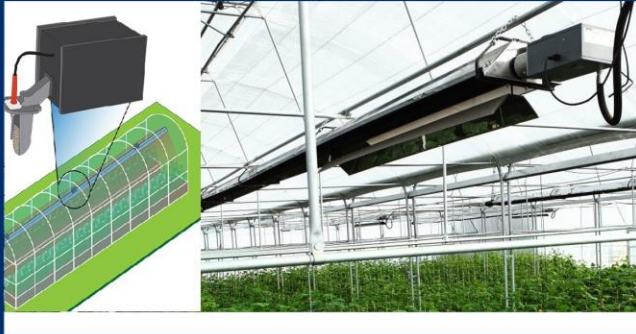


نشریه فنی ۸

شناخت، اصول نصب و کاربرد سامانه گرمایش تابشی مادون قرمز در گلخانه‌ها

محمد حسین سعیدی راد، مهدی سمگانی،
فرزاد آزاد شهرکی، داود مؤمنی، سعید ظریف نشاط



بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

نشریه فنی:

شناخت، اصول نصب و کاربرد سامانه گرمایش

تابشی مادون قرمز در گلخانه‌ها

تهیه و تدوین:

محمد حسین سعیدی راد، مهدی سمنگانی،

فرزاد آزاد شهرکی، داود مؤمنی، سعید ظریف نشاط

به ترتیب

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی

تولید کننده محصولات گلخانه‌ای و رئیس انجمن گل رز ایران

عضو هیئت علمی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی

سال انتشار:

۱۴۰۱



وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی



نوع نوشتار: نشریه فنی
عنوان نوشتار: شناخت، اصول نصب و کاربرد سامانه گرمایش تابشی مادون قرمز در گلخانه‌ها
نگارندگان: محمدحسین سعیدی‌راد، مهدی سمنگانی، فرزاد آزاد شهرکی، داود مؤمنی و سعید ظریف نشاط
ویراستار ادبی: محمدرضا داهی
صفحه‌آرا: سمیه وطن دوست
ناشر: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
شمارگان: محدود
نوبت چاپ: اول
سال انتشار: ۱۴۰۱



مسئولیت صحت مطالب با نگارنده است.

شماره ثبت ۶۱۷۱۴ در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع‌رسانی کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به تاریخ ۱۴۰۱/۰۳/۲۴

مخاطبان نشریه:

مخاطبان این نشریه کارشناسان و مروجان شاغل در وزارت جهاد کشاورزی، کارشناسان سازمان نظام مهندسی کشاورزی و منابع طبیعی، گلخانه‌داران، نمایندگان تشکلهای و تعاونی‌های گلخانه‌دار، کارشناسان شرکت‌های طراح و نصاب تجهیزات گلخانه‌ای و دانشجویان علاقه‌مند در این حوزه هستند.

اهداف آموزشی:

شما خوانندگان گرامی در این نشریه با:

- اصول کار سامانه گرمایش تابشی
- انواع سامانه گرمایش تابشی
- کاربرد و نصب سامانه گرمایش تابشی در گلخانه
- اصول فنی و نگهداری سامانه گرمایش تابشی در گلخانه

آشنا خواهید شد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه.....	۱
۲- انواع تجهیزات گرمایشی گلخانه	۲
۳- انواع روش‌های انتقال گرما	۲
۳-۱- رسانایی	۳
۳-۲- همرفت	۳
۳-۳- تابش	۴
۴- محاسبه انرژی تابشی	۵
۵- سامانه گرمایش تابشی	۷
۵-۱- سامانه گرمایش تابشی سرمایه‌ی	۸
۵-۲- سامانه گرمایش تابشی لوله‌ای	۹
۶- ویژگی‌های کاربرد سامانه‌های گرمایش تابش لوله‌ای در گلخانه	۱۳
۶-۱- مصرف انرژی	۱۴
۶-۲- عامل‌های گیاهی	۱۶
۷- اصول طراحی، نصب و کاربرد سامانه‌های گرمایش تابشی در گلخانه	۱۷
۷-۱- اصول طراحی و انتخاب	۱۸
۷-۲- اصول نصب و کاربرد سامانه‌های گرمایش تابشی در گلخانه	۲۰
۷-۲-۱- ارتفاع نصب	۲۰
۷-۲-۲- چیدمان سامانه‌های گرمایش تابشی	۲۰
۷-۲-۳- اصول ایمنی نصب و کاربرد	۲۲
۸- نتیجه‌گیری و پیشنهاد	۲۵
۹- فهرست منابع	۲۶

مقدمه

از مهم‌ترین متغیرهایی که برای تولید محصول کافی در گلخانه باید کنترل شود، دمای مطلوب برای گیاه است. دور شدن از دامنه مطلوب دمایی در گلخانه، علاوه بر کمیت بر کیفیت تولیدات گلخانه‌ای نیز اثر سوء خواهد داشت. کشت گلخانه‌ای به دلیل ماهیت تولید خارج از فصل، دارای مصرف انرژی بالاست زیرا برای تأمین شرایط محیطی داخل گلخانه نیاز به مصرف انرژی زیاد خواهد بود. بخش عمده هزینه‌های تولید در گلخانه‌ها به انرژی و سوخت مرتبط است.

هر گیاه برای رشد نیازمند دامنه دمایی خاصی است. پایین‌تر بودن دمای محیط رشد نسبت به دمای مورد نیاز گیاه موجب خواهد شد تا رشد گیاه متوقف شود، در صورت تشدید این حالت، محتویات درون بافت‌های زنده گیاه یخ می‌زند. بالا بودن دما نیز باعث غیر فعال شدن آنزیم‌ها می‌شود و فرآیندهای ضروری برای نمو گیاه متوقف می‌گردد.

در ماه‌های سرد سال که دمای گلخانه از دمای مطلوب پایین‌تر می‌رود، در کنار استفاده از پوشش مناسب در گلخانه و درزبندی گلخانه به‌منظور تأمین نیاز گرمایی و جلوگیری از هدر رفت گرما، لازم است با استفاده از سامانه‌های گرمایشی دمای گلخانه را افزایش داد.

سامانه گرمایشی مطلوب باید ویژگی‌های زیر را دارا باشد:

- استفاده از سوخت قابل دسترس و ارزان‌تر
- توزیع یکنواخت گرما در گلخانه
- بالا بودن بازده انرژی
- آلوده نکردن محیط گلخانه به گازهای ناشی از احتراق مواد سوختی
- با صرفه بودن

- مجهز بودن به سیستم کنترل خودکار روشن و خاموش شدن و تنظیم خودکار دمای محیط
- ایمن بودن و راحتی کار با آن
- نیاز نداشتن به فضای زیاد و اشغال نکردن فضای تولید

۲- انواع تجهیزات گرمایشی گلخانه

تجهیزات گرمایشی به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: تجهیزات گرمایش مرکزی و تجهیزات گرمایش موضعی.

