

## بررسی تجربی و شبیه‌سازی وقوع سرمازدگی تشعشی به روش دینامیک سیالات محاسباتی

پیمان خرم‌شکوه<sup>۱\*</sup>، مهدی کسرای<sup>۲</sup>، سیدمهدی نصیری<sup>۳</sup>، محمد اسلامی<sup>۴</sup> و محمدامین نعمت‌الهی<sup>۵</sup>

۱، ۲، ۳ و ۵- به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ استادیار؛ و دانشیار بخش مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران  
۴- استادیار بخش مهندسی انرژی و هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱/۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۲۴

### چکیده

سرمازدگی یکی از مهم‌ترین عوامل بروز خسارت به محصولات باغی شناخته می‌شود. سرمازدگی تشعشی ناشی از پدیده وارونگی دمایی است. هدف از این پژوهش، بررسی تجربی شرایط وارونگی دمایی و رهیافت کاهش اثر سوء سرمازدگی تشعشی در مزرعه است. به این منظور با توجه به داده‌های هواشناسی بهار ۹۶ در شب‌هایی که احتمال سرمازدگی بود، دمای محیط و سرعت باد به صورت میدانی در سطح یک باغ هشت هکتاری واقع در منطقه کودیان واقع در ۴۰ کیلومتری شهر شیراز اندازه‌گیری شد. با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی در قالب نرم‌افزار FLUENT نحوه انتقال گرما و توزیع گرما برحسب زمان و ارتفاع از سطح زمین در شرایط ناپایدار در حین وقوع سرمازدگی شبیه‌سازی شد. نتایج بررسی مدل عددی بر اساس داده‌های حاصل از پایش مزرعه‌ای نشان داد بین داده‌های تجربی و داده‌های تحلیلی همبستگی قوی وجود دارد. نتایج بررسی‌ها همچنین نشان داد اوج شدت سرمازدگی در ساعات پیش از طلوع آفتاب است و وزش باد می‌تواند اثر زیادی در جلوگیری از افت ناگهانی دما و سرمازدگی محصولات داشته باشد.

### واژه‌های کلیدی

توزیع حرارت، خسارت محصولات باغی، مدل‌سازی سیالات، یخبندان

### مقدمه

جبهه سرد ممکن است تا چند روز در منطقه حاکم باشد، اما به دلیل آنکه در زمستان حساسیت گیاهان به سرمازدگی کمتر است این پدیده، نسبت به نوع تشعشی، خسارت‌های کمتری به بار می‌آورد (Seif & Razavi, 2006). در سرمازدگی تشعشی، زمین در روز انرژی خورشید را از امواج کوتاه دریافت می‌کند که در نتیجه آن دمای هوا و دمای سطح خاک افزایش می‌یابد و در هنگام شب این انرژی با طول موج بلند از زمین به فضا برگردانده می‌شود. در نتیجه این عمل، سطح خاک سرد می‌شود و هوایی

سرمازدگی در بسیاری از مناطق جنوب کشور از مهم‌ترین عوامل بروز خسارت و از بین رفتن محصولات به ویژه محصولات باغی است که تا کنون مطالعات کافی در باره این موضوع مهم صورت نگرفته است. سرمازدگی به دو صورت جبهه‌ای<sup>۱</sup> و تشعشی<sup>۲</sup> به ترتیب اغلب در زمستان و بهار رخ می‌دهد. سرمازدگی جبهه‌ای با سرد شدن هوای اطراف سطح زمین پس از عبور جبهه سرد و یا نفوذ توده هوای سرد و استقرار آن در منطقه رخ می‌دهد.

گرفته‌اند مخرب‌تر از ذرات ریز بلوری عمل می‌کنند (Levitt, 1980).

الگاس و فیتزнер (Ellgas & Pfitzner, 2007) یک مدل سه بعدی بر پایهٔ یک کد تجاری CFD برای حالت تشکیل یخ‌زدگی روی یک سطح سرد ارائه کردند. نحوهٔ کار بر اساس تفاوت در هندسهٔ قطعات یخ بود به نحوی که مدل بتواند بر اساس دما، هندسه و انتقال جرم شکل گرفته حین تبدیل بخار آب به بلورهای یخ، پیش بینی دقیقی از زمان و شدت یخ‌زدگی ارائه دهد. حداکثر انحراف نتایج بین داده‌های تجربی و خروجی مدل ۲۰ درصد به دست آمد. ریبریو و همکاران (Ribeiro *et al.*, 2006) اثر وزش باد بر محافظت از سرمازدگی باغ سیب بررسی کردند. این محققان در ۱۱ شب وقوع سرمازدگی طی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۰ در شرایطی که آسمان صاف و سرعت وزش باد بین ۰/۵۸ تا ۱/۹۲ متر بر ثانیه بود، به بررسی اثر باد بر دما در ارتفاع ۱/۵ تا ۱۵ متری از سطح زمین پرداختند. نتایج بررسی‌های این محققان نشان داد با وجود آنکه شدت سرمازدگی به عوامل مختلف بستگی دارد، به محض آغاز به کار ماشین تولید باد، دمای محیط تحت اثر کارکرد دستگاه بین ۰/۳ تا ۱ درجه سلسیوس در هر ۱/۵ متر ارتفاع افزایش و آسیب به شکوفه‌ها تا ۴۵ درصد کاهش می‌یابد.

در تحلیل و شبیه‌سازی شرایط مختلف سرمازدگی، دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> ابزاری پیشرفته و پرکاربرد است. در این روش، با تکیه بر محاسبات رایانه‌ای و ریاضیات کاربردی می‌توان چگونگی جریان سیال، انتقال جرم، انتقال حرارت را تحلیل کرد و با کمک آن بهینه‌سازی در فرآیندهای مرتبط با سرمازدگی را پیش برد (Xia & Sun, 2002). تضمین موفقیت در این روش به میزان

که با آن در تماس است نیز به تدریج سردتر خواهد شد. در روز، آسمان اگر پوشیده از ابر و مه یا دود غلیظ باشد و در شب صاف گردد امکان رخداد وارونگی دمایی و سرمازدگی تشعشعی زیاد است (SYNDER & MELO-ABREU, 2005). در این شرایط، اگر دمای روز قبل به طور نسبی پایین باشد، دمای حداقل می‌تواند به چندین درجه زیر صفر برسد و در نتیجه وارونگی<sup>۱</sup> دمایی رخ می‌دهد. در شرایط عادی، با افزایش ارتفاع از سطح زمین دمای هوا کاهش می‌یابد اما گرمای تشعشع یافته از سطح زمین در پی سرمازدگی تشعشعی سبب برعکس شدن این روند در نزدیکی سطح زمین خواهد شد به طوری که در شب‌هایی که سرمازدگی تشعشعی رخ می‌دهد هوای سطح زمین سردتر خواهد شد و با افزایش ارتفاع گرم‌تر می‌شود. این وضعیت به ویژه در بهار قابل توجه است و می‌تواند منجر به بروز خسارت فراوان به محصول شود (Seif & Razavi, 2006; Van Ruth & Kartz, 2018).

