خطی با میزان بازشوها نداشت. گلخانه چینی دیگری نیز توسط وانگ ژیانو وی [۲۰] مورد بررسی قرار گرفت. وی با مدل‌سازی دوبعدی یک گلخانه ساخته شده از پلاستیک به سبک چینی به بررسی توزیع دما، سرعت و رطوبت در صفحه عمود بر طول گلخانه به صورت دوبعدی پرداخت. در خصوص مدیریت رطوبت و کنترل میعان رطوبت هوا، کامپن و بوت [۲۱] بررسی‌هایی به کمک اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و حل عددی جریان سیال انجام دادند. آنها تعدادی لوله مسلح به فن را در گلخانه مدل کرده که این لوله‌ها به کمک یک سیکل تبرید، سرد می‌شوند. این لوله‌ها می‌توانستند میزان 54 گرم بخار در ساعت را از هوایی با دمای 20 درجه سانتی‌گراد و با رطوبت نسبی 80 درصد بگیرند. فرانکو و همکارانش [۲۲] به بررسی رفتار آب‌وهوا بر روی پدهای سرمایشی گلخانه پرداخته‌اند. آنها در تحقیق خود به صحت سنجی نتایج دینامیک سیالات محاسباتی با

۲-۴- مدل سازی پاشش قطرات آب

جریان های دوفاز سیال - ذره می تواند به دسته های گوناگونی تقسیم شده که هر یک کاربردهای صنعتی و غیرصنعتی مخصوص به خود را دارد. سیستم هایی که در آنها جریان گاز حاوی ذرات معلق در خود، اعم از اینکه این ذرات در چه فازی است، جریان دوفازی گاز ذره نامیده می شود. جریان گاز - ذره را می توان به دودسته عمده گاز - جامد و گاز - قطره تقسیم نمود. تفاوت عمده دودسته اخیر در این است که در جریان گاز - جامد انتقال فاز وجود ندارد؛ اما در جریان گاز - قطره امکان رخ دادن تغییر فاز وجود دارد. این جریان ها به شکل های مختلفی طبقه بندی می شوند. کسر حجمی^۱ که در رابطه (۷) قابل مشاهده است، مرسوم ترین معیار برای طبقه بندی این نوع جریان دوفازی می باشد. طبق این رابطه N تعداد ذرات، v حجم هر ذره و V حجم گازی حاوی ذرات می باشد. در کسر حجمی پائین، جریان دوفازی رقیق در نظر گرفته شده که در آن فاز پیوسته (گاز) روی ذرات غالب بوده و ذرات تحت نیروهای سطحی و حجمی که بر آنها وارد می شود در جریان گاز حرکت می کند. در این حالت ذرات غیرفعال بوده و هیچ اثری بر روی فاز پیوسته ندارد. این نوع از جریان معروف به کوپل تک راهه^۲ می باشد. وقتی کسر حجمی قابل توجه باشد، جریان غلیظ در نظر گرفته شده و علاوه بر نیروهای وارده از طرف فاز پیوسته، اثر اندازه حرکت ذرات روی جریان قابل توجه بوده و باید در نظر گرفته شود. (کوپل دو راهه^۳).

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{V} \quad (7)$$

به طور کلی دو دیدگاه اوپلری - اوپلری و اوپلری - لاگرانژی به منظور محاسبه جریان دوفازی مورد استفاده قرار می گیرد. در دیدگاه اوپلری - اوپلری فازهای مختلف از نظر ریاضی به صورت یک محیط پیوسته در نظر گرفته می شود. از آنجایی که حجم یک فاز توسط فازهای دیگر اشغال نمی شود، مفهوم کسر حجم فازی مطرح شده است. با در نظر گرفتن معادلات بقا برای هر یک از فازها، مجموعه ای از معادلات به دست می آید که برای هر فاز، ساختاری مشابه

توسط منتر پیشنهاد شده است. معادلات این مدل به شرح زیر می باشد [۲۴]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \quad (3)$$

$$P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} =$$

$$\frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$+ 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

۲-۲- معادله بقای انرژی

از آنجایی که در مسئله حاضر تبادل حرارت و انرژی بین هوا، دیوار و قطرات آب بسیار حائز اهمیت است. در مدل سازی از معادله بقای انرژی نیز استفاده شده است. معادله بقای انرژی برای یک جریان تراکم ناپذیر به شکل زیر تعریف می شود:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + (V \cdot \nabla) T = -\nabla \cdot (k \nabla T) + q_{gen} \quad (5)$$

در معادله فوق، q_{gen} انرژی حرارتی تولید شده در حجم کنترل می باشد.

۲-۳- معادلات بقای جرم گونه ها

به منظور تحلیل رفتار قطرات آب تزریق شده در هوای گلخانه که تبخیر شده و به جزئی از هوا تبدیل می شوند، از قانون بقای جرم گونه ها در این تحلیل استفاده شده است. قانون بقای جرم گونه ها به صورت معادله (۶) تعریف شده که در آن \dot{m}_A میزان تولید یا کاهش گونه A می باشد. در این پژوهش به صورت میزان تبخیر آب در فشار و دمای جریان هوا تعریف شده و D_{AB} ضریب نفوذ گونه A در گونه B می باشد:

$$\frac{\partial(\rho Y_A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j Y_A)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho D_{AB} \frac{\partial Y_A}{\partial x_j}) + \dot{m}_A \quad (6)$$

با توجه به موضوع تبخیر آب در هوای یک گلخانه، گونه A به عنوان آب و گونه B به عنوان هوا تعریف می شود. در معادله (۶)، \dot{m}_A میزان شار جرمی آب تزریق شده و Y_A نسبت جرمی گونه A است.

1 Volume fraction
2 One way coupling
3 Two way coupling

در این مسئله عملکرد سیستم‌های سرمایش تبخیری گلخانه‌ای فن - پد و مه‌پاش در یک سالن با ابعاد $۳/۴ \times ۱۲ \times ۶۰$ متر باهدف بررسی توزیع بهینه‌دما، سرعت و رطوبت در هوای عبوری، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. چهار فن با قطر ۹۰ سانتی‌متر با ایجاد اختلاف فشارهای ۱۰۰ و ۵۰ پاسکال هوای داخل سالن را به بیرون هدایت می‌کنند. در طرف دیگر سالن، دو پنجره به ابعاد $۱/۵ \times ۵$ متر به‌منظور ورود هوا به داخل سالن گلخانه تعبیه شده است. به‌منظور رطوبت‌زنی و کاهش دما سه روش اتخاذ شده است، این روش‌ها به ترتیب عبارت‌اند از:

- تعبیه پدهای رطوبتی در پنجره‌های ورودی
- دو افشانه در فاصله ۴ و ۳۰ متری از دیوار ابتدایی سالن (سمت پنجره‌ها) و در ارتفاع ۳ متری از کف
- تقسیم طولی گلخانه به نه ردیف سه‌تایی و رطوبت‌زنی به کمک بیست و هفت افشانه

در شکل ۱ می‌توان ابعاد گلخانه مورد بحث را مشاهده نمود. این گلخانه در ۱۴ حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته که در جدول ۱ مشخصات هر حالت معرفی شده‌است. دیواره‌ها و کف سالن با دمای ثابت ۳۲۰ کلوین در نظر گرفته شده و از اثرات انتقال حرارت تشعشع، صرف نظر شده‌است.

در شکل ۲ مختصات دو افشانه‌ای که به‌منظور پاشش آب تعبیه شده‌اند، نشان داده شده است. این دو افشانه در مجموع $۰/۰۴$ و $۰/۰۸$ کیلوگرم بر ثانیه آب را پاشش می‌کنند. این پاشش به‌صورت مخروطی و با زاویه ۹۰ درجه و قطر یک متر انجام می‌شود. در شکل ۳ مختصات بیست و هفت افشانه‌ای که به‌منظور پاشش آب تعبیه شده‌اند، نشان داده شده است. این افشانه‌ها در مجموع $۰/۰۴$ و $۰/۰۸$ کیلوگرم بر ثانیه آب را پاشش می‌کنند.