در گرمایش مرکزی، گرمای ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی (مانند گاز، گازوئیل و زغال‌سنگ) در محلی خارج از محیط گلخانه تولید می‌شود. این انرژی صرف گرم کردن یک سیال (آب، بخار آب، روغن یا هوا) می‌شود. سیال گرم شده، گرمای دریافتی را به محیط گلخانه منتقل می‌کند. در این سامانه با توجه به اینکه فرآیند احتراق خارج از محیط گلخانه طی می‌شود، خطر آلودگی هوای گلخانه با گازهای ناشی از احتراق وجود ندارد. اما هزینه‌های اولیه این سیستم بالاست و به کار بستن آن برای سطوح کوچک توجیه اقتصادی ندارد.

در سامانه گرمایش موضعی از تعدادی بخاری استفاده می‌شود که در نقاط مختلف گلخانه قرار داده می‌شوند و هر یک محیط اطراف خود را گرم می‌کند. در مجموعه سامانه‌های گرمایش موضعی، کوره‌های هوای گرم، بخاری‌های الکتریکی و بخاری‌های تابشی استفاده می‌شوند.

۳- انواع روش‌های انتقال گرما

به‌طور کلی گرما به سه روش به شرح زیر انتقال می‌یابد (شکل ۱):



شکل ۱- روش‌های انتقال گرما (https://article.tebyan.net)

۳-۱- رسانایی^۱

انتقال گرما به روش رسانایی بیشتر در جامدات رخ می‌دهد که فاصله مولکول‌هایشان نسبت به فاصله مولکول‌ها در مایع و گاز کمتر است. در این روش ابتدا قسمتی از ماده گرم می‌شود. بر اثر گرما، مولکول‌های آن قسمت جنبش بیشتری پیدا می‌کنند و به مولکول‌های مجاور برمی‌خورند و آنها را نیز به حرکت در می‌آورند. این کار در سرتاسر ماده ادامه می‌یابد و بدین ترتیب کل ماده گرم می‌شود.

۳-۲- همرفت^۲

در انتقال گرما به روش همرفت، گرما بین یک سیال متحرک و یک جسم جامد تبادل می‌یابد. هوا در اثر تماس با وسیله گرم کننده، مانند رادیاتور یا بخاری گرم می‌شود، انبساط می‌یابد و در نتیجه سبک‌تر می‌شود، به طرف بالا حرکت می‌کند و هوای سرد و سنگین به آرامی جای آن را می‌گیرد و این عمل تکرار

¹ Conduction

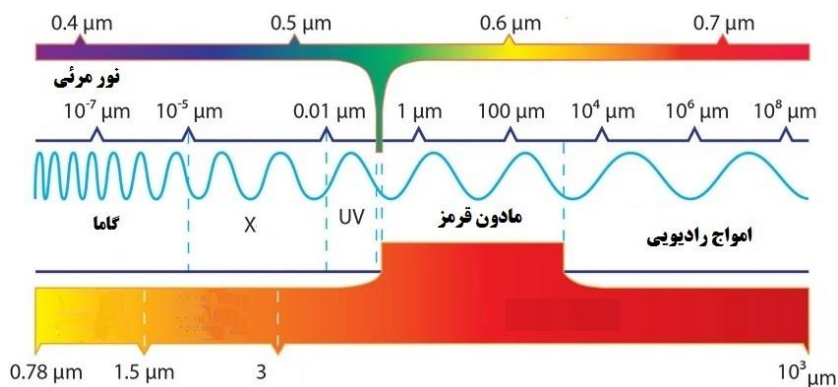
² Convection

می‌شود که به آن همرفت طبیعی گفته می‌شود. چنانچه برای جابه‌جایی هوای گرم از دمنده استفاده شود، بدان همرفت اجباری (مصنوعی) اطلاق می‌شود.

۳-۳- تابش^۱

بر خلاف دو روش انتقال گرما (رسانایی و همرفت) که در آنها انرژی گرمایی از طریق محیط مادی منتقل می‌شود، گرما در تابش می‌تواند بدون نیاز به محیط مادی (جامد، مایع و گاز) و حتی در خلأ انتقال یابد. این انتقال از طریق امواج فروسرخ (مادون قرمز) صورت می‌گیرد. شکل ۲، امواج فروسرخ را در محدوده طیف الکترومغناطیس نشان می‌دهد. طول موج‌های طیف الکترومغناطیس که در آنها انرژی گرمایی انتقال می‌یابد، بین $0/78$ تا 1000 میکرومتر قرار دارد (حقوقی، ۱۳۸۸). به‌طور کلی، تمام اجسامی که دمای بالاتر از صفر مطلق دارند بخشی از انرژی گرمایی خود را به صورت تابش گرمایی به محیط اطراف می‌دهند. امواج تابشی مرئی و نامرئی هنگامی که به جسم برخورد کنند سه بخش می‌شوند: بخشی از جسم عبور می‌کنند. بخشی منعکس می‌شوند و بخشی دیگر جذب آن می‌گردند. بخشی از امواج تابشی که جذب جسم می‌شوند باعث بالا رفتن دمای آن جسم می‌شوند. اجسامی با رنگ روشن و سطح براق، مثل آینه، بخش عمده انرژی تابشی را منعکس می‌کنند، در حالی که مواد با سطح تیره و زبر بیشتر انرژی تابشی را جذب می‌کنند و بر اثر آن گرم می‌شوند.

¹ Radiation



شکل ۲- امواج فروسرخ (مادون قرمز) در طیف الکترومغناطیس
(<https://article.tebyan.net>)

۴- محاسبه انرژی تابشی

در انتقال گرما به روش تابشی، جسم سیاه^۱ پس از داغ شدن، انرژی را در طیفی از امواج الکترومغناطیسی تابش می‌کند. به جسمی که کامل‌ترین جذب کننده و ساطع کننده انرژی در طول موجی خاص باشد، «جسم سیاه» گفته می‌شود. میزان انرژی ساطع شده از جسم سیاه در واحد زمان و در واحد سطح را می‌توان با استفاده از قانون استفان-بولتزمن^۲ و از رابطه زیر محاسبه کرد (بابایی، ۱۳۹۹).

$$E = \sigma T^4 \quad (1)$$

که در آن:

E = توان ساطع شده در واحد سطح برحسب وات بر مترمربع

¹ Black Body

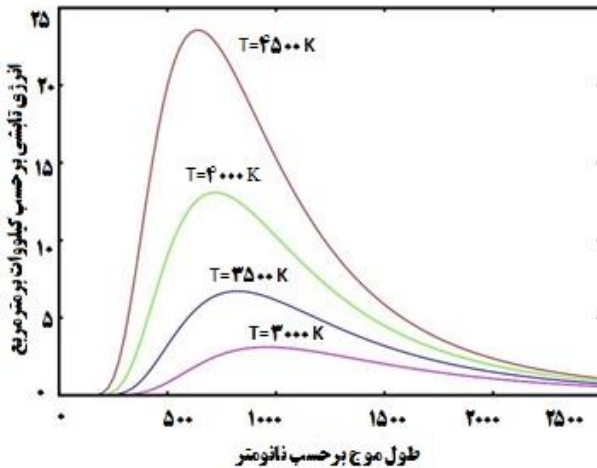
² Stefan-Boltzman

$T =$ دما بر حسب درجه کلوین

$$\sigma = 5/67 \times 10^{-8} \text{ - بولتزمن: } \sigma = 5/67 \times 10^{-8}$$

رابطه بالا بیان می‌کند وقتی دمای جسمی دو برابر شود، میزان توان ساطع شده از آن ۱۶ برابر خواهد شد.

شکل ۳ میزان انرژی ساطع شده از جسم سیاه را در دماها و طول موج‌های مختلف نشان می‌دهد. شدت تابش از جسم سیاه به صورت پیوسته است و در یک طول موج خاص بیشترین مقدار را دارد. با افزایش دمای جسم، بیشترین تابش به سمت طول موج‌های پایین‌تر نزدیک می‌شود (بابایی، ۱۳۹۹).



شکل ۳- مقدار انرژی ساطع شده از جسم سیاه، بر حسب دما و در طول موج‌های مختلف (بابایی، ۱۳۹۹).

۵- سامانه گرمایش تابشی^۱

هر جسمی که دارای دمای بالاتر از صفر مطلق (۲۷۳/۱۵- درجه سلسیوس) باشد از خود تشعشع صادر می‌کند که بسته به دمای آن دارای طول موجی خاص است. از این خاصیت در گرم کننده‌های تابشی استفاده شده است. در این روش، گرمای ایجاد شده با مشعل از طریق منعکس کننده^۲ روی سطح گیاه تابیده می‌شود.

سامانه گرمایش تابشی به سامانه‌ای اطلاق می‌شود که در آن بیش از ۵۰ درصد انتقال گرما به محیط اطراف از طریق تابش (تشعشع) صورت گیرد. در رادیاتورهای آب‌گرم، بیش از ۷۰ درصد انرژی گرمایی از طریق همرفت است و از این‌رو نمی‌توان آنها را جزء خانواده سامانه گرمایش تابشی در نظر گرفت (حقوقی، ۱۳۸۸).

اکثر سامانه‌های گرمایش تابشی از پروپان، گاز طبیعی و گازوییل به عنوان سوخت استفاده می‌کنند. در این سیستم، شعله ایجاد شده در اثر احتراق سوخت به وسیله مشعل، به سطوح سرامیکی یا داخل لوله‌های فلزی با ضریب تابش زیاد (تیره رنگ) برخورد می‌کند و گرمای ایجاد شده به امواج حرارتی فروسرخ تبدیل می‌شود. امواج فروسرخ در مسیر مستقیم و با سرعت نور حرکت می‌کنند. اشیا موجود در مسیر، انرژی امواج الکترومغناطیسی را جذب و بی‌درنگ به گرما تبدیل می‌کنند. امواج فروسرخ در مسیر حرکت خود هوا را گرم نمی‌کنند، بلکه اشیای موجود در محیط مثل گیاهان، کفپوشش‌ها و سکوه‌های کشت با جذب این امواج گرم می‌شوند و به نوبه خود هوای اطراف را گرم می‌کنند.

¹ Radiant Heaters

² Reflector

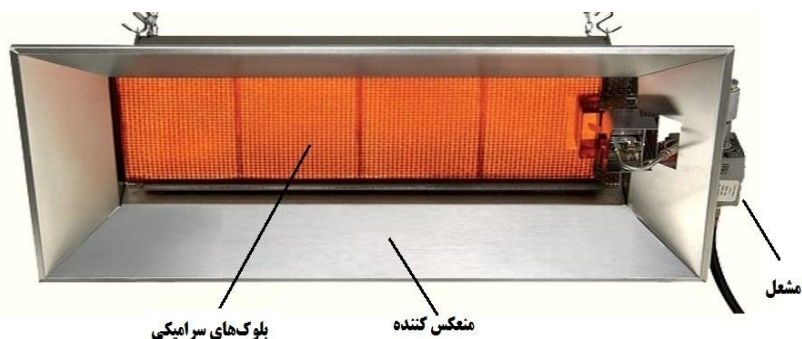
سامانه‌های گرمایش تابشی بر مبنای دمای سطوح تابشی آنها به شرح زیر تقسیم‌بندی می‌شوند (حقوقی، ۱۳۸۸):

- بخاری‌های الکتریکی کوارتز با دمای بالا (۲۰۰۰ درجه سلسیوس)
 - سامانه گرمایش تابشی سرامیکی گازسوز شعله مستقیم (۹۰۰ درجه سلسیوس)
 - سامانه گرمایش تابشی لوله‌ای (۳۰۰ درجه سلسیوس)
 - سامانه گرمایش تابشی گاز سوز نواری (۲۰۰ درجه سلسیوس)
 - سامانه گرمایش تابشی آبی (۱۱۰-۶۰ درجه سلسیوس)
- در بین سامانه‌های بالا، سامانه گرمایش تابشی سرامیکی با شعله مستقیم و سامانه‌های گرمایش تابشی لوله‌ای و نواری از متداول‌ترین سامانه‌های گرمایش تابشی گازسوز هستند.

۵-۱- سامانه گرمایش تابشی سرامیکی^۱

در سامانه گرمایش تابشی سرامیکی، سوخت (گاز طبیعی یا مایع) در درون محفظه‌ای با هوا مخلوط می‌شود و پس از احتراق، شعله به وجود آمده توسط فن سانتریفوژ دمنده به بلوک‌های سرامیکی که در طول دستگاه به صورت ردیفی نصب شده‌اند، برخورد می‌کند و سبب بالا رفتن دمای بلوک‌های سرامیکی تا ۹۰۰ درجه سلسیوس می‌شود (شکل ۴). این گرما سرانجام به صورت تابشی در محیط منتشر می‌شود.