سرمازدگی تشعشعی باعث افت ناگهانی دما، تشکیل بلورهای یخ و تخریب اندام‌های گیاه می‌شود و می‌تواند در چند ساعت باعث نابودی بسیاری از شکوفه‌های درختان یا تمام آنها شود (Rosenberg *et al.*, 1983). در سرمازدگی تشعشعی، میزان کاهش دما به حدی است که هسته‌های یخ در فضای بین سلولی شروع به رشد می‌کنند (Pelletier *et al.*, 2017). با رشد این هسته‌ها و تبدیل آنها به بلورهای درشت، بافت‌های گیاهی آسیب شدید می‌بینند و می‌پلاسند که در این صورت تجدید حیات اندام‌های آسیب‌دیده ممکن نیست و گیاه نابود می‌شود (Telepenko, 2018). سرعت واکنش به دماهای کم در مقدار خسارت وارد شده به گیاه موثر است به طوری که بلورهای بزرگ یخ که سریع شکل

داده‌های آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد بین نتایج شبیه‌سازی شده و داده‌های آزمایشگاهی همبستگی خوبی وجود دارد (Mardkheh *et al.*, 2016).

در پژوهش حاضر، پدیده سرمازدگی تشعشعی به منظور شناخت راهکارهای کاهش خسارت‌های ناشی از آن، شبیه‌سازی گردید. برای این منظور از روش دینامیک سیالات محاسباتی استفاده و پارامترهای مرتبط با شدت آن، مانند ساعت وقوع و سرعت باد بررسی شد.

### مواد و روش‌ها

#### مکان و تجهیزات

این تحقیق در یک باغ سیب واقع در منطقه کودیان با طول جغرافیایی  $12^{\circ}$  و  $52^{\circ}$  و عرض جغرافیایی  $50^{\circ}$  و  $29^{\circ}$  اجرا شد. کودیان یکی از مناطق سردسیر و مستعد سرمازدگی در  $40$  کیلومتری شمال غرب شهر شیراز است. این منطقه اغلب زیر کشت محصولات باغی چون سیب و هلو قرار دارد و همه ساله مواجه با سرمازدگی بهاره است. انتخاب باغ سیب به دلیل زمان شکوفه‌دهی درخت سیب در بهار از این رو با اهمیت است که در سراسر دوران جوانه‌زنی شکوفه تا شکل‌گیری میوه، سرمازدگی و کاهش دما حتی برای چند ساعت می‌تواند به نابودی شکوفه و در نتیجه از بین رفتن محصول آینده بینجامد (Synder & Melo, 2005). درخت سیب موجود در باغ از نژاد گلاب کوهانز<sup>۲</sup> بود که زمان شکوفه‌دهی آن در اواسط فروردین است. برای ثبت و پایش فراسنجه‌های مختلف، یک ایستگاه سینوپتیک با همکاری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس در باغ احداث شد که در شکل ۱ نشان داده

تطابق صحیح داده‌های عددی شبیه‌سازی شده با داده‌های حاصل از آزمون‌های تجربی بستگی دارد (Sethian, 1993). دینامیک سیالات محاسباتی این امکان را می‌دهد تا مکانیک سیالات و تأثیر آن در زمینه‌های مختلف کشاورزی را عمیق‌تر ارزیابی کنیم. بیشتر نتایج حاصل از این روش در کشاورزی سبب افزایش تولید محصول شده است (Bakker *et al.*, 2001). در بررسی سیستم‌های پیچیده سیالاتی، به کارگیری روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی باعث شده است که برخی از هزینه‌های آزمایشگاهی به‌شکلی چشم‌گیر کاهش یابد یا حتی حذف شود (Norton *et al.*, 2007).

مدل‌سازی در شرایطی که داده‌های تجربی از شرایط واقعی، و نه آزمایشگاهی، گرفته شده باشند اهمیت بالایی دارد. داده‌های تجربی حاصل از آزمون‌ها، حتی اگر از مشاهدات و تکرارهای محدود یا در شرایط جوی متغییر گرفته شده باشند، همواره نتایج واقعی در نظر گرفته می‌شوند (Riddle *et al.*, 2004).

دینامیک سیالات محاسباتی رفتار جریان را پیش‌بینی می‌کند، بنابراین با تغییر متغیرهای هندسی یا فیزیکی می‌توان نتایج را به راحتی و در مدت زمانی کوتاه بدون ساخت سیستم یا دستگاه‌های نمونه‌برداری پیش‌بینی کرد. به طور کلی، به کمک دینامیک سیالات محاسباتی و با دوراندیشی دقیق‌تر می‌توان سریع‌تر و بهتر طراحی کرد (Wang & Rong, 2012). در تحقیقی به روش دینامیک سیالات محاسباتی، یک مبدل حرارتی زمین به هوا در گلخانه و در شرایط مختلف سرعت جریان هوا شبیه‌سازی شد. پژوهشگران از نرم‌افزار فلونت<sup>۱</sup> برای گسسته‌سازی و حل معادلات حاکم بر شرایط مسئله استفاده و مدل عددی را بر اساس

شده است. با استفاده از این ایستگاه، فراسنجه‌های دما و رطوبت هوا، دما و رطوبت خاک، شدت تابش خورشید و سرعت و جهت وزش باد اندازه‌گیری شد. در جدول ۱، ابزارهای مورد استفاده گزارش شده است. برای کالیبراسیون حسگرها از دستگاه Testo625 بهره‌گیری شد.

جدول ۱- ابزارهای استفاده شده

Table1- Instruments					
Country	Company	Range	Accuracy	Type	Tool
کشور سازنده	شرکت سازنده	دامنه	صحت	نوع ابزار	نام ابزار
China	Nagano	-200 / +400	$\pm 0.1c^{\circ}$	RTD-PT100	Temp sensor حسگر دمایی
China	Sentek	0 - 80	$\pm 1\%$	TDR100	Soil moisture sensor حسگر رطوبت خاک
China	Nagona	0 - 100	$\pm 2\%$	DHT22	Air moisture sensor حسگر رطوبت هوا
Taiwan	Lutron	0 - 40	$\pm 0.1 m.s^{-1}$	AM-4206	Aneometer سرعت سنج باد
Taiwan	TES	0 - 2000	$\pm 2 W m^{-2}$	TES-1333	Radiometer تابش سنج