دارد. در دیدگاه اوپلری - لاگرانژی فاز گسسته ذرات به طور مجزا با حل معادلات دیفرانسیلی حاکم بر دینامیک هر ذره ردیابی شده و نهایتاً مؤلفه‌های سینماتیکی در تمام لحظات حل به دست می‌آید. معادلات حاکم بر فاز گاز همان معادلات شناخته شده ناویر - استوکس بوده که فقط عبارت‌های ناشی از اندرکنش ذرات و گاز به‌صورت جملات چشمه یا چاه به آن اضافه می‌شود. همچنین برای فاز ذرات بایستی برای هر ذره معادلات حاکم را حل کرده و با ردیابی هر ذره، مختصات را برای ذرات به دست آورد. در این مطالعه عددی، فاز گسسته می‌تواند با فاز پیوسته تبادل جرم و اندازه حرکت داشته باشد. فرض اساسی برای ساخت این مدل این است که فاز گسسته دوم مقدار کمی از کسر حجمی را اشغال کند. برای جریان‌های گاز - ذره استفاده از این دیدگاه توصیه می‌شود. در این تحقیق به‌منظور حل مسئله حاضر از مدل فاز گسسته و دیدگاه اوپلری - لاگرانژی استفاده شده است [۲۸].

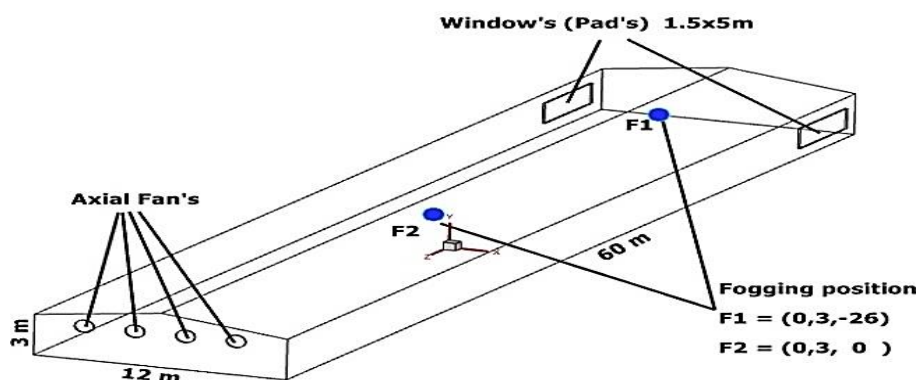
۲-۵- محاسبه رطوبت نسبی

با دانستن دمای حباب تر و دمای حباب خشک و فشار هوا، می‌توان رطوبت نسبی را با استفاده از رابطه (۸) بدست آورد [۲۵]:

$$\Phi = \frac{\omega \times P}{(0.622 + \omega)P_g} \quad (8)$$

که در آن P_g فشار اشباع آب در دمای مورد بررسی، ω رطوبت مطلق و P فشار هوا می‌باشد. رطوبت نسبی را می‌توان به‌صورت نسبت جرم آب موجود در هوا به جرم آب موجود در هوا در حالت اشباع تعریف کرد.

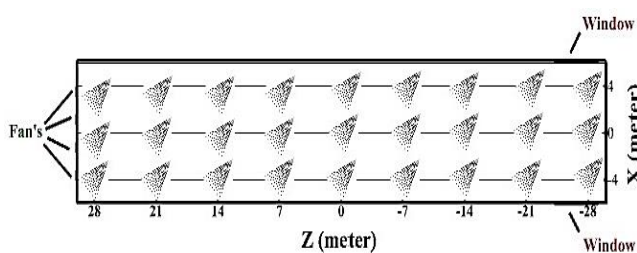
۳- هندسه مدل



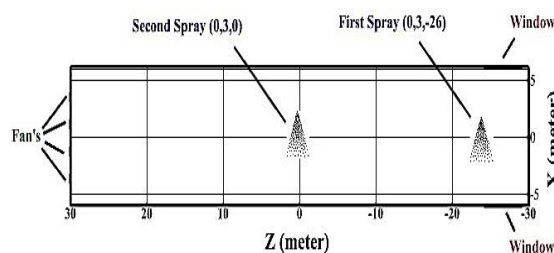
شکل ۱: هندسه مدل دو روش رطوبت‌زنی در پدها و مه‌پاشی در دونقطه

جدول (۱): حالت‌های مورد بررسی

حالت	نوع پاشش	فشار فن (پاسکال)	میزان پاشش آب (کیلوگرم بر ثانیه)
50_A	ندارد	-۵۰	صفر
100-A	ندارد	-۱۰۰	صفر
50_B_P	پد	-۵۰	۰/۰۴
100_B_P	پد	-۱۰۰	۰/۰۴
50_B_F	دو افشانه	-۵۰	۰/۰۴
100_B_F	دو افشانه	-۱۰۰	۰/۰۴
50-B-27F	۲۷ افشانه	-۵۰	۰/۰۴
100-B-27F	۲۷ افشانه	-۱۰۰	۰/۰۴
50_C_P	پد	-۵۰	۰/۰۸
100_C_P	پد	-۱۰۰	۰/۰۸
50_C_F	افشانه	-۵۰	۰/۰۸
100_C_F	افشانه	-۱۰۰	۰/۰۸
50-C-27F	۲۷ افشانه	-۵۰	۰/۰۸
100_C-27F	۲۷ افشانه	-۱۰۰	۰/۰۸



شکل (۳). موقعیت افشانه‌ها در بیست و هفت نقطه



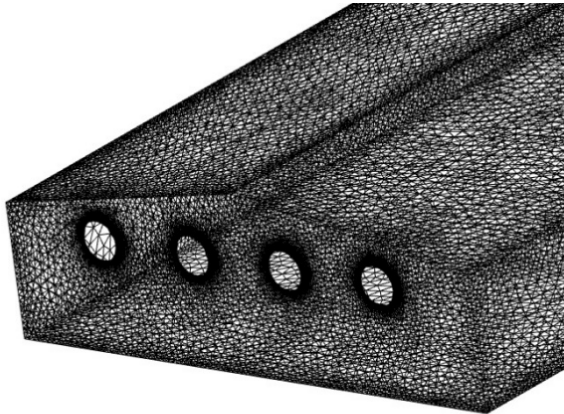
شکل (۲). موقعیت پاشش در دو افشانه

انجام گیرد. در شکل ۴، نام‌گذاری سطوح به‌منظور شبکه‌بندی حجم و سطوح هندسه مسئله نشان‌داده شده است. در شکل ۵، نمایی از شبکه محاسباتی تولید شده برای حل مسئله موردنظر نمایش داده شده است. لازم به توضیح است که شبکه تولید شده برای مسئله حاضر، توسط نرم‌افزار انسیس مشینگ^۱ صورت گرفته است.

۴- شبکه محاسباتی

به‌منظور حل عددی معادلات حاکم نیاز است تا حجم کنترل موردنظر به یک مدل محاسباتی تبدیل شود. یکی از بخش‌های مهم این فرآیند، تولید نقاط شبکه محاسباتی یا به عبارتی تولید شبکه می‌باشد. در این پژوهش از مدل شبکه‌بندی ترکیبی استفاده شده است. بدین منظور باید تولید شبکه روی سطوح و سپس در داخل حجم کنترل

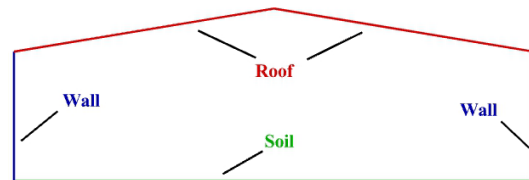
^۱ANSYS Meshing



شکل (۵). نمایی از شبکه محاسباتی تولیدشده برای مسئله موردنظر شده است [۲۹]. برای جفت شدگی فشار-سرعت از الگوریتم سیمپل^۱ استفاده شده است.