¹ Ceramic Radiant Heater



شکل ۴- سامانه گرمایش تابشی سرامیکی

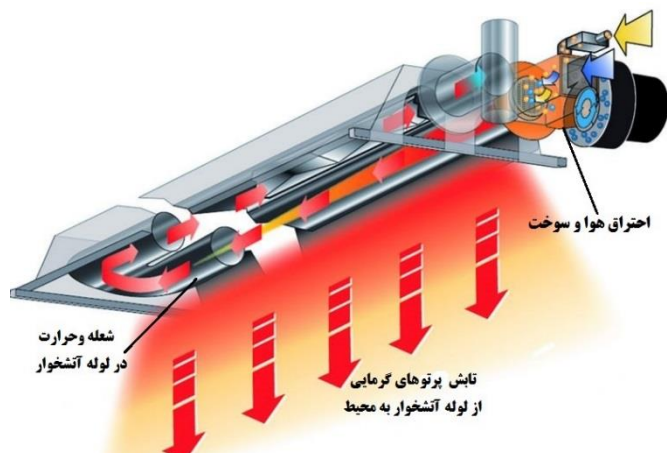
ابعاد و وزن این سامانه گرمایش تابشی از ابعاد و وزن سایر انواع سامانه‌های تابشی گازسوز کمتر و نصب آنها ساده‌تر است. بنابراین، علاوه بر فضاهای صنعتی، استفاده از آنها در سالن‌های اجتماعات، مکان‌های مذهبی و انواع فضاهای نمایشگاهی نیز گسترش یافته است.

۵-۲- سامانه گرمایش تابشی لوله‌ای^۱

شکل ۵ نحوه انتقال حرارت در سامانه‌های گرمایش تابشی و شکل ۶ اجزای تشکیل دهنده یک بخاری تابشی لوله‌ای را نشان می‌دهد. در سامانه گرمایش تابشی لوله‌ای، مخلوط هوا و سوخت توسط مشعل در داخل یک لوله با ضریب تابش بالا که لوله آتشخوار نامیده می‌شود، سوزانده می‌شود و دمای لوله را به طور میانگین تا ۳۰۰ درجه سلسیوس بالا می‌برد. انرژی تابشی لوله به کمک یک منعکس کننده به سمت پایین هدایت می‌شود. فن مکنده نیز مکش لازم را درون

¹ Radiant Tube Heater

لوله، به‌منظور حرکت دادن شعله ناشی از احتراق به سمت انتهای لوله، فراهم می‌کند.



شکل ۵- نحوه انتقال حرارت در سامانه گرمایش تابشی لوله‌ای



شکل ۶- اجزای سامانه گرمایش تابشی لوله‌ای

لوله‌های آتشخوار از جنس فولاد ضد زنگ روکش دار (آلومینیم یا تیتانیم) هستند که به دلیل آلیاژ عنصر کربن و منگنز مقاومت بسیار بالایی در تحمل حرارت دارند. زمانی که سطح گرمایی آنها به محدوده ۳۰۰-۴۰۰ درجه سلسیوس رسید، شروع به تابش گرما به صورت امواج فرسرخ (مادون قرمز) می‌کنند. این لوله‌ها تحمل حرارت حداقل ۴۵۰ درجه سلسیوس را دارند. طول این لوله‌ها از ۵ متر شروع می‌شود و تا ۱۵ متر نیز می‌تواند برسد. فن مکنده به راحتی می‌تواند گرما را در طول لوله انتشار دهد و آن را گرم کند. فن‌های مورد استفاده در بخاری‌های تابشی لوله‌ای، بسته به طراحی شکل لوله آتشخوار، می‌تواند مکنده یا دمنده باشند. منعکس کننده از ورق آلومینیم یا فولاد استیل ضد زنگ است که با مقطع دوزنقه‌ای شکل داده می‌شود و در بالای لوله آتشخوار نصب می‌گردد.

امروزه مدل‌های مختلفی از سامانه گرمایش تابشی لوله‌ای با توجه به تعداد مشعل‌ها، نحوه قرارگیری لوله‌ها و محل فن مکنده طراحی و به بازار عرضه شده‌اند. در بین انواع مدل‌ها، سامانه‌های گرمایش تابشی لوله‌ای با لوله آتشخوار به دو صورت خطی و U شکل رایج‌تر است (شکل ۷). نصب آسان سامانه‌های گرمایش تابشی لوله‌ای در قسمت بالای گلخانه، به صورت آویزان از سقف، و تابش به صورت عمودی از بالا به پایین، موجب برتری این سامانه‌ها نسبت به سامانه‌های تابشی سرامیکی برای کاربرد در گلخانه‌ها شده است.



شکل ۷- دو مدل سامانه گرمایش تابشی لوله‌ای خطی و U شکل

سامانه گرمایش تابشی چند مشعلی از یک یا چند لوله‌ی سرتاسری تشکیل شده که این لوله‌ها را تعدادی مشعل در فاصله‌های مشخص تغذیه می‌کنند و از طریق یک فن مکنده محصول احتراق از انتهای لوله خارج می‌شود (شکل ۸).



شکل ۸- سامانه گرمایش تابشی چند مشعلی (سجادی و همکاران، ۱۴۰۰).

۶- ویژگی‌های کاربرد سامانه گرمایش تابشی لوله‌ای در گلخانه

پیش از این گفته شد که انرژی گرمایی در سامانه تابشی از طریق امواج فرسرخ (مادون قرمز) منتقل می‌شوند. این امواج پس از برخورد با گیاه، کف گلخانه و بستر کشت، جذب و تبدیل به گرما می‌شوند. شکل ۹ نمونه‌ای از سامانه گرمایش تابشی نصب شده در گلخانه تولیدی گل شاخه بریده را نشان می‌دهد. در این روش، برخلاف سامانه‌های گرمایشی همرفتی، ابتدا گیاه و اجزای گلخانه و پس از آن هوای موجود در گلخانه گرم می‌شود. سامانه گرمایش تابشی حرارتی مانند حرارت خورشید فراهم می‌کند. در این حالت، دمای سطح خاک و سطح گیاه از دمای هوای گلخانه اندکی بالاتر است (حقوقی، ۱۳۸۸).



شکل ۹- استفاده از سامانه گرمایش تابشی لوله‌ای در گلخانه تولید گل شاخه بریده

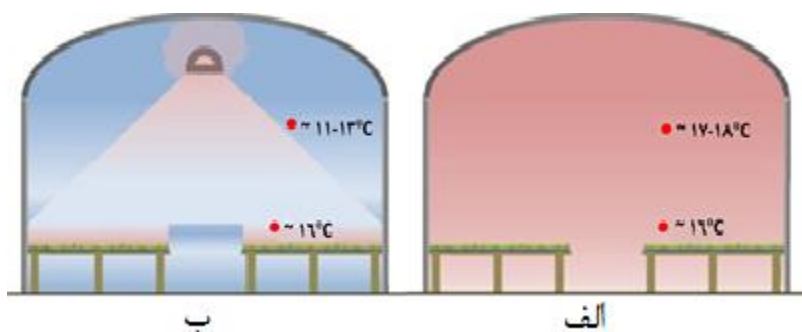
سیستم گرمایش تابشی هنوز تحت آزمایش است اما تاکنون مشخص شده است که این نوع از گرمایش برای محصولات کوتاه، مانند نشاها، قلمه‌ها و گیاهان گلدانی مانند شمعدانی و بنت قنسول بهتر است. درجایی که پوشش گیاهی انبوه است یا گیاهان بلند هستند (از جمله گوجه‌فرنگی، فلفل دلمه‌ای، خیار و غیره)، اثربخشی گرمایش تابشی کاهش می‌یابد. از دیگر مواردی که هنگام استفاده از این روش باید بدان توجه داشت، امکان سوختگی برگ محصول است (مومنی و همکاران، ۱۳۹۹).