شکل ۱- ایستگاه سینوپتیک نصب شده در باغ

Fig. 1- Synoptic station in the garden

## روش آزمون

چهار ارتفاع صفر، ۴، ۸ و ۱۲ متر از سطح زمین روی دکل نصب شد. سرمازدگی با توجه به سوابق هواشناسی در آن منطقه چهار یا شش بار و از اواخر اسفند تا نیمه دوم اردیبهشت رخ می‌دهد که با توجه به پیش‌بینی‌ها، دما و وضعیت جوی در سراسر شبانه‌روز کنترل می‌شد. از شش شب مورد انتظار، افت دما و رخداد وارونگی در تاریخ‌های ۱۳۹۵/۱۲/۲۶، ۱۳۹۶/۱/۵، ۱۳۹۶/۱/۱۶ و

برای مشاهده و اثبات وقوع سرمازدگی تشعشی نیاز به اندازه‌گیری و ثبت شرایط دمایی در ارتفاع‌های مختلف از سطح زمین بود. بیشترین تغییرات دمایی طی سرمازدگی معمولاً در لایه ۱۵ متری از سطح زمین به وجود می‌آید (Synder & Melo-Abreu, 2005). برای این منظور، یک دکل به ارتفاع ۱۲ متر (شکل ۲) ساخته و حسگرهای دما در

آماري داده‌های این آزمایش از نمایه‌های آماری میانگین خطای صحت<sup>۱</sup> (رابطه ۱)، درصد خطای نسبی، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> (رابطه ۲) و شاخص توافق ویلموت<sup>۳</sup> (رابطه ۳)، به دست می‌آیند.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n} \quad (1)$$

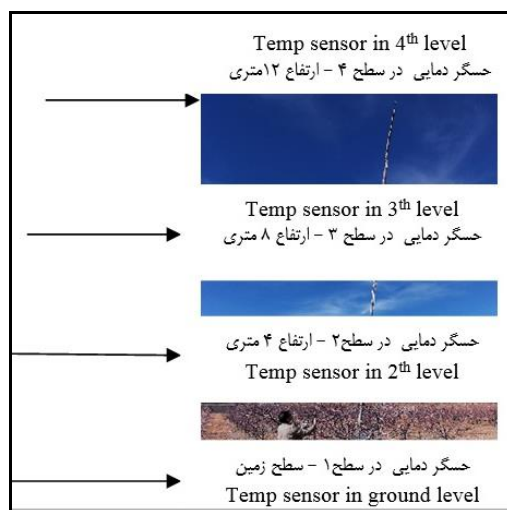
$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}|) + (|y_i - \bar{x}|)^2} \right] \quad (3)$$

که در آنها،

$y_i$  = مقادیر شبیه‌سازی؛  $x_i$  = مقادیر تجربی؛ و  $n$  = تعداد داده‌های تجربی (Savage, 1993).

۱۳۹۶/۱/۲۵ محسوس‌تر بود. شب‌ها زمان بحرانی در سرمازدگی است و به همین دلیل بازه زمانی شب تا طلوع آفتاب برای اندازه‌گیری و شبیه‌سازی انتخاب شد. دو عامل دما بر حسب ارتفاع و سرعت باد برای تاریخ‌های ذکر شده به صورت عملی با فاصله زمانی یک ساعت، اندازه‌گیری شد. با توجه به داده‌های ثبت شده در تاریخ ۱۳۹۶/۱/۲۵ که افت دما محسوس بود و دما به زیر حد بحرانی تحمل گیاه رسید و هم‌زمانی آن با شکوفه‌دهی درختان این پدیده بر اساس داده‌های این تاریخ با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه‌سازی شد. برای تحلیل نتایج که شامل چهار سطح ارتفاع و زمان‌های داده‌برداری بود، مقدار تطبیق هر داده شبیه‌سازی با داده تجربی برای هر ساعت از بازه زمانی اندازه‌گیری و در ارتفاع‌های مورد نظر مشخص شد. در تحلیل



شکل ۲- دکل حامل حسگرهای دمایی  
Fig. 2- Temperature sensor tower

مومنتموم (رابطه ۵) و قانون بقای انرژی (رابطه ۶) (Seo et al., 2009; Mostafa et al., 2013) شرایط حاکم بر فرآیند سرمازدگی تشعشعی به گونه‌ای است که معادله‌های پیوستگی، مومنتموم و انتقال حرارت

روش دینامیک سیالات محاسباتی و معادله‌های حاکم بر مسئله

در دینامیک سیالات محاسباتی از سه قانون اصلی برای توصیف پدیده‌های سیالاتی استفاده می‌شود: قانون بقای جرم (رابطه ۴)، قانون بقای

1- Mean Bias Error  
3- Willmott agreement index

2- Root Mean Square Error

اندازه حرکت یا قانون دوم نیوتون را نیز درباره آن بیان کرد. قانون دوم نیوتن می‌گوید برآیند نیروهای وارد شده بر هر جسم برابر است با تغییرات مومنتوم که در رابطه ۵ آورده شده است. همچنین، توزیع دمای ناشی از انتقال حرارت جابه‌جایی در لایه هوای سرد از طریق معادله انرژی در رابطه ۶ تعیین می‌شود:

$$\begin{aligned} X \text{ Direction } \rightarrow \frac{\partial u}{\partial t} + \left[ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \\ y \text{ Direction } \rightarrow \frac{\partial v}{\partial t} + \left[ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \\ &+ g\beta(T - T_\infty) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left[ u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \alpha \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + S \quad (6)$$

حرارت تشعشی نیز از همین مدل استفاده شد. این مدل، معادله انتقال حرارت تشعشی را برای زاویه‌های برداری عمودی حل می‌کند که با توجه به هندسه مسئله بهترین مدل قابل استفاده است (Velure, 2014) و با رابطه ۷ نشان داده می‌شود.

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an \frac{2\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (7)$$

#### مدل‌سازی وقوع سرمازدگی

به منظور تحلیل دینامیکی مسأله، از نرم‌افزار ANSYS framework (version 18.2) workbench 3.1 استفاده شد. فلوننت به کاربر اجازه بهبود شبکه را می‌دهد که شامل ریز کردن، درشت کردن یا رشد شبکه در مرزهاست (Murakami, 2006). برای مش‌بندی و بلوک‌بندی با نرم‌افزار ICME از زیر مجموعه انسیس استفاده شد. فایل

تشعشی بر مسئله موثر است و باید حل شود. اصلی که از آن در مکانیک سیالات استفاده می‌شود اصل بقای جرم است.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

مکانیک سیالات تنها با داشتن معادله G پیوستگی مشخص نمی‌شود بلکه باید اصل بقای

در رابطه ۶، خواص ترموفیزیکی ثابت است و از ترم اتلاف اصطکاکی به دلیل کم بودن سرعت صرف نظر شده است. همچنین، S، ترم مربوط به منبع ورودی است (تشعشع‌های جذب و ساطع شده) که به کمک معادله بردار قائم گسسته محاسبه می‌شود. برای محاسبه اثر انتقال

که در آنها،

$t =$  زمان؛  $u$  و  $v$  و  $w =$  اجزای میدان سرعت در راستای  $x$  و  $y$  و  $z$ ؛  $\beta =$  ضریب حجمی انبساط حرارت؛  $U =$  لزوجت؛  $P =$  فشار ثابت (Pa)؛  $S =$  منبع حرارتی؛  $\rho =$  چگالی ( $\text{Kg m}^{-3}$ )؛  $g =$  شتاب گرانش؛  $r =$  بردارهای یکه؛  $n =$  شاخص انکسار نور؛  $\Phi =$  توابع فازی نور؛ و  $\Omega' =$  زاویه جامد کروی حرکت خورشید.