۶- اعتبار سنجی

به منظور صحت سنجی و عملکرد مدل محاسباتی در بررسی رفتار جریان هوا و تبخیر آب، نتایج یک مدل آزمایشگاهی که در آن هوا با دمای ۳۱۵ کلوین و نسبت رطوبت ۰/۰۱۱۵۸۳ کیلوگرم آب بر کیلوگرم هوای خشک وارد می‌شود، در نظر گرفته شده است. با اضافه کردن و پاشش آب با دمای ۳۱۵ کلوین و شار جرمی ۰/۰۲ کیلوگرم بر ثانیه، روند تغییرات مشخصات آن با نمودار رطوبت سنجی^۲ مقایسه شده است. در این مدل آزمایشگاهی یک کانال هوا با ابعاد ۲×۲ متر و طول ۱۵ متر وجود دارد. دیواره‌های این کانال عایق حرارتی می‌باشد (انتقال حرارت از دیواره‌ها صفر است). در شکل ۶ می‌توان این کانال را مشاهده نمود. در این کانال آب در ورودی به هوای در حال جریان تزریق می‌شود و منجر به کاهش دمای آن می‌شود. در شکل ۷ تغییرات دما و نسبت جرمی آب به هوای تر نشان داده شده است. لازم به توضیح است در این مدل اثر جاذبه در نظر گرفته نشده تا اختلاط هوا به خوبی انجام گرفته و هوا در خروجی شرایط یکنواختی داشته باشد. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده می‌باشد، هوا با کاهش دما مواجه شده است. دما در خروجی برابر با ۳۱۲/۴۲ کلوین و نسبت رطوبت ۰/۰۱۲۶۹ به دست آمده است. باتوجه به شرایط تعریف شده در این مدل، فرآیند موجود در



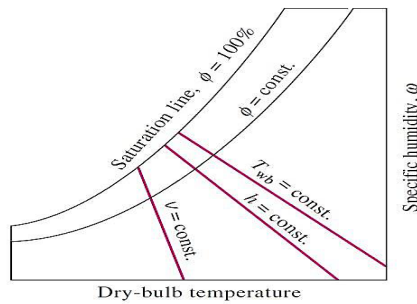
شکل (۴). نام گذاری سطوح به منظور اندازه‌گذاری شبکه‌بندی

۵- شرایط مرزی و روش حل عددی

در این مسئله هوای خارج از گلخانه دارای رطوبت نسبی ۲۲/۵ درصد و دمای ۳۱۵ کلوین است. پنجره‌های ورودی به صورت فشار ثابت صفر پاسکال (۱ اتمسفر) با دمای ۳۱۵ کلوین و نسبت جرمی آب ۰/۰۱۱۴۵ در نظر گرفته شده‌اند. به منظور برقراری جریان هوا در داخل سالن گلخانه، فشار منفی برای فن‌ها در نظر گرفته شده و شرایط مرزی تعریف شده برای فن‌ها دو مقدار فشار خروجی معادل ۵۰- و ۱۰۰- پاسکال است. با فرض اینکه گلخانه در ساعاتی از روز به تعادل انرژی می‌رسد [۲۷]، کف، سقف و دیواره‌های گلخانه با صرف نظر کردن از اثر تشعشع، به صورت دما ثابت و با دمای ۳۲۰ کلوین فرض شده است. سرعت روی دیواره‌ها صفر و هیچگونه نفوذی از سطوح صورت نمی‌گیرد. قطر قطرات آب پاشش شده معادل ۰/۰۰۰۰۳ متر بوده و در حالتی که تزریق به صورت پد رطوبتی است، سرعت آنها صفر و زمانی که توسط افشانه پاشش می‌شوند، سرعت آنها ۳۶ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. به منظور حل معادلات حاکم بر میدان جریان، معادلات آشفستگی و حرکت قطرات آب از روش عددی استفاده شده است. معادلات میدان جریان با روش حجم محدود مرتبه دوم بالادست جداسازی شده و برای حل عددی معادلات انرژی جنبشی، نرخ اضمحلال آشفستگی، انتقال جرم گونه‌ها و انرژی نیز از روش مرتبه دوم بالادست بهره برده شده است. همچنین معادلات حرکت قطرات آب با استفاده از روش انتگرال‌گیری ذوزنقه‌ای حل

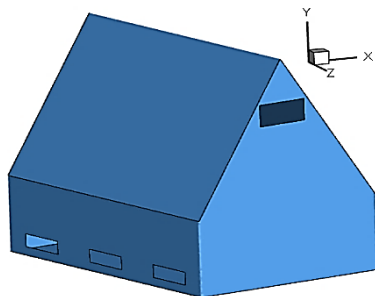
^۱SIMPLE

^۲ Psychrometric chart



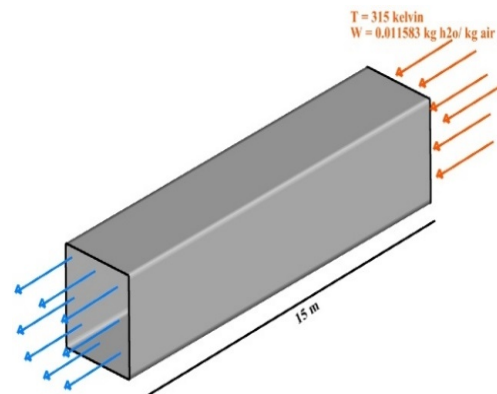
شکل (۸). نمودار رطوبت سنجی [۳۰]

به منظور بررسی کیفی و دقیق تر مدل محاسباتی بکار رفته در این پژوهش، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از مدل محاسباتی پژوهش حاضر و نتایج حاصل از مطالعه ملالو عبدالرحمان و همکاران به منظور اعتبارسنجی مربوط به تنظیمات مدل انتقال رطوبت صورت گرفته است [۳۱]. هندسه این مدل مشابه مدل مورد مطالعه در پژوهش حاضر بوده و علاوه بر آن مانند مدل مورد مطالعه فاقد محصول می-باشد. در مطالعه مذکور، یک گلخانه به ابعاد $6 \times 4 \times 5$ متر با پوشش پلی‌کربنات در نظر گرفته شده است. این گلخانه مطابق شکل ۹، دارای سه دریچه ورودی در دیوار جانبی به ابعاد 0.3 مترمربع و دو دریچه خروجی هوا در بالای گلخانه به ابعاد 0.5 مترمربع است. شرایط مرزی برای حالت مورد مطالعه در این پژوهش در ورودی‌ها، سرعت ورودی و در خروجی‌ها، فشار خروجی می‌باشد. شبکه محاسباتی ایجاد شده جهت مدل‌سازی، شبکه ترکیبی با تعداد ۲۶۶۶۲۲۷ المان بوده و اعتبارسنجی به وسیله آن صورت گرفته که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. بر طبق این جدول، نتایج حاصل از مدل‌سازی تطابق خوبی را با مرجع مورد نظر نشان می‌دهد که بر این اساس می‌توان نسبت به درستی تنظیمات مرتبط با مدل انتقال رطوبت بکار رفته اطمینان حاصل کرد و آن را برای گلخانه مورد مطالعه در پژوهش پیشرو توسعه داد.

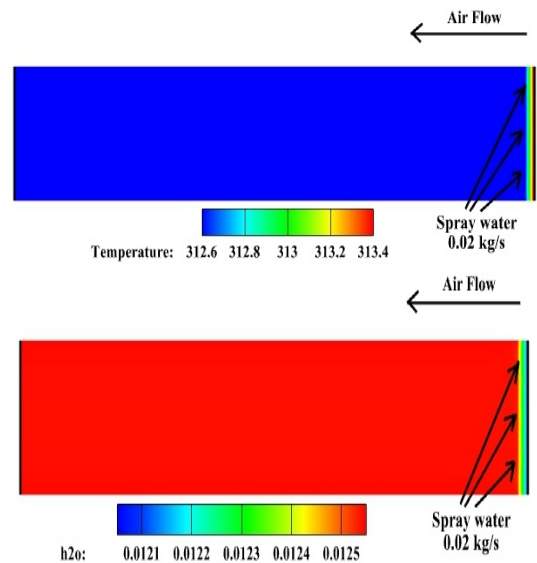


شکل (۹). گلخانه مورد مطالعه در پژوهش ملالو عبدالرحمان و همکاران [۳۰]

آن یک فرآیند آنتالپی ثابت است. از این رو هوای خروجی باید آنتالپی برابری با هوای ورودی داشته باشد. باتوجه به خطوط آنتالپی ثابت در نمودار رطوبت سنجی مقادیر به دست آمده در مدل آزمایشی با نمودار رطوبت سنجی مقایسه شده است. با در نظر گرفتن جریان به صورت آنتالپی ثابت که در ورودی برابر با $72/17515$ کیلوژول بر کیلوگرم هوای تر و میزان نسبت رطوبت در خروجی، مقدار دما به کمک نمودار رطوبت سنجی (شکل ۸) $312/22$ کلون است. اختلاف دمای 0.2 درجه‌ای بین حل عددی و نمودار رطوبت سنجی می‌تواند ناشی از انرژی جنبشی اولیه قطرات آب پاشش شده و همچنین اصطکاک و رفتار جریان هوا با جداره‌های کانال باشد. از این رو باتوجه به نتایج به دست آمده در این مدل آزمایشی، می‌توان با حل عددی جریان سیال به بررسی رفتار هوا باتوجه به پاشش آب و فرآیند تبخیر پرداخت.