همان‌گونه که گفته شد در خصوص کارایی سامانه‌های گرمایش تابشی در محصولات گلخانه‌ای با پوشش گیاهی بالا، تردیدهایی وجود دارد. با این همه، به دلایل متعددی استفاده از این نوع سامانه گرمایشی در گلخانه‌ها رو به گسترش است. ویژگی‌های کاربرد سامانه‌های گرمایش تابشی در گلخانه از دو منظر مصرف انرژی و عامل‌های گیاهی در زیر شرح داده می‌شود.

۶-۱- مصرف انرژی و راندمان حرارتی

بخش زیادی از گرمای گلخانه از طریق رسانش گرمایی و به واسطه تماس پوشش و دیواره‌های گلخانه با هوای سرد بیرون از دست می‌رود. در سامانه‌های گرمایشی کوره هوای گرم، به علت وجود اختلاف دما بین سقف و کف گلخانه و همچنین تجمع هوای گرم در زیر کمان سقفی گلخانه، تلفات حرارتی و در پی آن مصرف سوخت افزایش می‌یابد. ولی در سامانه گرمایش تابشی، گرمایش در سطوح پایین صورت می‌گیرد و اختلاف دمای سقف و نقاط مرتفع داخلی با محیط بیرون کم می‌شود و در نتیجه از افت حرارت نسبت به روش‌های همرفتی کاسته خواهد شد (شکل ۱۰). نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از سامانه‌های گرمایش تابشی در گلخانه‌ها، در مقایسه با سامانه‌های گرمایشی

همرفتی، موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی به میزان ۴۵-۵۰ درصد می‌شود (Kavga et al., 2012). استفاده از مشعل‌هایی با بازدهی بالا در ساختار سامانه گرمایش تابشی، نسبت به کوره‌های هوای گرم، می‌تواند موجب ۳۰-۱۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف انرژی شود (مومنی و همکاران، ۱۳۹۹).



شکل ۱۰- مقایسه اختلاف دمای زیر کمان سقفی گلخانه در دو سامانه گرمایشی الف: سامانه گرمایش هوای گرم ب: سامانل گرمایش تابشی (Kavga et al., 2015)

راندمان حرارتی کمیتی بدون بعد است که به‌منظور بررسی چگونگی عملکرد سامانه‌های گرمایشی از آن استفاده می‌شود. راندمان حرارتی سامانه گرمایشی نشان دهنده میزان جذب انرژی و مقدار کاری است با آن صورت می‌گیرد. بنابراین، راندمان یا بازدهی تاثیر مستقیم بر مقدار مصرف انرژی دارد. از مهم‌ترین عامل‌های کاهش راندمان حرارتی در سامانه‌های گرمایشی، اتلاف حرارتی دودکشی است که مقداری از حرارت تولید شده، همراه با گازهای حاصل از احتراق، به بیرون هدایت می‌شود و تلف می‌گردد. استفاده از مشعل‌هایی با

بازدهی بالا در ساختار سامانه‌های گرمایش تابشی، موجب افزایش راندمان حرارتی آنها تا ۹۸ درصد می‌شود (رحیمی و سالاری درودخانی، ۱۳۹۰).

۶-۲- عامل‌های گیاهی

همان گونه که گفته شد، توزیع یکنواخت و سریع پرتوهای تابشی گرم کننده در محیط گلخانه، از ویژگی‌های سیستم گرمایش تابشی است. در این روش، برخلاف سامانه‌های گرمایشی همرفتی، ابتدا گیاه و سطوح گلخانه و پس از آن هوای محیط گلخانه گرم می‌شود.

در گلخانه‌های با پوشش گیاهی و ارتفاع کم (گلخانه کشت نشاء، قلمه و...) بیشترین اشعه را بسترهای کشت و خاک جذب می‌کنند و گرم شدن خاک و بستر کشت باعث افزایش سرعت رشد گیاهان و یکنواختی در سبز شدن بذر می‌شود (Kavga et al., 2015).

در گلخانه‌های با پوشش گیاهی انبوه و گیاهان بلند (گلخانه‌های تولید گل‌های زینتی و محصولات تابستانی)، برگ و ساقه‌های گیاهی در معرض بیشترین سطح تماس اشعه تابشی هستند و از این رو ابتدا اندام‌های بالایی گیاه گرم می‌شود و پس از آن گرما به هوای محیط و سایر قسمت‌های گلخانه انتقال می‌یابد. در این شرایط، اندام‌های پایینی گیاه کمتر در معرض تابش اشعه قرار می‌گیرند. این مسئله از مهم‌ترین معایب گرمایش تابشی در گلخانه‌های با پوشش انبوه محسوب می‌شود (Pinty et al., 2009). احتمال سوختگی اندام‌های بالایی گیاه و نزدیک به منبع تابش نیز در گلخانه‌های با پوشش گیاهی انبوه وجود دارد که با نصب صحیح و اصولی سامانه گرمایش تابشی می‌توان اثرهای منفی کاربرد این نوع سامانه‌ها را کاهش داد.

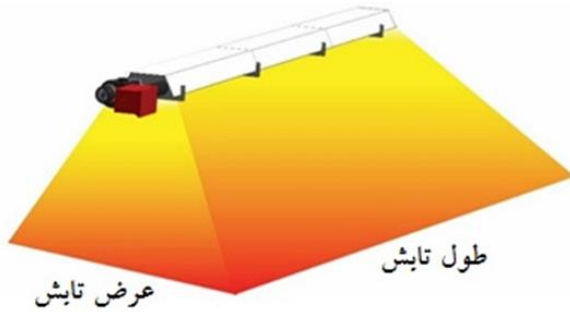
نتایج تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از سامانه گرمایش تابشی اندکی رشد بیماری‌های قارچی در گلخانه را کاهش می‌دهد. با توجه به اینکه اولین دریافت کننده انرژی گرمایی در گلخانه سطح برگ‌های گیاه است، رشد قارچ‌ها در این شرایط نسبت به سامانه‌های گرمایشی همرفتی کاهش می‌یابد. در حالی که در سامانه‌های گرمایشی همرفتی، دمای سطح گیاه کمتر از دمای هوای گلخانه است و این موضوع باعث ایجاد شبنم و افزایش رطوبت روی سطح گیاه و در نتیجه باعث افزایش بیماری‌های گیاه می‌شود (Brodie *et al.*, 2012).