به مرزها و همچنین به دلیل بزرگ بودن مقیاس مسئله (۱۲۰ متر مربع در مدل‌سازی) مکانیزم غالب در مسئله، انتقال حرارت به صورت تشعشعی بوده و اثرهای اغتشاشی، ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن بودند بنابراین در شبیه‌سازی، حالت ناپایدار و از آنجا که شرایط بدون باد و ساکن بود مدل با جریان آرام انتخاب شد (Xia & Sun, 2002).

با توجه به اینکه در مسئله چگالی را ثابت فرض کردیم، معادله پیوستگی برای حالت تراکم‌ناپذیر صادق است. و به همین دلیل در معادله مومنتوم، دما و ترم شناوری و توزیع فشار هیدرواستاتیک با استفاده از فرضیه بوزینسکا<sup>۱</sup> اعمال شد؛ همچنین با توجه به اثر انتقال حرارت تشعشعی بر مسئله برای حل این قسمت مدل بردار قائم به کار رفت (Norton *et al.*, 2007). جدول ۲، مشخصات مربوط به هندسه و فراسنجه‌های استفاده شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

ورودی به نرم‌افزار فلوننت انتقال داده شد. بنابراین پس از شبکه‌بندی و اعمال شرایط مرزی، مسئله مورد تحلیل قرار گرفت. در حل مسائل به روش دینامیک سیال محاسباتی اعمال صحیح و نزدیک به واقعیت شرایط مرزی تاثیر بسزایی در شباهت نتایج با داده‌های تجربی دارد (Norton *et al.*, 2007). هندسه مسئله به صورت یک برش دو بعدی از فضای با عرض ۱۰ متر و ارتفاع ۱۲ متر در نظر گرفته شد. در هنگام وقوع سرمازدگی داده‌های تجربی از این قرار بود: آسمان صاف و وزش باد بسیار کم یا نزدیک به صفر. در ابتدا مسئله با مدل جریان مغشوش حل گردید اما نتایج به دست آمده با نتایج تجربی تفاوتی واضح داشت. با حل جریان آرام نتایج عددی به نتایج تجربی نزدیک شد. در تحلیل دلایل این موضوع به نظر می‌رسد اگرچه جریان‌های طبیعی عمدتاً مغشوش‌اند و محاسبه عدد گراشهف هم تصدیق‌کننده این امر بود اما به دلیل پایین بودن سرعت‌ها (نزدیک به صفر) و در نتیجه وارد نشدن باد

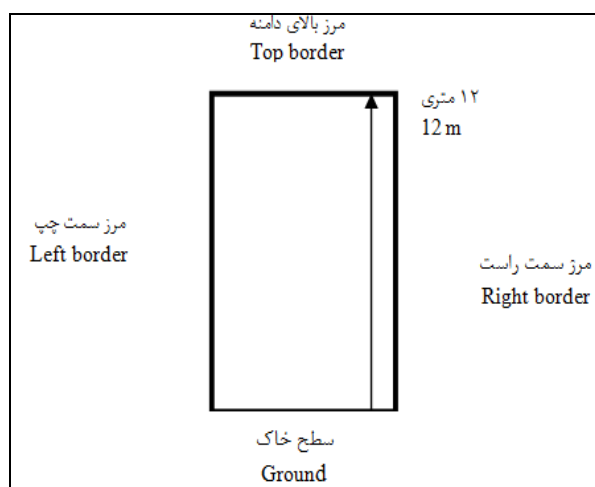
جدول ۲- مشخصات مربوط به هندسه و فراسنجه‌های شبیه‌سازی (Sobrinho *et al.*, 2009 , Abu-Hamed, 2003)

Table 2- Geometry and specification		
Unit	Value	Parameter
واحد	مقدار	فراسنجه
(m)	10	Domain width عرض دامنه
(m)	12	Domain height ارتفاع دامنه
-	0.5	Soil emissivity شاخص جذب خاک
Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	1006.4	Air specific thermal capacity ظرفیت گرمایی ویژه هوا
kgm <sup>-3</sup>	1.225	Air density چگالی هوا
-	1	Air refractive index شاخص انکسار هوا
-	2	Soil refractive index شاخص انکسار خاک

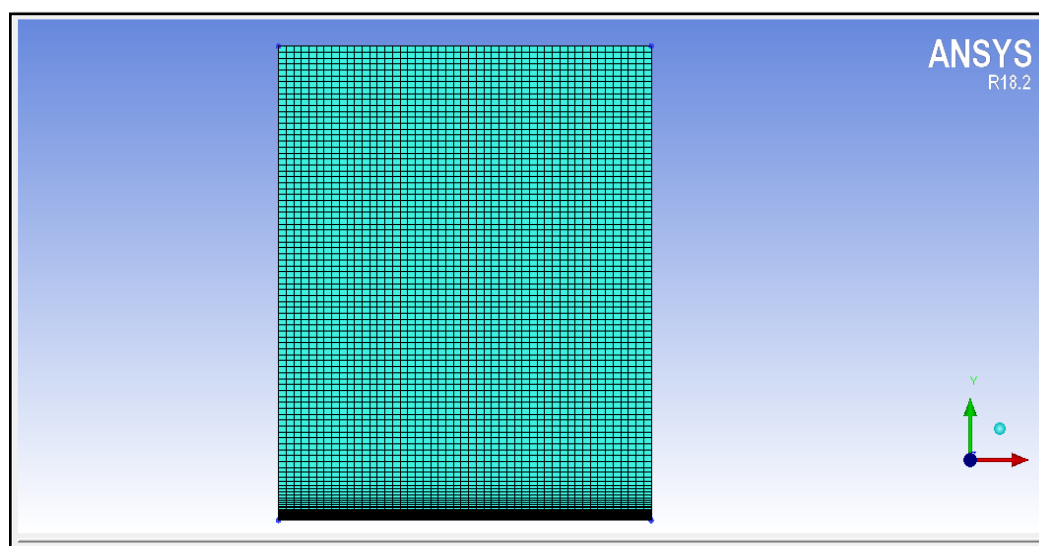
### شرایط مرزی

از سطح خاک به پهنای ۱۰ متر، ارتفاع ۱۲ متر از سطح خاک و مرزهای سمت راست و چپ شامل هوای اتمسفری. شکل ۳، طرح‌واره دامنه مسئله و مرزهای آن را نشان می‌دهد و شکل ۴ تصویر مش‌بندی شده دامنه مسئله در محیط نرم‌افزار است.