شکل (۶). مدل آزمایشگاهی به منظور صحت سنجی مدل محاسباتی



شکل (۷). تغییرات دما و نسبت جرمی آب به هوای تر در مدل آزمایشی

۷- مطالعه استقلال حل از شبکه

می‌شود که متوسط دمای خروجی از فن‌ها تقریباً برابر است، اما برای سرعت متوسط فن‌ها میزان خطای شبکه‌بندی‌های بیشتر از ۴،۴۵۴،۸۹۶ عدد زیر ۰/۵ درصد است.

باتوجه به جدول ۳ نتایج حاصل از شبکه‌بندی‌هایی با تعداد مختلف آورده شده است. باتوجه به این جدول مشاهده

جدول (۲). مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی مسئله و نتایج مطالعه ملالو عبدالرحمان و همکاران [۹۳].

ساعت	نتایج حاصل از مطالعه ملالو عبدالرحمان و همکاران [۹۳]		نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر		درصد خطا	
	میانگین حجمی دمای هوا بر حسب درجه سانتی‌گراد	میانگین حجمی رطوبت نسبی	میانگین حجمی دمای هوا بر حسب درجه سانتی‌گراد	میانگین حجمی رطوبت نسبی	میانگین حجمی رطوبت نسبی	میانگین حجمی دمای هوا
۱۳	۳۶/۲	۹/۶	۳۴/۷	۱۰/۳	۷/۲	۴/۱
۱۴	۳۳/۳	۱۰/۳	۳۲/۵	۱۰/۷	۴/۳	۲/۴
۱۵	۳۰/۳	۱۲/۴	۲۹/۳	۱۳/۱	۵/۶	۳/۳
۱۶	۲۷/۱	۱۸/۴	۲۶/۴	۱۹/۳	۴/۸	۲/۵

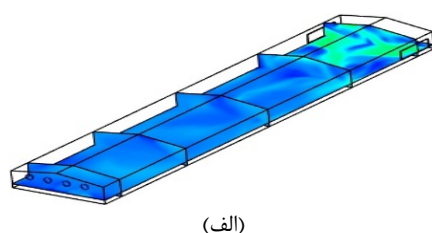
جدول (۳). مقدار متوسط سرعت، دمای متوسط در فن‌ها برای تعداد شبکه بندی مختلف

تعداد المان شبکه	دمای متوسط خروجی از فن‌ها (کلوین)	سرعت متوسط خروجی از فن‌ها (متر بر ثانیه)
۱،۸۳۶،۴۸۳	۳۱۵/۳۲	۲/۸۹
۴،۴۵۴،۸۹۶	۳۱۵/۳۹	۲/۰۰
۵،۳۹۱،۴۴۱	۳۱۵/۴	۲/۰۷
۶،۴۹۴،۴۱۰	۳۱۵/۴۳	۲/۰۵
۸،۹۴۹،۶۵۲	۳۱۵/۴۱	۲/۰۲

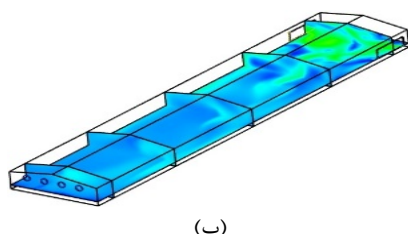
به توضیح است که خطوط یک الی پنج در ارتفاع ۷۰ سانتی‌متری از کف قرار دارند. خط شماره ۱ در مرکز گلخانه و سایر خطوط بافاصله ۲ متری از یکدیگر قرار دارند.

۸- نتایج

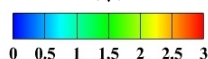
گردش هوا در سالن‌های گلخانه بسیار حائز اهمیت است، تغییرات سرعت در گلخانه باتوجه به فشار فن‌ها، میزان و نحوه تزریق آب در هندسه مسئله متفاوت است. در شکل ۱۰ می‌توان توزیع سرعت در حالتی که هیچ‌گونه تزریق آبی وجود ندارد را در دو حالتی که فشار فن‌ها ۵۰ و ۱۰۰ پاسکال است، مشاهده نمود. این شکل نشان‌دهنده روند تغییرات سرعت باتوجه به فشار ایجاد شده توسط فن‌ها در طول گلخانه می‌باشد. در این دو حالت پاشش آب صورت نگرفته است. در حالتی که هیچ‌گونه رطوبتی به هوا اضافه نمی‌شود، هوای ۳۱۵ کلوین پس از ورود و حرکت به سمت فن‌ها، با اجزاء داخلی گلخانه که دمایی برابر ۳۲۰ کلوین دارند تبادل حرارت داشته و دمای آن افزایش می‌یابد. هرچه سرعت هوا بیشتر باشد، هوا فرصت کمتری برای تبادل حرارت دارد. در حالت 50-A هوا با دمایی بیشتری نسبت به حالت 100-A گلخانه را ترک می‌کند. در شکل ۱۱ می‌توان جانمایی خطوط تغییرات مشخصه‌ها را مشاهده نمود. لازم



(الف)



(ب)



شکل (۱۰). خطوط همتراز مقدار سرعت برای حالت 50-A و حالت 100-A.

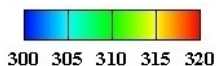
نحوه پاشش آب و همچنین حجم هوای عبوری از گلخانه سه عاملی هستند که در توزیع دمای هوای داخل گلخانه نقش تعیین کننده دارند. باتوجه به جدول شماره ۱ در مرحله اول میزان $0/04$ کیلوگرم بر ثانیه آب توسط پدها و افشانه‌ها به هوای عبوری تزریق و پاشش می‌شود. در شکل ۱۳ می‌توان خطوط هم‌تراز دما در ارتفاع 70 سانتی‌متری از کف گلخانه برای حالتی که تزریق توسط دو پد در ورودی (پنجره‌ها) انجام می‌شود را مشاهده نمود. باتوجه به شکل، هوا پس از ورود و عبور از روی پدها با کاهش ناگهانی دما مواجه شده و با گذر از طول گلخانه با تبادل حرارت با دیوارها با افزایش دما مواجه می‌شود. زمانی که پاشش آب توسط دو افشانه در موقعیت $(0, 30)$ و $(-26, 30)$ صورت می‌گیرد، توزیع دما به‌خوبی استفاده از پدها صورت نمی‌گیرد. در شکل ۱۴ تغییرات دما در حالتی که در مجموع مقدار $0/04$ کیلوگرم بر ثانیه آب از طریق دو افشانه پاشش می‌شود، نشان داده شده است. در این حالت می‌توان مشاهده کرد که با فشار کمتر فن‌ها دما به‌صورت نقطه‌ای کاهش چشمگیری دارد و تا دمای هوا در حالت ورودی کاهش می‌یابد. این امر بدین معناست که هوا در این نقاط به حالت اشباع رسیده (رطوبت نسبی 100 درصد) که حالت مناسبی برای رشد و باروری گیاهان با توجه قارچها و آفت‌ها، نیست.