در خصوص تاثیر سامانه گرمایش تابشی بر کنترل آفات گلخانه‌ای تاکنون نتیجه‌ای گزارش نشده است، آنچه مسلم است در گلخانه‌های تولید گل شاخه بریده، به ویژه رز که کنه از آفات مهم آن است، کانون‌های تجمع کنه شکل نمی‌گیرد. ولی در صورت استفاده از سیستم گرمایشی هوای گرم، فاصله ۴-۵ متری از دمنده‌ها کانون تجمع کنه است (فرجی و همکاران، ۱۳۸۹).

۷- اصول طراحی، نصب و کاربرد سامانه گرمایش تابشی لوله‌ای در گلخانه

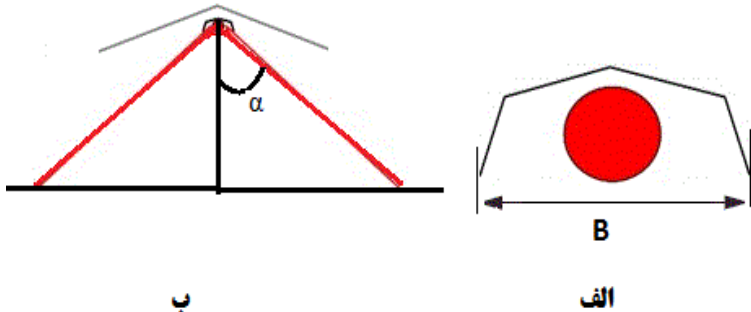
۷-۱- اصول طراحی و انتخاب

سطح پوششی سامانه‌های گرمایش تابشی لوله‌ای مطابق شکل ۱۱ است. برای توزیع یکنواخت دما در گلخانه باید سامانه‌های گرمایش تابشی به گونه‌ای انتخاب و نصب شوند که پرتوهای تابشی تمامی سطح گلخانه را پوشش دهند.



شکل ۱۱- سطح پوششی سامانه گرمایش تابشی لوله‌ای (سجادی و همکاران، ۱۴۰۰).

به‌طور معمول، شرکت‌های سازنده مشخصات فنی سامانه‌های گرمایش تابشی را به تفکیک مدل در دفترچه راهنمای دستگاه درج می‌کنند. این مشخصات شامل طول و عرض کلی دستگاه، وزن دستگاه، میزان گاز مصرفی، حداقل ارتفاع نصب، حداقل فاصله ایمنی، عرض تابش، سطح تابش و ظرفیت گرمایی است. طول و عرض تابش با توجه به شکل منعکس‌کننده‌های نصب شده روی سامانه‌های گرمایش تابشی متفاوت است. زاویه تابش (α) تابع قطر لوله آتشخوار و شکل و اندازه دهانه منعکس‌کننده (B) است (شکل ۱۲). اغلب در سامانه‌های گرمایش تابشی خطی، از منعکس‌کننده‌های با مقطع دوزنقه‌ای استفاده می‌شود که دهانه آنها ۳۰۰ میلی‌متر است و پرتوهای تابشی را با زاویه ۴۰ درجه از بالا به پایین منعکس می‌کنند. بر این اساس، طول و عرض تابش با استفاده از دو رابطه تجربی ۲ و ۳ به راحتی قابل محاسبه است (سجادی و همکاران، ۱۴۰۰).



شکل ۱۲- الف- دهانه منعکس کننده ب- زاویه تابش

$$\text{ارتفاع نصب} \times \frac{1}{8} = \text{عرض تابش} \quad (۲)$$

$$\text{طول لوله آتشیخور} + (\text{ارتفاع نصب} \times \frac{1}{8}) = \text{طول تابش} \quad (۳)$$

برای مثال، سامانه گرمایش تابشی با لوله آتشیخور به طول ۱۲ متر و ارتفاع نصب ۵/۵ متر دارای عرض و طول تابش به شرح زیر خواهد بود.

$$\text{متر} \quad ۹/۹ = \frac{۱}{۸} \times ۵/۵ = \text{عرض تابش}$$

$$\text{متر} \quad ۲۱/۹ = ۱۲ + (\frac{۱}{۸} \times ۵/۵) = \text{طول تابش}$$

سامانه‌های گرمایش تابشی لوله‌ای با اندازه‌ها و ظرفیت گرمایی متنوعی به بازار عرضه شده‌اند. از این رو نوع مناسب سامانه گرمایش تابشی برای گلخانه مطابق با نیاز گرمایی گلخانه انتخاب می‌شود. سامانه‌های گرمایش تابشی لوله‌ای به طول ۲ تا ۱۵ متر می‌توانند ۵۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰ کیلوکالری بر ساعت انرژی گرمایی تولید کنند. نوع معمول آنها دارای طول ۵ متر و ظرفیت گرمایی ۲۰۰۰۰ کیلوکالری بر ساعت است (سعیدی راد، ۱۳۹۸).

۷-۲- اصول نصب و کاربرد سامانه گرمایش تابشی در گلخانه

سامانه گرمایش تابشی (بخاری‌های تابشی) در قسمت بالای گلخانه از سقف به صورت آویزان نصب می‌شوند. اشغال‌نشدن فضای کشت یا راهروهای گلخانه از مزیت‌های اصلی این نوع سیستم گرمایشی است. استفاده حداکثر از فضای گلخانه به منظور کشت، به افزایش عملکرد در واحد سطح خواهد انجامید. هرچند مشکل دسترسی به سامانه‌های گرمایش تابشی برای تنظیم یا تعمیرات دوره‌ای، از معایب آنها محسوب می‌شود.

۷-۲-۱- حداقل ارتفاع نصب

محدوده خطر سامانه‌های گرمایش تابشی ۲/۵ متر است و از این رو در نصب آنها باید دقت شود تا لوله آتشخوار سامانه گرمایش تابشی در فاصله کمتر از ۲/۵ متر از افراد و گیاهان نصب نشود. این فاصله مربوط به آخرین مرحله رشد گیاه است. کمتر شدن فاصله از میزان توصیه شده برگ‌های گیاه را می‌سوزاند. در صورت بروز چنین مشکلی می‌توان از صفحات محافظ مشبک آلومینیومی استفاده کرد (سجادی و همکاران، ۱۴۰۰).