با گسسته‌سازی معادله‌های حاکم بر مسئله، برای حل عددی، در هر یک از مرزهای مسئله شرط مرزی تعیین گردید. در مطالعه حاضر، دامنه محاسباتی به شکل مستطیل در نظر گرفته شد که مرزهای آن عبارت بود



شکل ۳- طرح‌واره دامنه مسئله  
Fig. 3- Domain schematic



شکل ۴- محیط مش‌بندی شده  
Fig. 4- Mesh networks area

لغزش و سرعت صفر در نظر گرفته شد. در ارتفاع ۱۲ متری از سطح خاک، از آن جایی که هوای

برای حل معادله مومنتوم شرط مرزی اختصاص داده شده به سطح خاک، دیواره با شرط نداشتن



میزان انتقال حرارت از طریق تابش محاسبه شد.

### نتایج و بحث

در حل مسایل به روش CFD پس از رسم هندسه، دامنه به شبکه‌های کوچک تقسیم شد تا با در نظر گرفتن فراسنجه‌ها و شرایط هر نقطه و بررسی وابستگی به نقاط قبل و بعد، مسئله در داخل دامنه حل شود. با توجه به زمان شروع وارونگی (مقارن با آغاز شب و در ساعت ۸ شب) و این‌که داده‌های اکثر تاریخ‌های آزمایش شده در این ساعت نسبت به سایر ساعات مشابهت بیشتری با هم داشتند، دماهای مورد استفاده در مطالعه گام زمانی و گریدها مربوط به ساعت ۸ شب ۲۴ فروردین است. برای تعیین تعداد بهینه شبکه‌ها به منظور انتخاب منطقی‌ترین تعداد و نزدیک‌ترین نتایج، تحلیل شبکه‌بندی<sup>۴</sup> انجام شد و با توجه به میانگین خطای مطلق نسبی، ۵۰۰۰ شبکه انتخاب شد که نتایج آن در جدول ۳ آمده است. گام زمانی<sup>۵</sup>، پس از بررسی‌ها، ۹۰۰ ثانیه انتخاب شد. نتایج به دست آمده از تحلیل گام زمانی در جدول ۴ نشان داده شده است.

اتمسفری وجود دارد شرط مرزی ورودی فشار<sup>۱</sup> با مقدار فشار نسبی صفر استفاده شد. دامنه محاسباتی به این دلیل که قسمتی از زمین کشاورزی با ابعاد بزرگ بود، به صورت تکرارشونده<sup>۲</sup> در نظر گرفته شد و به همین دلیل برای مرزهای سمت راست و سمت چپ مسئله شرط مرزی تکرارشونده تنظیم گردید (Murakami, 2006).

در مسئله مورد بررسی، میزان دما در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز اهمیت بالایی دارد. دلیل این امر حساسیت بالای شکوفه درختان به تغییرات دمای محیط اطراف است. به همین منظور، دمای سطح خاک و دمای هوای اطراف در ارتفاع ۱۲ متری در ساعات وقوع سرمازدگی اندازه‌گیری شد. دمای این دو مرز که نسبت به زمان متغیر بود در قالب یک تابع تعریف شده (CFD)<sup>۳</sup> به نرم‌افزار داده شد. چون مرزهای سمت چپ و راست دارای شرط مرزی تکرار شونده بود، دمای این مرزها از حل معادله انرژی در دامنه تعیین شد و نیازی به تعریف شرط مرزی برای آنها نبود (Velure, 2014). در معادله تابش، با توجه به دمای مرزها و خواص تابشی شامل ضریب تشعشع یا شاخص انکسار،

جدول ۳- نتایج تحلیل شبکه بندی

Table 3- Grid study results

Number of mesh				Height (m)	Measured temp (°C)
تعداد شبکه				ارتفاع از زمین	دمای اندازه‌گیری شده
500	1000	5000	10000		
Outlet temp (°C)					
دمای خروجی CFD					
1.5	1.6	2.2	2.2	0.2	2.2
2.1	2.4	3.5	3.5	4	3.5
3.1	3.5	4.7	4.7	8	4.7
3.6	5.2	5.2	5.2	12	5.2

1- Pressure Inlet

3- User Defined Function (Udf)

5- Time Step

2- Periodic

4- Grid Study

جدول ۴- نتایج مطالعه گام‌های زمانی

Table 4- Time step study results

Step time			Height (m) ارتفاع از زمین (متر)	measured temp (°C) دمای اندازه‌گیری شده (درجه سلسیوس)
گام زمانی				
450	900	1800		
Outlet temp (°C) دمای خروجی CFD				
2.2	2.2	3.5	0.2	2.2
3.5	3.5	4.6	4	3.5
4.6	4.7	6.5	8	4.7
5.2	5.2	6.6	12	5.2

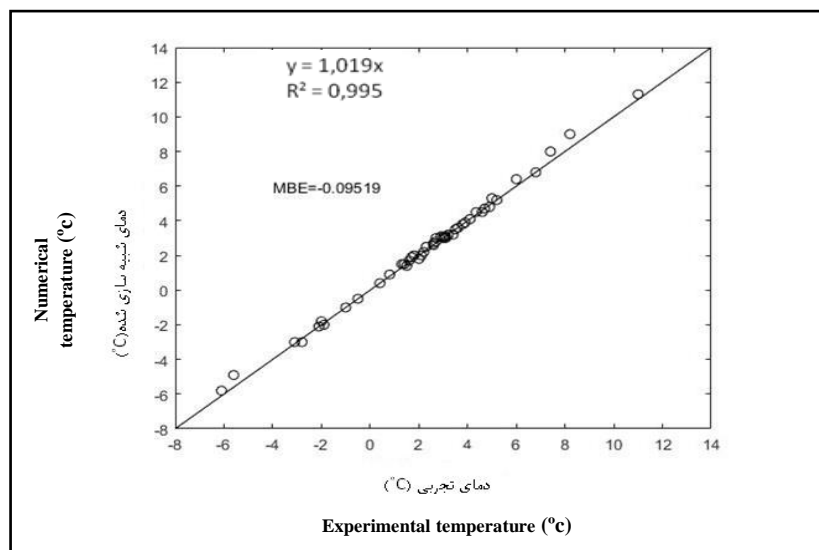
اهمیت نتایج تجربی، آن تاریخ برای شبیه‌سازی انتخاب شد. در جدول ۵، دمای اندازه‌گیری شده لایه وارونگی در ارتفاع‌های مختلف و در ساعت‌های شب منتهی به صبح، در مقایسه با نتایج خروجی از شبیه‌سازی ارائه شده است. نتایج تحلیل آماری همبستگی خوبی بین داده‌های پیش‌بینی شده مدل CFD و داده‌های تجربی نشان می‌دهد به نحوی که شاخص  $d$  برابر با  $0/91$  ضریب تبیین  $R^2=0/99$  و میانگین خطای صحت برابر  $0/09$  به دست آمد (شکل ۵).