(الف)



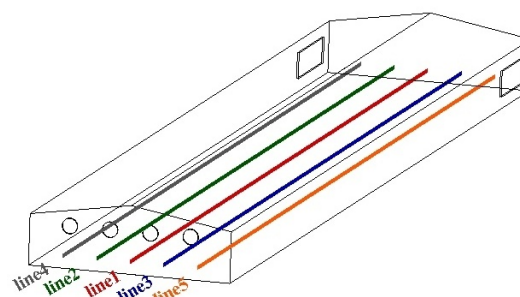
(ب)



شکل (۱۳). خطوط هم‌تراز دما برای رطوبت زنی توسط پد به

میزان $0/04 \text{ kg/s}$ برای حالت‌های: (الف) 50-b-p و (ب) 100-b-p

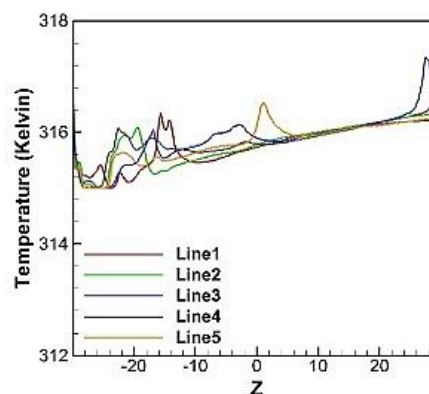
در حالتی که میزان $0/04$ کیلوگرم آب بر ثانیه توسط بیست و هفت افشانه به هوای عبوری به گلخانه پاشش می‌شود، خطوط هم‌تراز دما به صورت شکل ۱۵ می‌باشد. در این حالت هوا به حالت اشباع نرسیده و این موضوع حالت ایده‌آل‌تری نسبت به زمانی که آب توسط دو افشانه پاشش می‌شود، دارد. به منظور بررسی کیفیت هوا، مشخصه دیگری که بسیار حائز اهمیت است، رطوبت موجود در هوا



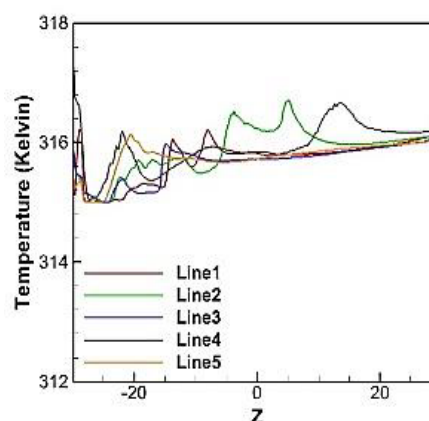
شکل (۱۱). خطوط ۱ الی ۵ به منظور بررسی تغییرات مشخصه‌ها در طول گلخانه و در ارتفاع 70 cm از کف گلخانه

۸-۱- پاشش آب با نرخ $0/04$ کیلوگرم بر ثانیه

در شکل ۱۲ می‌توان تغییرات دما در طول گلخانه، در فشار فن‌های مختلف را مشاهده کرد. با تزریق و پاشش آب توسط پدها و افشانه‌ها، دمای آب به دلیل بالاتر بودن دمای هوا و تبادل حرارت با آن افزایش می‌یابد



(الف)

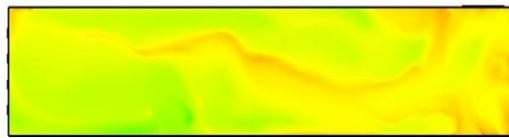


(ب)

شکل (۱۲). تغییرات دما در طول گلخانه در ارتفاع 70 cm از

کف برای حالت‌های: (الف) 50-A و (ب) 100-A

پس از آن در طی یک فرآیند آنتالپی ثابت، تبخیر شده و دمای مجموع هوا و آب تبخیر شده، کاهش می‌یابد. این کاهش دما به دلیل گرمای نهان تبخیر رخ می‌دهد. میزان و



(ب)



شکل (۱۵). خطوط همتراز دما برای رطوبت زنی توسط پد به میزان 0.04 kg/s برای حالت‌های: (الف) 50-b-27f و (ب) 100-b-27f

در حالتی که فشار فن‌ها ۵۰ پاسکال است، به دلیل کمتر بودن شدت آشفتگی جریان، افزایش رطوبت شیب منظم‌تری به خود گرفته است. اما در حالتی که فشار فن‌ها ۱۰۰ پاسکال است، به دلیل وجود گردابه‌های بزرگ و عدم توزیع سرعت یکنواخت این افزایش رطوبت فرم منظمی در جهت‌های Y و X ندارد، از این رو در برخی از خطوط افزایش رطوبت زیاد بوده و در برخی دیگر رطوبت میزان ثابتی دارد.

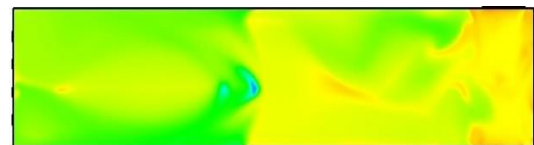
۸-۲- پاشش آب با نرخ 0.08 کیلوگرم بر ثانیه

با افزایش میزان شار جرمی آب تزریق شده به هوای در حال جریان در داخل گلخانه به 0.08 کیلوگرم بر ثانیه، روند تغییرات دما نیز دگرگون می‌شود. در این حالت دمای هوا به میزان بیشتری در نقاط تزریق آب کاهش می‌یابد. از این رو با توجه به افزایش اختلاف دمای بین هوا و دیوارهای گلخانه انتقال حرارت افزایش یافته و منجر به اختلاف دمای بیشتر بین نقاط ابتدایی و انتهایی گلخانه می‌شود. در شکل ۱۷ خطوط همتراز دما در حالتی که تزریق به روش پد رطوبتی می‌باشد، نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که اختلاف دما در ورودی و خروجی نسبت به حالتی که میزان 0.04 کیلوگرم بر ثانیه آب تزریق می‌شود، بیشتر است. از مقایسه شکل ۱۷-الف) و شکل ۱۳-الف) می‌توان به این نکته پی برد، در حالتی که رطوبت زنی به روش پد انجام می‌شود، با افزایش شار جرمی آب با فشار فن یکسان، تغییر محسوسی در دما مشاهده نمی‌شود، چرا که میزان تبخیر آب ثابت است. برای حالت 50-c-f با توجه به اینکه شار جرمی 0.04 کیلوگرم آب بر ثانیه فقط از یک افشانه پاشش می‌شود، در موقعیت‌های نزدیک هر افشانه میزان کاهش دما بیش از حد تعیین شده با توجه به نمودار رطوبت سنجی است. از این رو نتایج حاصل از حل عددی اعتبار کافی را برای حالت 50-c-f ندارد. اما با توجه به شکل ۱۸ می‌توان

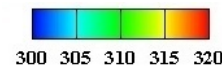
است. در شکل ۱۶ نسبت جرمی آب در طول سالن گلخانه و در ارتفاع ۷۰ سانتی متری از کف گلخانه در ۵ خط نشان داده شده است. در حالتی که تزریق رطوبت توسط پدهای مرطوب انجام می‌شود، پس از ورود هوا رطوبت بسیار سریع افزایش می‌یابد و با پیمودن نیمی از مسیر، نسبت جرمی آب در تمامی مسیر با هم برابر می‌شود. با افزایش فشار فن و به تبع آن افزایش میزان تبخیر آب نسبت رطوبت در خروجی بیشتر می‌شود. در شکل ۱۶ الف) و ب) به ترتیب نسبت رطوبت برای حالت‌های 50-b-p و 100-b-p نشان داده شده است. در حالت‌های 50-b-f و 100-b-f طی دو مرحله افزایش رطوبت رخ می‌دهد. در مرحله اول با توجه به جانمایی افشانه اول در بین دو پنجره، هوا پس از ورود با افزایش رطوبت مواجه می‌شود و پس از پیمودن ۳۰ متر از ابتدای گلخانه با پاشش آب توسط افشانه دوم رطوبت مجدداً به صورت لحظه‌ای افزوده می‌شود. لازم به توضیح است توزیع سرعت نقش بسیار مهمی در توزیع رطوبت در هوا دارد، لذا با توجه سرعت پایین در زیر افشانه دوم در حالت 100-b-f، نسبت جرمی آب افزایش چشمگیری داشته است. با توجه به پاشش آب به میزان $7/40.74$ درصد افشانه‌های دو حالت 50-b-f و 100-b-f توسط بیست و هفت افشانه در حالت‌های 50-b-27f و 100-b-27f، روند افزایش رطوبت بسیار منظم صورت گرفته است.