۷-۲-۲- چیدمان سامانه گرمایش تابشی‌ها

توزیع گرما در سامانه گرمایش تابشی U شکل یکنواخت‌تر است تا در مدل خطی (لوله مستقیم). زمانی که هدف گرمایش منطقه‌ای خاص باشد، سامانه گرمایش تابشی U شکل برتری دارد و زمانی که هدف گرمایش کل فضای گلخانه باشد، بهتر است از چندین سامانه گرمایش تابشی مدل خطی استفاده شود. شعاع تابش در سامانه گرمایش تابشی U شکل کمی بیشتر از شعاع تابش در نوع خطی است و دو لوله کنار هم دارای همپوشانی تابشی هستند. عرض تابش

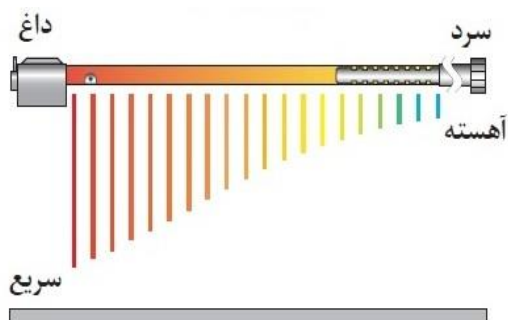
در سامانه گرمایش تابشی مدل خطی ۱۰-۹ متر است (سجادی و همکاران، ۱۴۰۰). از این رو سامانه گرمایش تابشی در گلخانه باید بدون فاصله و پشت سر هم نصب شوند و فاصله هر ردیف از ردیف کناری ۱۰ متر توصیه می‌شود (شکل ۱۳).



دو ردیف سامانه گرمایش تابشی با فاصله ۱۰ متر از یکدیگر

شکل ۱۳- چیدمان سامانه گرمایش تابشی در گلخانه

الگوی توزیع حرارت و شعله در سامانه گرمایش تابشی در طول آن مطابق شکل ۱۴ است. همان گونه که مشاهده می‌شود، در ابتدای لوله آتشخوار، به علت وجود شعله زیادتر، میزان تابش نیز شدیدتر است. به منظور توزیع یکنواخت‌تر پرتوهای تابشی در محیط گلخانه، لازم است شکننده اشعه تابشی که به آن سپر حرارتی نیز گفته می‌شود در فاصله ۳-۱/۵ متری ابتدای لوله نصب شود (شکل ۱۵).



شکل ۱۴- الگوی حرارت و شعله در سامانه گرمایش تابشی (سجادی و همکاران، ۱۴۰۰).



شکل ۱۵- نصب سیلر حرارتی در ابتدای لوله سامانه گرمایش تابشی

۷-۲-۳- اصول ایمنی نصب و کاربرد

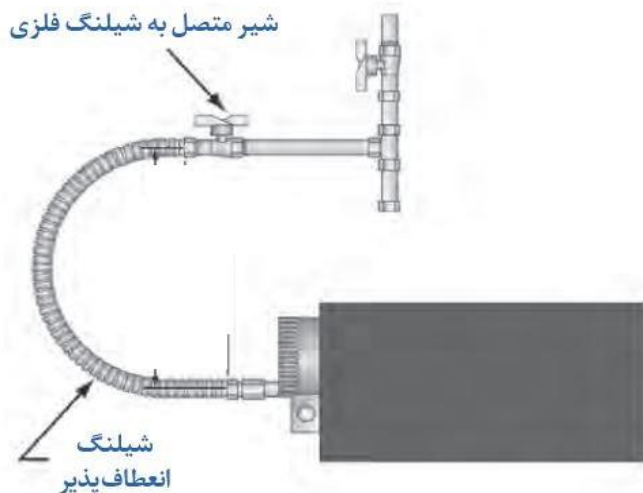
باتوجه به اینکه دستگاه گرمایش تابشی باید به سقف متصل شود، می‌توان از سازه سقف به عنوان نگهدارنده دستگاه استفاده کرد. در سازه‌های فلزی گلخانه‌ها، دستگاه با زنجیر از سقف آویزان می‌شود. تعداد بست‌ها و زنجیرها با توجه به

دستورالعمل کارخانه سازنده و وزن دستگاه مشخص می‌شود. لوله تأمین گاز و سیم یا کابل برق نباید به عنوان آویز استفاده شوند و وزنی را تحمل کنند.

به منظور یکنواختی توزیع گرما در سطح گلخانه، لازم است هر دستگاه گرمایش تابشی را با یک ترموستات کنترل کرد. برق مصرفی دستگاه تک فاز است و نیاز خواهد بود تا هر دستگاه به یک کلید قطع و وصل جداگانه متصل شود و محل قرارگیری کلید در نزدیکی دستگاه باشد تا روشن و خاموش کردن آن در کوتاه‌ترین زمان میسر باشد.

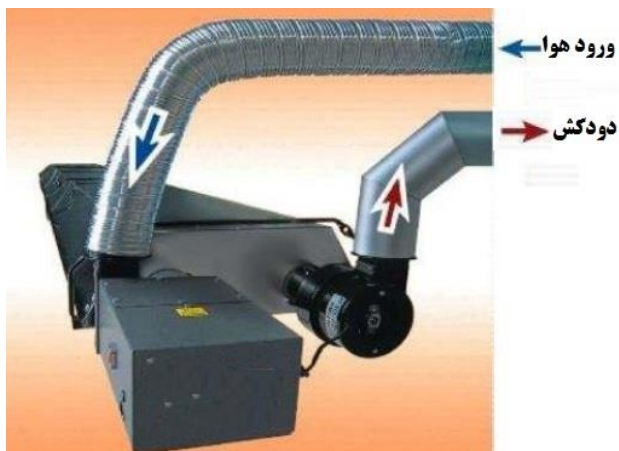
لوله تأمین گاز تا نزدیکی سامانه تابشی سقفی (فاصله ۵۰ سانتی‌متری) کشیده می‌شود. قطر لوله گاز نصب شده نباید از قطر لوله گاز روی مشعل دستگاه کوچک‌تر باشد. برای اتصال گاز به ورودی گاز دستگاه از شیلنگ انعطاف‌پذیر از جنس فولاد ضدزنگ و روکش دار استفاده می‌شود. به منظور حفظ ایمنی و رعایت قوانین شرکت ملی گاز ایران در خصوص نحوه لوله‌کشی گاز، برای هر مشعل یک شیر قطع کن در فاصله یک متری از مشعل و یکی دیگر در فاصله ۷۰ سانتی‌متری از کف گلخانه در محل نصب قرار گیرد. شیر قطع و وصل گاز متصل به شیلنگ باید بالاتر از مشعل دستگاه و موازی با ورود گاز به مشعل باشد (شکل ۱۶).

با توجه به گاز سوز بودن مشعل دستگاه، ضروری است سایز لوله گاز کشیده شده در محل دستگاه با مشخصات فنی اشاره شده در جدول شرکت ملی گاز ایران تطابق داشته باشد (بی‌نام ۱۳۸۹). فشار گاز مورد نیاز و میزان مصرف هر دستگاه مطابق با مدل و ظرفیت حرارتی آن متفاوت است و در دفترچه راهنما ذکر شده است.