از بین تاریخ‌های اجرای آزمون‌های تجربی، ساعت‌های منتهی به شب ۲۴ فروردین ۹۶ و بامداد ۲۵ فروردین برای شبیه‌سازی CFD وقوع سرمازدگی انتخاب شد. در آن تاریخ دمای هوا به سمت گرم شدن رفته بود ضمن اینکه شکوفه‌های سیب نژاد گلاب موجود در باغ مورد آزمایش به طور کامل باز شده بودند. از آنجا که در بازه زمانی گفته شده سرمازدگی اتفاق افتاد، این فرصت مهیا شد تا به صورت میدانی اثر آن را در از بین رفتن شکوفه‌ها مشاهده کنیم. بنابراین با توجه به

جدول ۵- دمای لایه وارونگی حاصل از آزمون تجربی و نتایج خروجی از مدل شبیه‌سازی از شب ۲۴ فروردین تا بامداد ۲۵ فروردین

Table 5- Numerical and Experimental analysis for inversion layer temperature (24th night to 25th morning)

دمای ۱۲ متری		دمای ۸ متری		دمای ۴ متری		دمای سطح زمین		time
12m height temp °C		8m height temp. °C		4m height temp. °C		Ground level temp. °C		زمان
Exp	Num	Exp	Num	Exp	Num	Exp	Num	
تجربی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی	
5.2	5.2	4.7	4.7	3.5	3.5	2.2	2.2	20
4.5	4.5	3.5	3.5	3	3.1	1.4	1.5	21
3.8	3.8	3.2	3.2	2.7	3	-0.5	-0.5	22
3.1	3.1	2.9	3.1	2.3	2.5	-2	-1.8	23
3	3	3.4	3.2	1.8	2	-2.8	-3	24
3.6	3.6	2.6	2.6	2.1	2	-1	-1	1
3.1	3.1	2.7	2.8	1.8	2	-1.9	-2	2
4.1	4.1	3.1	3	2	1.8	-2.1	-2.1	3
4.6	4.5	2.6	2.7	1.3	1.5	-3.1	-3	4
1.6	1.7	1.7	1.9	0.8	0.9	-6.1	-5.8	5
1.5	1.4	1.8	2	0.4	0.4	-5.6	-4.9	6
5	5.3	4.9	4.8	3.9	3.9	6	4.3	7
8.2	9	7.4	8	6.8	6.8	11	11.3	8
1.3		3.8		7.8		5		میانگین خطای مطلق نسبی %
								Mean absolute relative Error

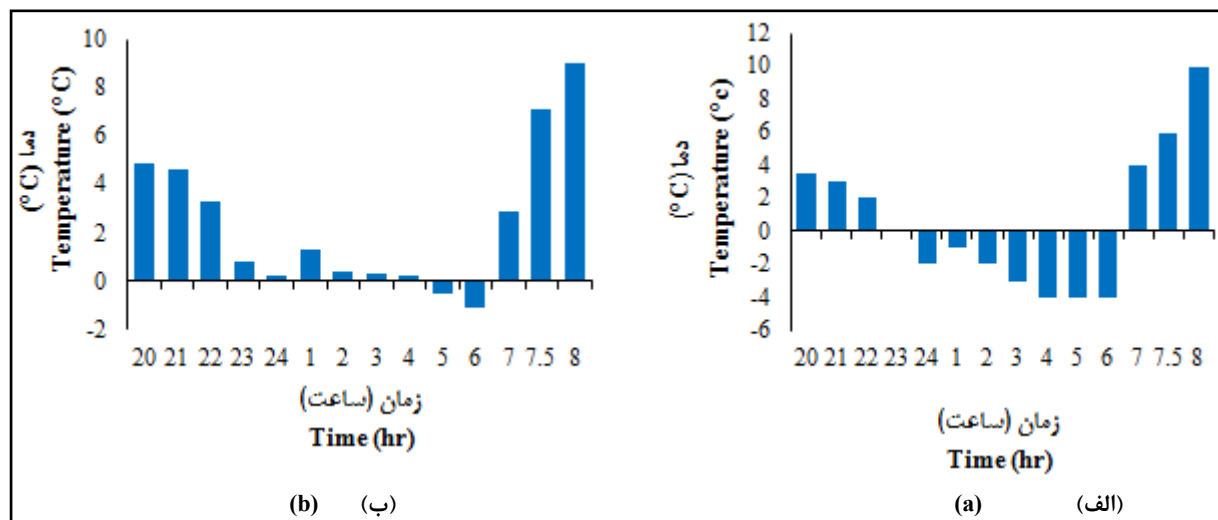


شکل ۵- رابطه بین دمای تجربی و دمای شبیه‌سازی شده

Fig. 5- Relation between Numerical and Experimental temperature

نتایج تجربی نشان می‌دهد شدیدترین مقدار افت دما و بیشترین اختلاف دمایی در لایه ۱۲ متری سطح باغ، در ساعات ۵ و ۶ بامداد و درست پیش از طلوع آفتاب رخ داده است. نحوه توزیع و مقادیر دما در شرایط وزش باد و بدون وزش باد در شکل ۶ نشان داده شده است.