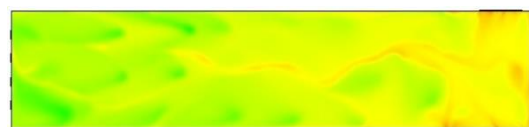
(الف)



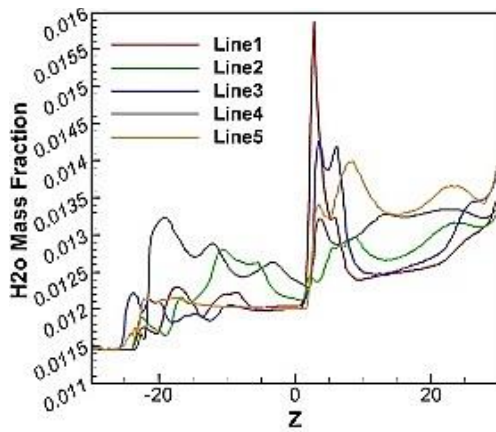
(ب)



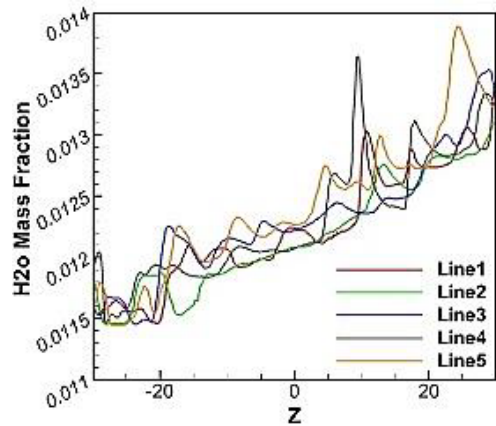
شکل (۱۴). خطوط همتراز دما برای رطوبت زنی توسط ۲ افشانه به میزان 0.04 kg/s برای حالت‌های: (الف) 50-b-f و (ب) 100-b-f



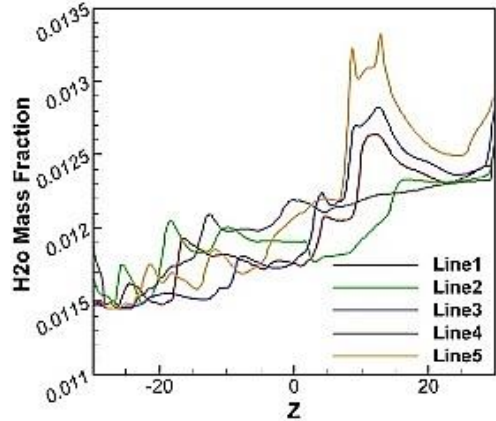
(الف)



(د)



(و)

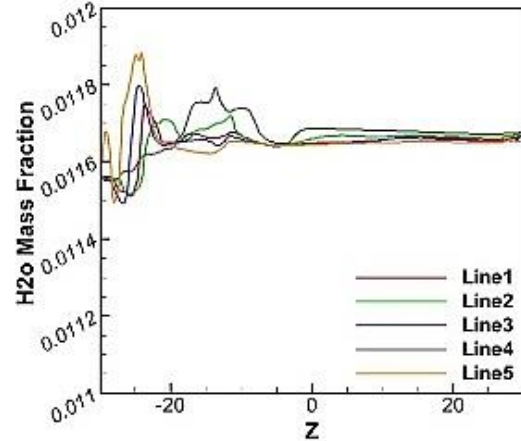


(ه)

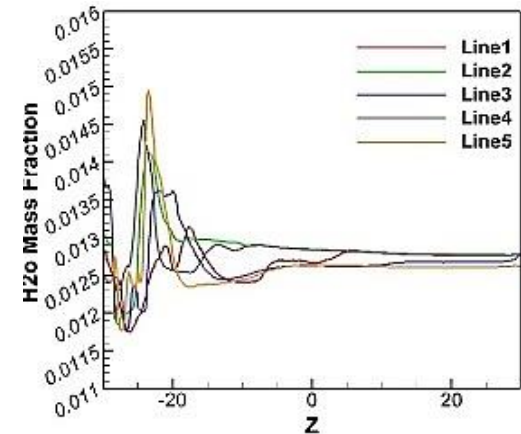
شکل (۱۶). تغییرات نسبت جرمی آب موجود در هوا در طول خط در ارتفاع ۷۰ cm از کف برای حالت‌های: الف) 50-b-p، ب) 100-b-p، ج) 50-b-f، د) 100-b-f، و) 50-b-27f، ه) 100-b-27f

در شکل ۱۹ خطوط هم‌تراز دما برای حالت‌های 50-c-27f و 100-c-27f نشان داده شده است. در حالتی که فن‌ها با فشار کمتر یعنی ۵۰ پاسکال جریان هوا را در گلخانه برقرار می‌کنند، باتوجه به شار جرمی آب‌پاشش شده توسط

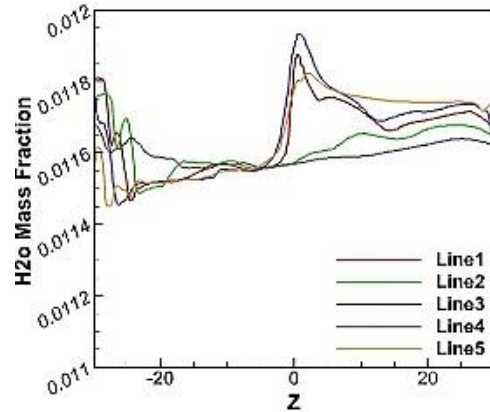
به این نکته پی برد که دمای هوا در این نقاط برابر با دمای هوای تر^۱ در حالت ورودی یعنی ۲۹۸ کلوین است. برای حالت 100-c-f با افزایش شار حجمی هوای عبوری این اتفاق رخ نداده و توزیع دمای بهتری در طول گلخانه نسبت به حالتی که فشار فن‌ها ۵۰ پاسکال است مشاهده می‌شود.



(ف)

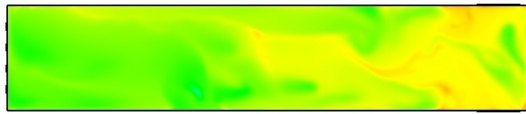


(ب)

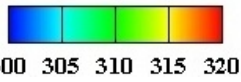


(ج)

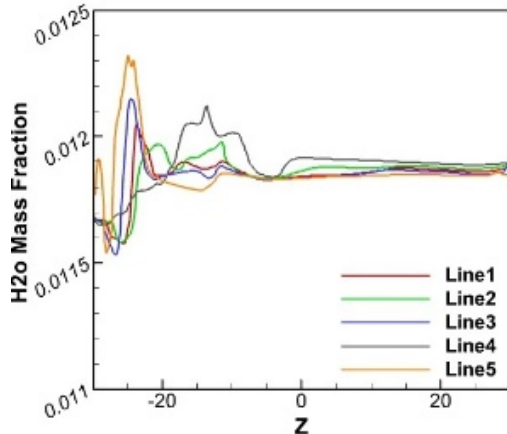
¹ Wet bulb



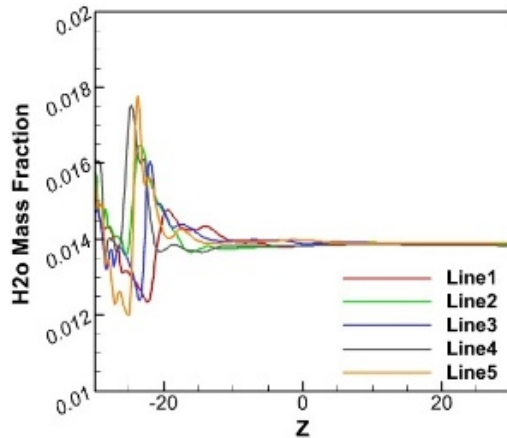
(ب)



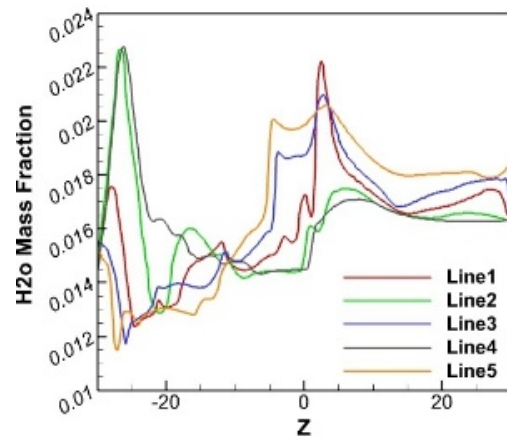
شکل (۱۷). خطوط همتراز دما برای رطوبت زنی توسط پد به میزان 0.108 kg/s برای حالت‌های: (الف) 50-c-27f و (ب) 100-c-27f



(الف)



(ب)



(ج)

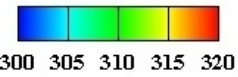
افشانه‌ها توزیع بهتری از دما را می‌توان انتظار داشت. با افزایش فشار فن‌ها شار حجمی هوای در حال عبور از گلخانه افزایش می‌یابد؛ از این رو هوا زمان را برای تبادل حرارت با قطرات آب نداشته و با دمای بیشتری گلخانه را ترک می‌کند.