شکل ۱۶- نحوه اتصال شیلنگ گاز به مشعل دستگاه (سجادی و همکاران، ۱۴۰۰)

مقدار هوای مورد نیاز برای احتراق کامل در سامانه‌های گرمایش تابشی ۱۳-
۱۱ برابر حجم گاز مصرفی هر دستگاه است. اگر تهویه کافی در سالن وجود
داشته باشد، اکسیژن مورد نیاز برای احتراق از طریق تهویه عمومی سالن تأمین
می‌شود. در فضاهای فاقد تهویه کافی، برای هر دستگاه با متصل کردن لوله‌های
مستقل، هوای مورد نیاز احتراق از خارج سالن تأمین می‌شود. برای خروج
محصول احتراق، به دودکش نیاز است تا گازهای حاصل از احتراق را به بیرون از
سالن منتقل کند (شکل ۱۷).



شکل ۱۷- لوله‌های ورود هوا و خروج دود

۸- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

تأمین گرمایش یکنواخت با راندمان بالا در سطح گلخانه، علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی، افزایش عملکرد محصول را نیز در پی خواهد داشت که منجر به افزایش بهره‌وری انرژی خواهد شد. صرفه‌جویی در مصرف سوخت، نیاز بسیار کمتر به انرژی الکتریکی، امکان منطقه‌بندی دمایی، اشغال‌نشدن فضای کشت و تجمع‌نیافتن گرما در زیر سقف از مهم‌ترین مزایای استفاده از سامانه‌های گرمایش تابشی در گلخانه‌هاست.

در سامانه‌های گرمایش تابشی، ابتدا قسمت‌هایی از گیاه و سطوح گلخانه گرم می‌شود که در معرض تابش باشند؛ پس از آن، هوای محیط گلخانه گرم می‌شود. در این حالت، دمای قسمت‌های مختلف گیاه با هم متفاوت است و سطح رویی برگ‌ها که در معرض تابش قرار دارد از سطح زیرین برگ‌ها گرم‌تر خواهد بود. سایه‌اندازی‌ها و زوایای برخورد متفاوت پرتوهای تابشی به گیاه، به‌ایجاد

تفاوت دمای اندام‌های گیاهی می‌انجامد. مشخص شدن تأثیر این اختلاف دمایی بر فیزیولوژی گیاهان و عملکرد محصولات، نیاز به تحقیقات کاربردی بیشتر در این زمینه دارد.

استفاده از این سامانه‌های گرمایشی نیز دارای محدودیت‌هایی است مانند ارتفاع نصب، نوع محصول و نحوهٔ چیدمان و انتخاب سامانهٔ گرمایش تابشی با ظرفیت گرمایی مناسب، که لازم است در زمان نصب و راه‌اندازی آنها مورد توجه قرار گیرند.

انتقال سوخت مایع به قسمت بالای گلخانه مشکل است و به همین دلیل سامانه‌های گرمایش تابشی مورد استفاده در گلخانه‌ها به اجبار باید گازسوز باشند. تک سوختی بودن این سامانه‌ها از مهم‌ترین محدودیت‌های کاربردی آنها در گلخانه‌هاست.

فرآیند احتراق در مشعل‌های سامانهٔ گرمایش تابشی راندمان بالایی دارد و آلودگی آن در مقایسه با حجم هوای سالن ناچیز است، ولی به‌منظور جلوگیری از انتشار گاز دی‌اکسیدکربن، و در صورت احتراق ناقص گاز مونوکسیدکربن، لازم است از دودکش استفاده شود.

در نصب و راه‌اندازی سامانهٔ گرمایش تابشی، توجه به نکات ضروری و توصیه‌های اعلام شده در دفترچهٔ راهنمای سازنده دستگاه، ضروری است.

۹- فهرست منابع

- بابایی، ا. ۱۳۹۹. انتقال حرارت (چاپ ششم). مرکز نشر جهش. ۸۹۶ صفحه.
- بی‌نام. ۱۳۸۹. مقررات ملی ساختمان: مبحث هفدهم، لوله کشی گاز طبیعی. انتشارات توسعه ایران. ۱۸۹ صفحه.

حقوقی، ن. ۱۳۸۸. گرمایش تابشی (نگاهی علمی-کاربردی). انتشارات یزدا، ۱۶۸ صفحه.

سجادی، س. و، صادق پور، ح.، عبدالهی، غ. و موسی زاده، س. م. ۱۴۰۰. نصب و راه‌اندازی پخش‌کننده‌های گرمایشی و تابشی. شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، سازمان پژوهش‌ها و برنامه‌ریزی آموزشی، وزارت آموزش و پرورش، ۲۶۸ صفحه.

رحیمی، م. و سالاری دورودخانی، ا. ۱۳۹۰. بررسی و بهبود عملکرد بخاری گازسوز با محفظه احتراق بسته. سومین کنفرانس بین‌المللی گرمایش، سرمایه‌ش، و تهیه مطبوع.

سعیدی راد، م. ح. ۱۳۹۸. اصول مهندسی سازه‌ها و تاسیسات گلخانه‌ای. انتشارات تحقیقات آموزش کشاورزی، ۱۸۲ صفحه.

فرجی، ف.، صبوری، ع. و زاهدی گلپایگانی، آ. ۱۳۸۹. کنه‌های گلخانه‌ای: شناسایی، زیست‌شناسی و کنترل. موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه تهران، ۳۰۸ صفحه.

مومنی، د.، رضوانی، س. م. و زارعی، ق. ۱۳۹۹. راهنمای جامع مدیریت مصرف انرژی گرمایشی در گلخانه‌ها. نشر آموزش کشاورزی، ۹۰ صفحه.

Brodie, G., Ryan, C., & Lancaster, C. 2012. Microwave technologies as part of an integrated weed management strategy: A review. *International Journal of Agronomy*, 2012.

Kavga, A., Alexopoulos, G., Bontozoglou, V., Pantelakis, S., & Panidis, T. 2012. Experimental investigation of the energy needs for a conventionally and an infrared-heated greenhouse. *Advances in Mechanical Engineering*, 4, 789515.

- Kavga, A., Konstas, I., & Panidis, T. 2015. Assessment of Infrared Heating Benefits in a Production Greenhouse. *Applied Engineering in Agriculture*, 31(1), 143-151.
- Pinty, B., Lavergne, T., Widlowski, J. L., Gobron, N., & Verstraete, M. M. 2009. On the need to observe vegetation canopies in the near-infrared to estimate visible light absorption. *Remote Sensing of Environment*, 113(1),