نتایج تجربی نشان می‌دهد شدیدترین مقدار افت دما و بیشترین اختلاف دمایی در لایه ۱۲ متری سطح باغ، در ساعات ۵ و ۶ بامداد و درست پیش از طلوع آفتاب رخ داده است. نحوه توزیع و مقادیر دما در شرایط وزش باد و بدون وزش باد در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- اثر سرعت باد بر میزان افت دما. الف) بدون وزش باد و ب) در هنگام وزش باد

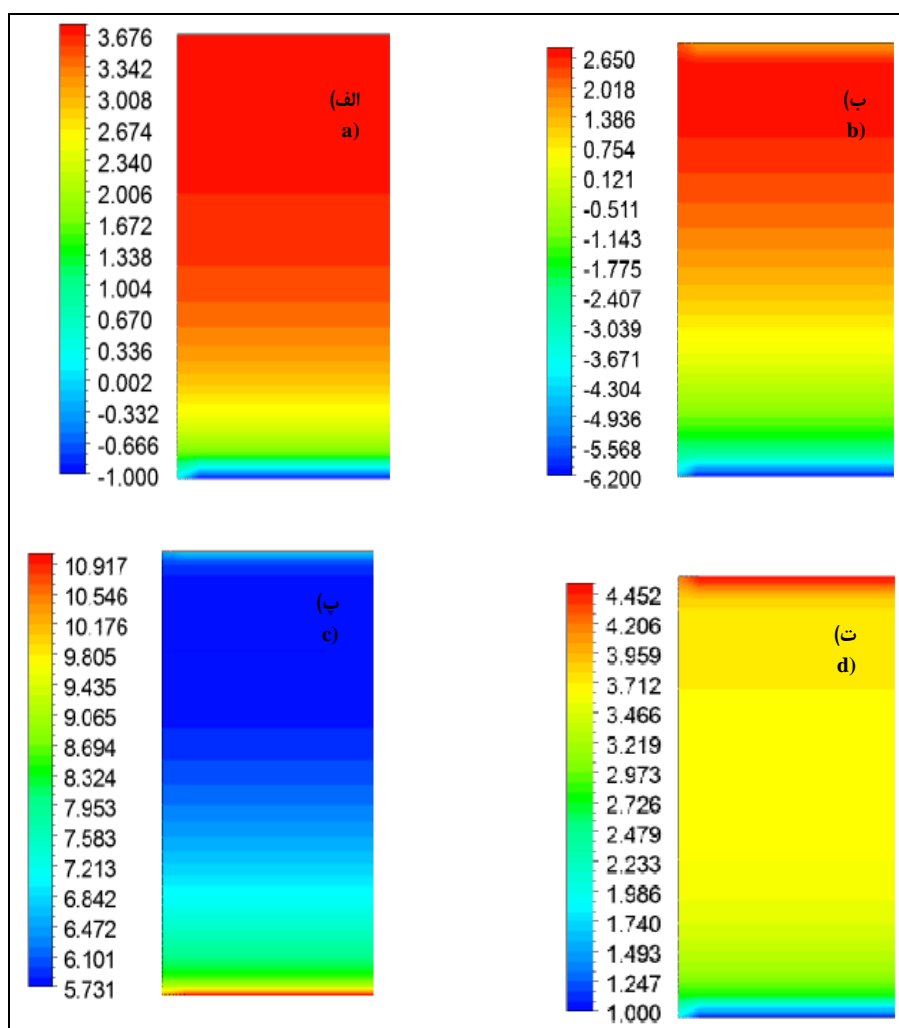
Fig. 6- Wind effect on temperature decreasing: a) without wind and b) with wind

سرعت وزش باد بر حسب متر بر ثانیه برای هر ساعت از ۸ شب تا ۸ بامداد روز بعد روی هر ستون مشخص شده است، شکل ۶- الف مربوط به زمانی است که در شب سرعت باد ناچیز و نزدیک صفر است و در نتیجه کمینه دما به حدود منفی ۵ درجه سلسیوس رسیده است، اما در شکل ۶- ب وزش باد سبب جابه‌جایی هوای سرد لایه‌های پایین با هوای گرم‌تر لایه‌های بالایی شده و از اختلاف

سرعت وزش باد بر حسب متر بر ثانیه برای هر ساعت از ۸ شب تا ۸ بامداد روز بعد روی هر ستون مشخص شده است، شکل ۶- الف مربوط به زمانی است که در شب سرعت باد ناچیز و نزدیک صفر است و در نتیجه کمینه دما به حدود منفی ۵ درجه سلسیوس رسیده است، اما در شکل ۶- ب وزش باد سبب جابه‌جایی هوای سرد لایه‌های پایین با هوای گرم‌تر لایه‌های بالایی شده و از اختلاف

شدید دمایی و افت آن جلوگیری و یکنواختی دمایی بیشتری را ایجاد کرده است. در شکل ۷-ب مقادیر و توزیع دما در ساعت ۵ بامداد نشان داده شده است. افت دما به حدود ۶ درجه سلسیوس زیر صفر و اختلاف ۸ درجه بین دمای سطح خاک و دما در ارتفاع ۱۲ متری نشان از فشردگی در لایه وارونگی و شدت سرمازدگی دارد. اما شکل ۷-الف، توزیع

دمایی مربوط به ساعات اولیه شب را نشان می‌دهد که افت و اختلاف دما کم‌تر است. شکل ۷-ت کانتور توزیع دمایی را در حالت وزش باد نشان می‌دهد. از دیگر نکات، برعکس شدن پدیده وارونگی و افزایش دمای لایه‌های پایینی پس از طلوع آفتاب است که در شکل ۷-پ توزیع آن را از دمای گرم‌تر در سطح خاک به سردتر در ارتفاع بالاتر می‌توان دید.



شکل ۷- کانتور توزیع وارونگی دمایی: الف) در ساعت ۱۰ شب، ب) در ساعت ۵ بامداد، پ) در ساعت ۸ بامداد در تاریخ ۹۶/۱/۲۵ و ت) حین وزش باد در ساعت ۱۰ شب در تاریخ ۹۶/۱/۱۶

Fig. 7- Contour of inversion distribution 25/1/1396 a) 10pm, b) 5am, c) 8am And d) 10pm with wind 16/1/1396

## نتیجه‌گیری

همراه است، می‌تواند منحصر به ساعات ذکر شده باشد. داده‌های حاصل از پایش نشان می‌دهد که سرعت وزش باد اثر مستقیم بر شیب افت دما و شدت سرمازدگی دارد به نحوی که در شب‌هایی که سرعت باد صفر است شاهد گرادیان ۸ درجه‌ای دما از سطح خاک تا ارتفاع ۱۲ متری هستیم و می‌بینیم آن هنگام که سرعت باد ۰/۵ متر بر ثانیه است این اختلاف به ۳ درجه کاهش می‌یابد. بنابراین، یکی از روش‌های اثرگذار در جلوگیری از سرمازدگی می‌تواند ایجاد باد هرچند اندک در سطح باغ باشد تا مانع افت ناگهانی دما در ساعات بحرانی شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی CFD وارونگی حاکی از همبستگی قابل قبول در قیاس با داده‌های تجربی دارد.