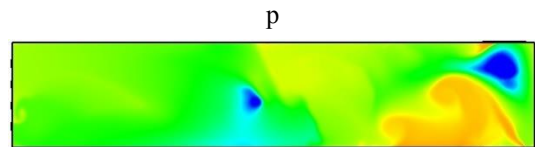
(الف)



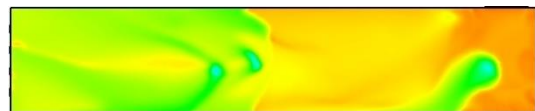
(ب)



شکل (۱۷). خطوط همتراز دما برای رطوبت زنی توسط پد به میزان 0.108 kg/s برای حالت‌های: (الف) 50-c-p و (ب) 100-c-p



(الف)

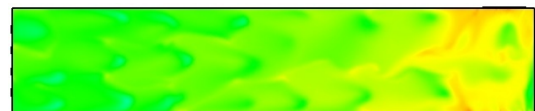


(ب)



شکل (۱۸). خطوط همتراز دما برای رطوبت زنی توسط پد به میزان 0.108 kg/s برای حالت‌های: (الف) 50-c-f و (ب) 100-c-f

شکل ۲۰ نشان دهنده تغییرات نسبت جرمی آب در پنج خط در طول گلخانه می‌باشد. با توجه به نمودار رطوبت نسبی، محدودیت‌هایی را باید برای نسبت جرمی و دما هوا با توجه به حالت اشباع هوا در نظر گرفت. نتایج این تحلیل نشان دهنده آن است که در برخی از حالت‌ها، میزان نسبت جرمی از حالت اشباع هوا بالاتر رفته است. این بدان معناست که در عملا قطرات آب بدون آنکه تبخیر شوند به مسیر خود در جهت جریان هوا ادامه می‌دهند.



(الف)

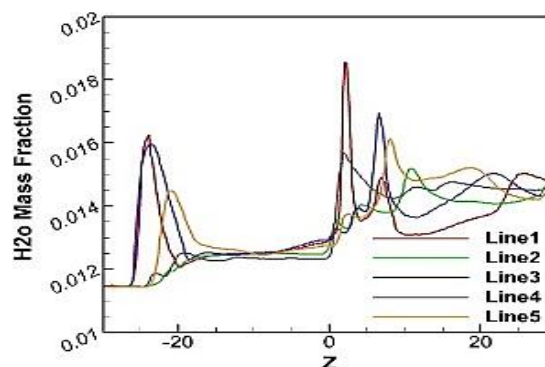
ج) 50-c-f، د) 100-c-f، ه) 50-c-27f، و) 100-c-27f

در حالت 50-c-f باتوجه به شکل ۱۵-الف) و شکل ۱۹-د) در موقعیت افشانه‌ها دما تا زیر ۲۹۰ کلوین کاهش یافته است. در این حالت باتوجه به نمودار رطوبت سنجی نسبت جرمی آب در حالت اشباع در دمای خشک متناظر ۰/۱۲ است، این در حالی است که نسبت جرمی به دست آمده توسط حل عددی ۰/۱۸ افزایش یافته است. در شرایط مشابه برای حالت 100-c-p هوا پس از عبور از روی پدهای رطوبتی در ورودی‌ها تا ۲۹۵ کلوین کاهش می‌یابد و نسبت جرمی آب تا ۰/۱۸ افزایش یافته که همخوانی لازم را با نمودار رطوبت سنجی ندارد. برای حالت‌های 50-c-p و 100-c-f و 50-c-27f و 100-c-27f میزان نسبت جرمی آب و دما با نمودار رطوبت سنجی همخوانی دارد.

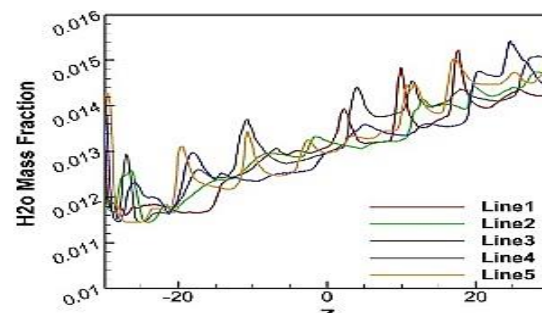
۸-۳- گیاهان قابل کشت در شرایط آب و هوایی

گلخانه مورد مطالعه

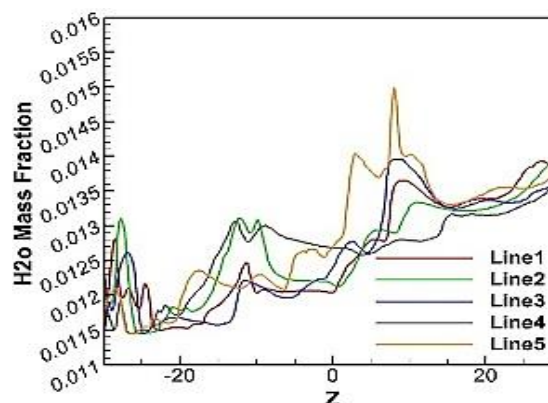
باتوجه به شکل ۱۶-ب) که نتیجه حاصل از شبیه‌سازی میدان جریان و دمای گلخانه را نشان می‌دهد و باتوجه به محدوده دمایی به دست آمده، مدل 100-c-p مناسب‌ترین شرایط را جهت کشت محصولات گلخانه‌ای دارد. از این جهت تعدادی از گیاهان قابل کشت در شرایط دمایی غالب حاصل از این حالت جهت بهره‌برداری در کاربری‌های کشاورزی، در جدول ۵ آورده شده است.



(د)



(و)



(ز)

شکل (۲۰). تغییرات نسبت جرمی آب موجود در هوا در طول ۵ خط در ارتفاع ۷۰ cm از کف برای حالت‌های: الف) 50-c-p، ب) 100-c-p،

جدول (۴). برخی از گیاهان قابل کشت در شرایط آب و هوایی گلخانه مورد مطالعه در حالت 100-c-p

نوع گیاه	مرحله کشت	محدوده دمایی غالب به دست آمده از شبیه‌سازی جریان بر حسب کلوین	محدوده دمایی مناسب پرورش گیاه بر حسب کلوین
کاکتوس	رشد	۳۱۳-۳۰۰	۳۱۵/۱-۲۹۴/۱
گلایل			۳۱۳/۱-۲۸۴/۱
شفلرا			۳۱۴/۱-۲۸۳/۱

- pp. 2386–2414, 2007, doi: 10.1016/j.biortech.2006.11.025.
2. K. Chourasia and T. K. Goswami, "CFD simulation of effects of operating parameters and product on heat transfer and moisture loss in the stack of bagged potatoes," *J. Food Eng.*, vol. 80, no. 3, pp. 947–960, 2007, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.07.015.
 3. He et al., "Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 149, no. March, pp. 16–25, 2018, doi: 10.1016/j.compag.2017.10.001.
 4. woo Kim, S. woon Hong, I. bok Lee, and K. seok Kwon, "Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique, Part 2: Application of the CFD model," *Biosyst. Eng.*, vol. 164, pp. 257–280, 2017, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.09.011.
 5. woo Kim, I. bok Lee, and K. seok Kwon, "Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique, Part 1: Development of the CFD model," *Biosyst. Eng.*, vol. 164, pp. 235–256, 2017, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.09.008.
 6. W. Hong et al., "Validation of an open source CFD code to simulate natural ventilation for agricultural buildings," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 138, pp. 80–91, 2017, doi: 10.1016/j.compag.2017.03.022.
 7. Xie, X. H. Qu, J. Y. Shi, and D. W. Sun, "Effects of design parameters on flow and temperature fields of a cold store by CFD simulation," *J. Food Eng.*, vol. 77, no. 2, pp. 355–363, 2006, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.06.044.
 8. E. Bournet and T. Boulard, "Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 74, no. 2, pp. 195–217, 2010, doi: 10.1016/j.compag.2010.08.007.
 9. Saberian and S. M. Sajadiye, "The effect of dynamic solar heat load on the greenhouse microclimate using CFD simulation," *Renew. Energy*, vol. 138, pp. 722–737, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.01.108.
 10. Dhiman, V. P. Sethi, B. Singh, and A. Sharma, "CFD analysis of greenhouse heating using flue gas and hot water heat sink pipe networks," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 163, no. June, p. 104853, 2019, doi: 10.1016/j.compag.2019.104853.
 11. Pakari and S. Ghani, "Airflow assessment in a naturally ventilated greenhouse equipped with wind towers: numerical simulation and wind tunnel experiments," *Energy Build.*, vol. 199, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.06.033.
 12. Pakari and S. Ghani, "Evaluation of a novel greenhouse design for reduced cooling loads during the hot season in subtropical regions," *Sol. Energy*, vol. 181, no. February, pp. 234–242, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.02.006.
 13. A. Villagrán, E. J. Baeza Romero, and C. R. Bojacá, "Transient CFD analysis of the natural ventilation of three types of greenhouses used for agricultural production in a tropical mountain