نتایج تجربی نشان می‌دهد با شروع شب و به دلیل بازتابش گرما از سطح زمین به سمت آسمان، دمای سطح نزدیک به زمین سرد می‌شود و شدت سرما با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد. تاثیر این ویژگی بر درختان میوه با توجه به نوع آنها و ارتفاع قرارگیری شکوفه‌ها متفاوت است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد انواع درختان میوه (مانند سیب) که شکوفه‌هایشان در محدوده ارتفاعی ۱ تا ۳ متر قرار دارند، بیشتر از سایر گونه‌ها در معرض افت دما به زیر دمای بحرانی و در نتیجه یخ‌زدگی هستند، و نیز اینکه بیشترین افت دما در تاریخ‌های مورد مطالعه در ساعات نزدیک به طلوع آفتاب یعنی ساعات ۵ و ۶ بامداد است. بنابراین هر اقدام حفاظتی در برابر سرمازدگی، که معمولاً با صرف انرژی و سوخت زیاد

## مراجع

- Abu-Hamed, N. H. (2003). Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Biosystems Engineering*, 86(1), 97-102.
- Bakker, A., Ahamad, H. H., & Lanre, M. O. (2001). Realize greater benefits from CFD. *Fluid/Solids Handling*, 23, 45-53.
- El Mogharbel, O., Ghali, K., Ghddar, N., & Abiad, M. G. (2013). Simulation of localized heating system for broiler brooding to improve energy performance. *International Journal of Energy Research*, 121, 33-42.
- Ellgas, S., & Pfitzner, M. (2007). Modeling frost formation within a commercial 3-D CFD code. *An international Journal of Computation and Methodology*, 53(5), 485-506.
- Levitt, J. (1980). *Responses of Plants to Environmental Stress*. New York NY: Academic Press.
- Mardkheh, A., Abbaspourfard, M. H., & Tabasizadeh, M. (2016). A EAHE Simulation using computational fluid dynamics. 10<sup>th</sup> Biosystem Engineering Congress. Aug. 30-31. Mashhad, Iran. (in Persian)
- Mostafa, E., I. B., Lee, S. H., Song, K. S., Kwon, K. S., Seo., I. H., Hong, S. W., Hwang, H. S., Bitog, J. P., & Han, H. T. (2012). Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system. *Biosystems Engineering*, 112(4), 293-303.

- Murakami, S. (2006). Environmental design of outdoor climate based on CFD. *Fluid Dynamics Research*, 38(2-3), 108-126.
- Norton, T., Sun, D. W., Grant, J., Fallon, R., & Dodd, V. (2007). Application of computational fluid dynamics (CFD) in the modeling and design ventilation systems in the agricultural industry: a review. *Bioresource Technology*, 98, 2386-2414.
- Pelletier, V., Gumiere, S. J., Pepin, S., & Gallichand, J. (2017). Positioning Temperature sensors for frost protection in northern cranberry protection. *Agricultural Sciences*, 8, 960-971.
- Ribeiro, A. C., De Melo-Abreu, P., & Snyder, L. R. (2006). Apple orchard frost protection with wind machine operation. *Agriculture and Meteorology*, 141, 71-81.
- Riddle, A., Carruthers, D., Sharp, A., McHuge, C., & Stocker, J. (2004). Comparisons between FLUENT and ADMS for atmospheric dispersion modeling. *Atmospheric Environment* 38(7), 1029-1038.
- Rosenberg, N. J., Bald, B. L., & Verna, S. B. (1983). *Microclimate in the Biological Environment*. 2<sup>nd</sup> Ed. New York: John Wiley & Sons.
- Savage, M. J. (1993). *Statistical aspects of model validation. Workshop on the Field Water Balance in the Modeling of Cropping Systems*. University of Pretoria, South Africa.
- Seif, M., & Razavi, G. (2006). *Analysis of Frostbite from the Synoptic Meteorological View. Cognitive Workshop and Frost Protection Solutions in Fars Province*, Meteorological Office Fars Province. Fars, Iran. (in Persian)
- Seo, I. H., Lee, O. K., Moon, H. S., Kim, H. T., Hwang, H. S., Hong, S. W., Bitog, J. P., You, J. I., Kwon, K. S., Kim, Y. H., & Han, J. W. (2009). Improvement of the ventilation system of a naturally ventilated broiler house in the cold season using computational simulations. *Biosystems Engineering*, 104(1), 106-117.
- Sethian, J. A. (1993). Computational Fluid Dynamics. In: From Desktop to Traflop: Exploiting the USLead in High Performance Computing. Washington, DC, USA: NFS Publications, National Science Foundation.
- Sobrinho, A. J., Mattar, C., Pardo, P., Jimenes, C., Hook, S. J., Baldrige, A., & Ibanez, R. (2009). Soil emissivity and reflectance spectra measurement. *Applied Optics*, 48, No.19/1.
- Snyder, R. L., & Melo-Abreu, J. P. (2005). *Frost protection: Fundamentals, Practice and Economics (Vol. 1)*. Publication of Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Telepenko, Y. Y. (2018). Frost-resistance of the blackberry cultivars in the forest-steppe zone in Ukraine. *Plant Varieties Studing and Protection*, 14(1), 124-131.
- Van ruth, N. J. L., & Kratz, P. (2018). *Direct solar thermal systems with (thermosiphon) circulation frost protection using a thermo-differential valve. Eurosun 2018 Conference*. Aug. 5 - 8 International Solar Energy Society.

- Velure, S. K. (2014). Free convection model development for the thermal analysis of cavities in subsea christmas trees (Master Thesis) Engineering and ICT, Norwegian University of Science and Technology.
- Wang, G., & Rong, Y. (2012). CFD-based modeling on interfacial heat transfer for water quenching. *Journal of CFD Modeling and Simulation on Materials*, 96, 145-159.
- Xia, B., & Sun, D. W. (2002). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34, 5-24.



**Research Paper**

## **Experimental Study and Simulation of Radiation Frost using Computational Fluid Dynamics**

**P. Khoram-Shekooh, M. Kasraei, S. M. Nasiri, M. Eslami and M. A. Nematollahi**

\* Corresponding Author: Ph. D. Student, Department of Biosystem Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.  
Email: persianprinc@yahoo.com.

Received: 17 March 2019, Accepted: 15 July 2019

### **Abstract**

Frostbite is one of the most important reasons for crop loss in Iran. Radiation frost due to inversion condition causes temperature drop below critical damage point which leads to extracellular ice formation inside the plant tissues. The purpose of this study was to identify the most important factors affecting radiation freezing. A region near the city of Shiraz with a chance of happening frostbite, according to previous weather reports, was selected. The temperature and wind speed were measured at the field level in the first and second half of the year, in nights expecting frostbite could be occurred. Then, the CFD simulation of heat transfer and thermal distribution was carried out using the FLUENT software, based on the time and the height of the ground surface under unstable conditions during frostbite. The numerical model was studied based on the data which obtained from the field stand. The results showed a good correlation between empirical and analytical data, so that the estimation by the root means square error method, 0.99, was obtained for experimental and simulation temperature values. Also, the results illustrated the wind blowing had a significant effect on preventing a sudden drop in temperature and frosting of products take place.

**Key words:** Garden Crops Damage, Fluids Modeling, Radiation Frost, Temperature Distribution