۹- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر رفتار جریان هوا در ۱۴ حالت که با توجه به فشار فن‌ها، نحوه تزریق و شار جرمی آب نام گذاری شده، بررسی شده‌اند. هر حالت مزایا و معایبی را برای تهویه، شرایط نگهداری گیاهان و عوامل اقتصادی گلخانه دارد. حالت بهینه حالتی است که با پاشش کمترین آب و هزینه کمترین انرژی الکتریکی در فن‌ها و پمپ‌های افشانه، به ایده‌آل ترین شرایط لازم برای رشد و باروری گیاهان در گلخانه دست پیدا کرد. با توجه به نتایج حاصل شده، در حالتی که از پدهای رطوبتی استفاده می‌شود، افزایش شار جرمی آب تزریق شده به تنهایی تأثیر چندانی در کاهش دمای داخلی گلخانه ندارد، از این رو باید فشار فن‌ها را افزایش داد. از طرفی در سیستم‌های پد و فن سیستم پمپاژ آب با فشار بالا لازم نیست. در حالتی که از افشانه‌ها با تعداد کم استفاده می‌شود، توزیع نامتناسبی از دما در طول و عرض گلخانه اتفاق می‌افتد. به منظور بهبود این رویه، بهتر است فشار در فن‌ها افزایش یابد و این بدین معناست که در این حالت علاوه بر هدر رفت بالای آب، انرژی الکتریکی بالایی جهت فن‌ها و پمپ صرف خواهد شد. از طرفی پاشش بیش از حد آب در یک نقطه منجر به افزایش رطوبت نسبی هوا در آن نقطه و کاهش کیفیت شاخصه‌های رشد و باروری گیاهان می‌شود. با افزایش تعداد افشانه‌ها نقاط ضعف دو حالت قبلی مرتفع می‌شود. با توجه به نتایج می‌توان مشاهده کرد که در این حالت با افزایش فشار فن، دما به خوبی توزیع نشده و با شار حجمی کمتر هوا توزیع دمای بهتری اتفاق می‌افتد. از طرفی می‌توان با تعریف مقادیر مختلف شار جرمی آب در هر افشانه به مقدار بهینه در مصرف آب و انرژی صرف شده جهت پمپاژ آب دست یافت. در نهایت و بر اساس مطالعه صورت گرفته پیرامون مدل‌های مختلف مطرح شده در این پژوهش، مدل 100-c-p، مناسب‌ترین شرایط از جهت مقدار دما را برای کشت گیاهانی چون گلابیل، شفلرا و کاکتوس دارد.

۱۰- مراجع

1. Norton, D. W. Sun, J. Grant, R. Fallon, and V. Dodd, "Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review," *Bioresour. Technol.*, vol. 98, no. 12,

- AIAA J., vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994, doi: 10.2514/3.12149.
27. Mathala J. Gupta, Pitam Chandra, "Effect of greenhouse design parameters on conservation of energy for greenhouse environmental control," *Energy*. No. 27, pp. 777–794, 2002, doi: 10.1016/S0360-5442(02)00030-0.
 28. Shahryari, " Numerical Simulation of Air Flow in an Agricultural Greenhouse and Studying the Effects of Temperature and Humidity Variations on Increasing the Quality of Plant Growth Indicators Using Computational Fluid Dynamics", M,Sc, Thesis in Mechanical Engineering, University of Qom, 2020.
 29. Moayyedi, M. K., Bashardust, A. "Numerical Simulation of Airflow and Particle Deposition from the Surface of Raw Materials Piles and Studying the Effects of Shape Variations and Free-Stream Velocity in Wind Erosion Reduction," *Civil Infrastructure Researches*, Vol. 5, No.1, pp.121-134, 2019, doi: 10.22091/cer.2019.4211.1143
 30. Cengel and C. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach (Fifth Edition)*, McGraw-Hill, New York, 2006.
 31. Abderrahman, M., Abdelaziz, B., & Abdelkader, O. (2021, September). CFD Modeling of An Even-Span Greenhouse Dryer Under Natural and Forced Convection Modes," *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2022, No. 1, pp. 12-30), 2021.
 14. Ghani et al., "Experimental and numerical investigation of the thermal performance of evaporative cooled greenhouses in hot and arid climates," *Sci. Technol. Built Environ.*, vol. 26, no. 2, pp. 141–160, 2020, doi: 10.1080/23744731.2019.1634421.
 15. A. Sapounas, T. Bartzanas, C. Nikita-Martzopoulou, and C. Kittas, "Aspects of CFD modelling of a fan and pad evaporative cooling system in greenhouses," *Int. J. Vent.*, vol. 6, no. 4, pp. 379–388, 2008, doi: 10.1080/14733315.2008.11683793.
 16. A. Sapounas, S. Hemming, H. F. De Zwart, and J. B. Campen, "Influence of Insect Nets and Thermal Screens on Climate Conditions of Commercial Scale Greenhouses: a Cfd Approach," *XVIIth World Congr. Int. Comm. Agric. Biosyst. Eng.*, pp. 1–11, 2010.
 17. Bartzanas, T. Boulard, and C. Kittas, "Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse," *Biosyst. Eng.*, vol. 88, no. 4, pp. 479–490, 2004, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2003.10.006.
 18. Piscia, J. I. Montero, E. Baeza, and B. J. Bailey, "A CFD greenhouse night-time condensation model," *Biosyst. Eng.*, vol. 111, no. 2, pp. 141–154, 2012, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2011.11.006.
 19. Zhang, Z. Fu, M. Yang, X. Liu, Y. Dong, and X. Li, "Nonlinear simulation for coupling modeling of air humidity and vent opening in Chinese solar greenhouse based on CFD," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 162, no. April, pp. 337–347, 2019, doi: 10.1016/j.compag.2019.04.024.
 20. W. Wang, J. Y. Luo, and X. P. Li, "CFD based study of heterogeneous microclimate in a typical chinese greenhouse in central China," *J. Integr. Agric.*, vol. 12, no. 5, pp. 914–923, 2013, doi: 10.1016/S2095-3119(13)60309-3.
 21. B. Campen and G. P. A. Bot, "Dehumidification in greenhouses by condensation on finned pipes," *Biosyst. Eng.*, vol. 82, no. 2, pp. 177–185, 2002, doi: 10.1006/bioe.2002.0058.
 22. Franco, D. L. Valera, A. Peña, and A. M. Pérez, "Aerodynamic analysis and CFD simulation of several cellulose evaporative cooling pads used in Mediterranean greenhouses," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 76, no. 2, pp. 218–230, 2011, doi: 10.1016/j.compag.2011.01.019.
 23. Chen, Y. Cai, F. Xu, H. Hu, and Q. Ai, "Analysis and optimization of the fan-pad evaporative cooling system for greenhouse based on CFD," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 2014, doi: 10.1155/2014/712740.
 24. W. Kim, I. B. Lee, and K.S. Kwon, "Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique, Part 1: Development of the CFD model," *Biosystems Engineering*, Vol. 164, pp. 235-256, 2017.
 25. Cengel and C. Boles, "Thermodynamics: an engineering approach," 2544.
 26. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications"