اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره وری
مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی
۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵

مروری بر تحلیل مصرف انرژی گلخانه‌ها متناسب با عملکرد، اقلیم و نوع محصول

خشایار زارع [۱]، احمد حسین‌نژاد [۲,*]

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: zare.khashayar@ut.ac.ir

۲- استادیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ah.hosseinnejad@ut.ac.ir

خلاصه

مصرف انرژی در گلخانه‌ها تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل پیچیده قرار دارد که مهم‌ترین آن‌ها اقلیم منطقه، نوع محصول تولیدی و عملکرد گلخانه است. این مطالعه با مرور و تحلیل مقالات علمی اخیر، ارتباط متقابل این عوامل را با مصرف انرژی بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که اقلیم نقش اصلی در تعیین میزان و الگوی مصرف انرژی دارد؛ گلخانه‌های واقع در مناطق سرد و عرض‌های جغرافیایی بالا به دلیل نیاز شدید به گرمایش و نور مصنوعی، مصرف انرژی بالاتری نسبت به مناطق معتدل یا گرم دارند. علاوه بر اقلیم، نوع محصول به‌طور قابل توجهی الگوی مصرف انرژی را شکل می‌دهد؛ محصولات با نیازهای فیزیولوژیک بالاتر مانند گوجه‌فرنگی و خیار، مصرف انرژی بیشتری را تحمیل می‌کنند، در حالی که محصولات دیگر با مصرف انرژی کمتر می‌توانند بازده قابل قبولی داشته باشند. در نهایت، عملکرد محصول به‌عنوان شاخص کارایی انرژی عمل می‌کند و تحلیل مصرف انرژی به‌ازای واحد محصول، بهره‌وری انرژی و انرژی ویژه، ابزار مناسبی برای بهینه‌سازی سیستم‌های تولیدی و مقایسه سناریوهای مختلف فراهم می‌کند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مصرف انرژی بیشتر لزوماً با افزایش عملکرد متناسب نیست و بهینه‌سازی انرژی باید با هدف دستیابی به بیشترین عملکرد با حداقل مصرف انرژی انجام شود. به‌طور کلی، این مطالعه بر اهمیت توسعه چارچوب‌های یکپارچه برای تحلیل همزمان تأثیر اقلیم، نوع محصول و عملکرد در مصرف انرژی گلخانه‌ها تأکید دارد و نشان می‌دهد که چنین رویکردی می‌تواند به کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری انرژی و حرکت به سوی کشاورزی پایدار در محیط های کنترل شده مانند گلخانه کمک کند.

کلمات کلیدی: گلخانه، مصرف انرژی، اقلیم، نوع محصول، عملکرد محصول، بهره‌وری انرژی، ، کشاورزی پایدار

۱. مقدمه

بر اساس برآوردهای بین‌المللی، جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۱۰ میلیارد نفر افزایش خواهد یافت که سهم قابل‌توجهی از این رشد مربوط به کشورهای در حال توسعه است [1]. این روند افزایشی موجب خواهد شد تا تأمین هم‌زمان انرژی، آب و غذا و همچنین مدیریت تعامل آن‌ها با محیط‌زیست، به یکی از اساسی‌ترین چالش‌های پیش‌روی بشر در دهه‌های آینده تبدیل شود. در این راستا، پژوهشگران و سیاست‌گذاران به دنبال راهکارهایی هستند که بتوان از طریق افزایش تولید در واحد سطح و کاهش مصرف نهاده‌ها، کمبودهای غذایی را به شکلی پایدار جبران کرد. بهره‌گیری از ارقام پرمحصول و تخصصی، استفاده بهینه از انواع کودها و آفت‌کش‌های شیمیایی، و توسعه سامانه‌های کشت گلخانه‌ای از جمله راهبردهای کلیدی مطرح در این زمینه به شمار می‌روند [2].

کشت گلخانه‌ای در سراسر جهان به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش عملکرد محصولات، تثبیت تولید در طول سال و بهبود کیفیت محصول در مقایسه با کشاورزی فضای باز در حال گسترش است. با این حال، این گسترش با تقاضای بالای انرژی برای تأمین گرمایش، سرمایش، تهویه و روشنایی همراه است، به‌گونه‌ای که سامانه‌های گلخانه‌ای به‌عنوان یکی از

پرمصرف‌ترین بخش‌ها از نظر انرژی در بخش کشاورزی شناخته می‌شوند [3].

تولید محصولات کشاورزی نه‌تنها به بهره‌گیری کارآمد از انرژی خورشیدی از طریق فرایند فتوسنتز وابسته است، بلکه به میزان قابل‌توجهی به مصرف انرژی حاصل از منابع فسیلی نیز متکی است. این وابستگی می‌تواند به‌صورت مستقیم، از طریق مصرف سوخت‌ها و انرژی الکتریکی، و یا به‌صورت غیرمستقیم، از طریق به‌کارگیری ماشین‌آلات کشاورزی، تولید و مصرف کودها و آفت‌کش‌ها، بروز یابد [4]. در حالی که در بسیاری از مطالعات، بحث مصرف انرژی در بخش کشاورزی و گلخانه‌ای عمدتاً بر مصرف مستقیم انرژی متمرکز شده است، شواهد نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از کل مصرف انرژی، معادل ۵۰ درصد یا حتی بیش از آن، به مصرف غیرمستقیم انرژی اختصاص دارد؛ به‌ویژه انرژی صرف‌شده در فرایند تولید کودهای نیتروژنه که سهم عمده‌ای در تراز انرژی سامانه‌های کشاورزی و گلخانه‌ای ایفا می‌کند [5, 6].

نتایج مطالعات انجام‌شده در کشور نشان می‌دهد که میزان کل نهاده انرژی از ۱۱۱/۵ مگاژول در سال ۱۳۵۰ به ۳۷۸/۱۵ مگاژول در سال ۱۳۸۰ افزایش یافته است. همچنین، انرژی ستانده نیز در همین بازه زمانی از ۱۲۲/۳۹ به ۳۸۴/۶۰ مگاژول افزایش داشته است. با وجود این افزایش‌ها، مقایسه روند رشد نهاده‌ها و ستانده‌ها حاکی از آن است که افزایش مصرف نهاده‌های انرژی در بخش کشاورزی همواره متناسب با افزایش تولید نهایی نبوده است. این عدم تناسب بیانگر ناکارآمدی در مصرف انرژی در سامانه‌های تولید کشاورزی است که می‌تواند پیامدهای نامطلوب زیست‌محیطی متعددی از جمله افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تشدید گرمایش زمین و کاهش پایداری سیستم‌های تولید کشاورزی را به دنبال داشته باشد [22]. مصرف انرژی به‌طور مستقیم بر هزینه‌های تولید و ردپای زیست‌محیطی کشت گلخانه‌ای از طریق انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط تأثیر می‌گذارد. در برخی سامانه‌های پیشرفته گلخانه‌ای، مصرف انرژی مربوط به گرمایش به‌تنهایی بخش عمده‌ای از کل مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهد و مجموع نهاده‌های انرژی می‌تواند به چندین هزار گیگاژول در هر هکتار در سال برسد؛ موضوعی که نگرانی‌هایی را در خصوص پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی بلندمدت این سامانه‌ها ایجاد می‌کند [7].

مصرف انرژی در گلخانه‌ها یکنواخت نیست و به‌شدت تحت تأثیر عملکرد فنی سازه و تجهیزات (از جمله طراحی، عایق‌بندی و راهبردهای کنترلی)، شرایط اقلیمی بیرونی (دما، تابش خورشیدی، رطوبت و سرعت باد) و نوع محصول کشت‌شده (نیازهای حرارتی، تراکم کاشت و چرخه تولید) قرار دارد. به‌عنوان مثال، در مناطق سردسیر، تقاضای گرمایش عامل غالب در مصرف انرژی گلخانه‌ها است، در حالی که در مناطق گرم یا خشک، بارهای قابل‌توجهی از سرمایش و تهویه مشاهده می‌شود. همچنین شدت مصرف انرژی بین محصولات مختلفی مانند گوجه‌فرنگی [8]، خیار [9]، سبزی‌های برگی [10] و گیاهان زینتی [11] تفاوت چشمگیری دارد [12].

اگرچه مطالعات متعددی به‌طور جداگانه به بهبودهای فنی، تأثیرات اقلیمی یا شاخص‌های مصرف انرژی وابسته به نوع محصول پرداخته‌اند، همچنان نیاز به یک تحلیل یکپارچه وجود دارد که این ابعاد را به یکدیگر مرتبط ساخته و الگوهای مصرف انرژی را تبیین کرده و فرصت‌های بهینه‌سازی را شناسایی کند. هدف این مرور علمی تحلیل مصرف انرژی در گلخانه‌ها بر اساس عملکرد فنی، شرایط اقلیمی و نوع محصول کشت‌شده، با تلفیق شواهد موجود و برجسته‌سازی راهبردهایی که به‌طور هم‌زمان موجب بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش انتشار آلاینده‌ها و حفظ یا ارتقای بهره‌وری محصول می‌شوند.

گزارش‌های تحلیل مصرف انرژی گلخانه‌ها متناسب با اقلیم

بخشی از مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که اقلیم مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده مصرف انرژی در گلخانه‌ها است. شرایط دمایی، میزان تابش خورشیدی، طول دوره‌های سرد و نیاز به گرمایش یا روشنایی مصنوعی، مستقیماً تحت تأثیر اقلیم قرار دارند. در مناطق سرد و عرض‌های جغرافیایی بالا، مصرف انرژی عمدتاً به گرمایش و تأمین نور اختصاص دارد، در حالی که در اقلیم‌های معتدل و گرم‌تر، مصرف انرژی به‌صورت متوازن‌تری میان گرمایش، سرمایش، آبیاری و سایر نهاده‌ها توزیع

می‌شود. مطالعات مقایسه‌ای نشان می‌دهند که حتی با یکسان بودن نوع گلخانه و محصول، اختلاف اقلیم می‌تواند منجر به تفاوت چشمگیر در مصرف انرژی شود. از این رو، طراحی گلخانه، انتخاب تجهیزات و راهبردهای مدیریت انرژی باید همواره متناسب با شرایط اقلیمی منطقه انجام گیرد (جدول ۱).

جدول ۱- مقالات نوشته شده به همراه نتایج آن‌ها در بخش تحلیل اقلیم بر مصرف انرژی

رفرنس	روش	نتیجه کلیدی
[13]	تحلیل تلفات حرارتی، انتخاب سیستم گرمایش بهینه، مدل‌سازی CFD و کنترل هوشمند در گلخانه	آرایش بهینه یونیت‌هیترها موجب صرفه‌جویی سالانه حدود ۵۴۴۷ m^3 گاز طبیعی شد
[7]	مرور سیستماتیک مصرف انرژی در بخش کشاورزی گلخانه‌ای اتحادیه اروپا؛ بررسی تفاوت مصرف انرژی در سیستم‌های پرانرژی (شمال اروپا) و کم‌انرژی (جنوب اروپا)؛ تحلیل روش‌های بهره‌وری انرژی و منابع انرژی تجدیدپذیر	مصرف انرژی گلخانه‌ها به شدت وابسته به اقلیم و نوع سیستم است؛ سیستم‌های پرانرژی شمال اروپا عمدتاً تحت کنترل شدید آب و هوا و مصرف انرژی بالا هستند، در حالی‌که سیستم‌های کم‌انرژی جنوب اروپا مصرف متنوعی از انرژی (گرمایش، سرمایش، آبیاری، روشنایی، کود و سم) دارند؛ کمبود مطالعات دقیق و روش‌های یکپارچه وجود دارد و پیشنهاد شده چارچوبی برای اندازه‌گیری انرژی گلخانه‌ها ایجاد شود
[14]	شبیه‌سازی اثر تغییرات اقلیم آینده (۲۰۸۰) بر مصرف انرژی و عملکرد محصول در گلخانه‌های کانادایی	با افزایش دما و تغییر اقلیم، نیاز گرمایشی کاهش یافته و مصرف انرژی کلی تا حدود ۱۱٪ کاهش می‌یابد، اما با کاهش راندمان عملکرد محصول (حدود ۱۷٪)، نیاز به تکنولوژی‌های سردکننده جدید احساس می‌شود. این اثرات به‌صورت مکان‌محور متفاوت است.
[15]	مرور سیستم‌های کنترل اقلیم و سیستم‌های خنک‌کننده در مناطق گرم و خشک	مدیریت اقلیم و کنترل دما/رطوبت مطابق با شرایط اقلیمی خارج می‌تواند به مصرف بهینه انرژی منجر شود، به‌خصوص در مناطقی با دمای بالا که نیاز به خنک‌سازی شدید دارند.
[16]	تحلیل علمی رابطه کنترل اقلیم داخلی گلخانه و مصرف انرژی تحت شرایط مختلف اقلیمی	مقدار انرژی مصرفی ارتباط مستقیم با متغیرهای اقلیمی خارجی (دما، تابش خورشیدی، رطوبت) دارد و طراحی پوشش/مواد گلخانه می‌تواند به‌طور قابل توجهی مصرف انرژی اقلیمی را کاهش دهد.

گزارش‌های تحلیل مصرف انرژی گلخانه‌ها متناسب با نوع محصول

تحقیقات علمی نشان می‌دهند که نوع محصول تولیدشده در گلخانه یکی از عوامل مؤثر بر الگوی مصرف انرژی است و این تأثیر را می‌توان در تفاوت‌های قابل‌توجه در مصرف انرژی برای محصولات مختلف مشاهده کرد. بررسی‌های انجام‌شده در بخش‌های مختلف اتحادیه اروپا نشان داده‌اند که حتی در ساختارهای گلخانه‌ای مشابه، میزان انرژی مصرفی برای محصولات گوناگون از جمله گوجه‌فرنگی و خیار تفاوت دارد و بخش بزرگی از این مصرف به نیازهای گرمایشی، تهویه و تأمین شرایط

محیطی اختصاص می‌یابد. برای مثال، در گزارش انرژی مصرفی گلخانه‌ها در آلمان و هلند برای کشت گوجه‌فرنگی و خیار مقادیر قابل‌توجهی انرژی (بیش از ۱۳,۰۰۰ گیگاژول در هکتار) گزارش شده است که نشان‌دهنده وابستگی این مصرف به الزامات فیزیولوژیک محصول و مدیریت اقلیم داخلی است، حتی زمانی که ساختار تکنولوژی مشابه باشد [7].

در مطالعات موردی دیگر نیز مشخص شده که کارایی مصرف انرژی و میزان انرژی مصرفی بین محصولات مختلف تفاوت دارد؛ به‌طور مثال در تحلیل انرژی تولید خیار و گوجه‌فرنگی در گلخانه، کارایی انرژی در تولید گوجه‌فرنگی بالاتر گزارش شده است، که نشان‌دهنده این است که برخی محصولات می‌توانند با مقدار کمتر انرژی نسبت به محصول دیگر، خروجی انرژی بیشتری تولید کنند یا اثرات زیست‌محیطی کمتری داشته باشند [11].

افزون بر این، مقایسه‌های ساختاری در سیستم‌های گلخانه‌ای مختلف برای محصولات متنوع مانند خیار، گوجه‌فرنگی و بادمجان نشان داده است که باز هم مصرف انرژی تابع نوع محصول است و محصولاتی که نیازهای محیطی خاص‌تری دارند ممکن است انرژی بیشتری مصرف کنند یا کارایی انرژی متفاوتی داشته باشند [10]. این تفاوت‌ها ناشی از نیازهای فیزیولوژیک محصول، دوره رشد، نیاز حرارتی و نوری و همچنین مدیریت نهاده‌ها در طول دوره رشد است که باعث ایجاد الگوهای متفاوت مصرف انرژی برای هر محصول می‌شود (جدول ۲).

جدول ۲- مقالات نوشته شده به همراه نتایج آن‌ها در بخش تحلیل نوع محصولات بر مصرف انرژی

رفرنس	روش	نتیجه کلیدی
[7, 17]	بررسی مصرف انرژی در گلخانه برای تولیدهای مختلف (گوجه‌فرنگی، خیار و سایر محصولات) تحلیل داده‌های انرژی درEU	مصرف انرژی در تولید گوجه‌فرنگی و خیار در گلخانه بسیار بالا بوده و وابسته به نیازهای گرمایش/نور داخلی است؛ این مصرف برای هر محصول در هر کشور متفاوت است و نشان می‌دهد نوع محصول بر الگوی مصرف انرژی تأثیر دارد. داده‌ها در برخی کشورها برای گوجه و خیار مقایسه‌شده‌اند که حدود ۱۳,۰۰۰ GJ/ha بود که بخش بزرگی از آن برای گرمایش است
[11]	ارزیابی مصرف انرژی و شاخص‌های محیط‌زیست در تولید خیار و گوجه در گلخانه	نتایج نشان داد که انرژی مصرفی برای گوجه‌فرنگی و خیار متفاوت است و کارایی انرژی گوجه بالاتر از خیار است؛ همچنین سهم انرژی غیرقابل تجدید و اثرات محیط‌زیستی آن‌ها نیز تفاوت داشت
[10]	مقایسه مصرف انرژی برای محصولات مختلف (خیار، گوجه، بادمجان) در گلخانه‌های مختلف	مصرف انرژی در کیس‌های آزمایشی برای خیار، گوجه و بادمجان گزارش شد و مشخص شد که مصرف انرژی با نوع محصول متفاوت است (خیار بیشترین مصرف را در بعضی ساختارها داشته) و اثرات محیطی نیز با محصول ارتباط دارد.

گزارش‌های تحلیل مصرف انرژی گلخانه‌ها متناسب با عملکرد

تحقیقات علمی مختلف نشان داده‌اند که تحلیل مصرف انرژی گلخانه‌ها در ارتباط مستقیم با عملکرد محصول، به‌ویژه زمانی که انرژی مصرفی به‌عنوان ورودی در برابر بازده محصول (خروجی) قرار می‌گیرد، یک شاخص کلیدی برای ارزیابی کارایی انرژی در تولید گلخانه‌ای به‌شمار می‌رود. در این رویکرد، تمرکز بر این است که چه مقدار انرژی) مثلاً در واحد MJ یا (kWh برای تولید یک واحد محصول kg) یا (ton مصرف می‌شود و چگونه می‌توان این نسبت را بهبود بخشید. مطالعه‌ای که به توسعه یک چارچوب یکپارچه از مدل مصرف انرژی–کارایی محصول پرداخت، نشان داد که به‌کارگیری چنین مدلی باعث کاهش قابل‌توجه هزینه و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، زیرا بهینه‌سازی مصرف انرژی با توجه به عملکرد واقعی

محصول می‌تواند بهره‌وری سیستم را افزایش دهد و مصرف انرژی به‌ازای هر واحد محصول را کاهش دهد [18].

در بررسی‌های موردی خاص مثل تولید خیار در گلخانه‌های استان یزد، مشخص شد که کارایی انرژی (Energy Productivity) به نسبت kg/MJ برای محصول خیار مقدار ۰/۱۲ گزارش شده که نشان می‌دهد مصرف انرژی نسبت به سطح عملکرد (محصول برداشت‌شده) چقدر مؤثر بوده است و بخش بزرگی از انرژی مصرفی مرتبط با نهاده‌هایی مانند سوخت و برق بوده است که مستقیماً بر عملکرد محصول تأثیر می‌گذارند [19]. این موضوع در مطالعات دیگر نیز مشاهده شده است؛ برای مثال در تولید گوجه‌فرنگی در گلخانه‌های زمستانی، اندازه‌گیری انرژی ورودی و میزان عملکرد محصول باعث شد شاخص‌های انرژی خاص و نسبت خروجی به ورودی انرژی به‌روشنی تبیین شوند، که این شاخص‌ها ابزارهای کاربردی برای مقایسه بهره‌وری انرژی در سناریوهای مختلف تولید محصول است [20].

علاوه بر این، در بررسی گلخانه‌های مجهز به سیستم‌های انرژی نو (مثل سیستم‌های فتوولتاییک یکپارچه)، تحلیل نشان داد که انرژی مصرفی به‌ازای هر کیلوگرم محصول (مثلاً گوجه‌فرنگی) در سناریوهایی می‌تواند کاهش یابد، که این مسئله به‌ویژه برای ارزیابی اقتصادی و پایداری سیستم‌های تولیدی مهم است و نشان می‌دهد چگونه بهبود در مصرف انرژی می‌تواند به بهبود عملکرد نهایی منجر شود [21].

به‌طور خلاصه، این مقالات یک تصویر روشن از این می‌دهند که در تحلیل مصرف انرژی گلخانه‌ها عملکرد محصول نه تنها به عنوان نتیجه تولید بلکه به‌عنوان معیاری برای سنجش کارایی انرژی باید در نظر گرفته شود. این رویکرد امکان مقایسه سناریوهای مختلف، ارزیابی مدیریت انرژی و تصمیم‌گیری در مورد انتخاب فناوری‌ها و نهاده‌های مناسب را در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی و عملکرد اقتصادی فراهم می‌آورد (جدول ۳).

جدول ۳- مقالات نوشته شده به همراه نتایج آن‌ها در بخش تحلیل عملکرد بر مصرف انرژی

رفرنس	روش	نتیجه کلیدی
[18]	مدل‌سازی و بهینه‌سازی همزمان مصرف انرژی و عملکرد محصول در گلخانه سنتی گوجه‌فرنگی؛ مدلسازی انرژی و عملکرد محصول برای کاهش هزینه و مصرف انرژی	استفاده از مدل یکپارچه مصرف انرژی عملکرد محصول باعث کاهش هزینه انرژی و انتشار CO_2 می‌شود؛ افزایش بهره‌وری انرژی و بهینه‌سازی انرژی به‌ازای هر واحد عملکرد مشاهده شد.
[19]	تحلیل مصرف انرژی و کارایی انرژی (kg/MJ) در تولید خیار گلخانه‌ای؛ بررسی سهم ورودی‌ها در انرژی و اثراتGWP	انرژی مصرفی کل GJ/ha ۱۲۸۴ و کارایی انرژی kg/MJ ۰/۱۲ گزارش شد؛ ماشین‌آلات، سوخت و نهاده‌ها تأثیر معناداری بر عملکرد نهایی محصول و مصرف انرژی داشتند.
[20]	بررسی رابطه بین انرژی ورودی و عملکرد محصول (kg/ha) در گلخانه زمستانی گوجه‌فرنگی	مصرف انرژی MJ/ha ۶۱,۴۳۴ و عملکرد kg/ha ۵۷,۹۰۵ ؛ شاخص‌های کارایی انرژی و انرژی خاص تعیین شدند که نشان می‌دهد با انرژی کمتر می‌توان عملکرد مؤثر داشت.
[21]	مدل‌سازی انرژی مصرفی به‌ازای محصول در گلخانه با پنل‌هایPV ؛ محاسبه انرژی به ازای کیلوگرم محصول	انرژی مصرفی به‌ازای تولید kg ۱ گوجه‌فرنگی برابر kWh/kg ۱۴.۸۸ بود و این مقدار با استفاده از PV کاهش قابل توجهی یافت

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی و تحلیل مطالعات علمی انجام‌شده نشان می‌دهد که مصرف انرژی در گلخانه‌ها پدیده‌ای چندبعدی و وابسته به مجموعه‌ای از عوامل درهم‌تنیده است که در میان آن‌ها، اقلیم، نوع محصول و عملکرد نقش اساسی و تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کنند. نتایج این پژوهش‌ها به‌طور واضح نشان می‌دهد که نمی‌توان مصرف انرژی گلخانه‌ای را صرفاً با تمرکز بر یک عامل تحلیل کرد، بلکه لازم است این سه مؤلفه به‌صورت هم‌زمان و در چارچوبی یکپارچه مورد بررسی قرار گیرند تا تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری‌ها به سمت بهره‌وری بیشتر انرژی و پایداری تولید هدایت شوند.

از منظر اقلیمی، مطالعات نشان می‌دهند که اقلیم مهم‌ترین عامل پایه‌ای در تعیین میزان مصرف انرژی گلخانه‌ها است. شرایط دمایی، میزان تابش خورشیدی، طول دوره‌های سرمایی و ویژگی‌های اقلیم منطقه‌ای مستقیماً بر نیاز به گرمایش، سرمایش و روشنایی مصنوعی تأثیر می‌گذارند. به‌طور خاص، گلخانه‌های واقع در اقلیم‌های سرد و عرض‌های جغرافیایی بالا، به دلیل وابستگی شدید به سیستم‌های گرمایشی و نور مصنوعی، مصرف انرژی بالاتری نسبت به گلخانه‌های مناطق معتدل و گرم دارند. در مقابل، در اقلیم‌های گرم‌تر، اگرچه نیاز به گرمایش کاهش می‌یابد، اما مصرف انرژی ممکن است به سمت سیستم‌های سرمایشی و تهویه سوق پیدا کند. بنابراین، اقلیم نه‌تنها میزان مصرف انرژی را تعیین می‌کند، بلکه نوع و الگوی مصرف انرژی را نیز شکل می‌دهد و نقش زیربنایی در طراحی و مدیریت سیستم‌های گلخانه‌ای دارد.

در کنار اقلیم، نوع محصول به‌عنوان عامل تنظیم‌کننده مصرف انرژی مطرح می‌شود. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که حتی در گلخانه‌هایی با ساختار فیزیکی و شرایط اقلیمی مشابه، مصرف انرژی می‌تواند بسته به نوع محصول تفاوت قابل‌توجهی داشته باشد. این تفاوت ناشی از نیازهای فیزیولوژیک متفاوت محصولات از نظر دما، نور، رطوبت و طول دوره رشد است. برای مثال، محصولاتی مانند گوجه‌فرنگی و خیار که نیازهای حرارتی و نوری بالاتری دارند، معمولاً مصرف انرژی بیشتری را به سیستم تحمیل می‌کنند، در حالی که برخی محصولات دیگر ممکن است با مصرف انرژی کمتر، بازده قابل قبولی داشته باشند. بنابراین، انتخاب نوع محصول می‌تواند به‌طور مستقیم بر شدت مصرف انرژی، ترکیب منابع انرژی مصرفی و حتی اثرات زیست‌محیطی تولید گلخانه‌ای تأثیر بگذارد و باید به‌عنوان یک ابزار مدیریتی مهم در نظر گرفته شود.

از سوی دیگر، تحلیل مصرف انرژی بر اساس عملکرد نشان می‌دهد که عملکرد محصول بیشتر به‌عنوان شاخص ارزیابی کارایی انرژی عمل می‌کند تا عامل محرک مصرف انرژی .در بسیاری از مطالعات، عملکرد در قالب شاخص‌هایی مانند انرژی مصرفی به‌ازای واحد محصول، بهره‌وری انرژی و انرژی ویژه مورد بررسی قرار گرفته است. این رویکرد امکان مقایسه سیستم‌های مختلف تولیدی، فناوری‌های گوناگون و سناریوهای مدیریتی را فراهم می‌سازد و نشان می‌دهد که افزایش مصرف انرژی لزوماً به افزایش متناسب عملکرد منجر نمی‌شود. در واقع، مطالعات تأکید دارند که بهینه‌سازی مصرف انرژی باید به‌گونه‌ای انجام شود که با حداقل انرژی ورودی، بیشترین عملکرد قابل‌دسترس حاصل شود. این موضوع به‌ویژه در ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم‌های گلخانه‌ای اهمیت بالایی دارد.

در مجموع، نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که اقلیم عامل تعیین‌کننده اصلی مصرف انرژی، نوع محصول عامل تعدیل‌کننده الگوی مصرف و عملکرد معیار سنجش کارایی انرژی در گلخانه‌ها است .درک هم‌زمان این سه مؤلفه امکان طراحی گلخانه‌هایی با مصرف انرژی بهینه، انتخاب محصولات متناسب با شرایط اقلیمی و دستیابی به عملکرد پایدار را فراهم می‌کند. بر این اساس، توسعه چارچوب‌های یکپارچه که بتوانند تأثیر متقابل اقلیم، نوع محصول و عملکرد را در تحلیل مصرف انرژی لحاظ کنند، می‌تواند نقش مهمی در بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش هزینه‌های تولید و حرکت به سمت کشاورزی گلخانه‌ای پایدار ایفا کند. این رویکرد نه‌تنها برای پژوهشگران، بلکه برای سیاست‌گذاران و بهره‌برداران بخش گلخانه‌ای نیز از اهمیت بالایی برخوردار است.

منابع

[1] T. Klein and W. R. L. Anderegg, “A vast increase in heat exposure in the 21st century

is driven by global warming and urban population growth," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 73, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.103098.

[2] G. Gonda, Y. M. Mubarak Al-AliNoor, M. Fekete-Farkas, and L. Helyes, "Sustainable food production with greenhouse technologies," *Int. J. Hortic. Sci.*, vol. 20, no. 3–4, 2014, doi: 10.31421/ijhs/20/3-4/1143.

[3] C. Maraveas, C. S. Karavas, D. Loukatos, T. Bartzanas, K. G. Arvanitis, and E. Symeonaki, "Agricultural Greenhouses: Resource Management Technologies and Perspectives for Zero Greenhouse Gas Emissions," *Agric.*, vol. 13, no. 7, 2023, doi: 10.3390/agriculture13071464.

[4] T. Siegmeier, B. Blumenstein, and D. Möller, "Bioenergy production and organic agriculture," *Org. Farming Glob. Perspect. Methods*, pp. 331–359, 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-813272-2.00012-4.

[5] V. J. P. D. Martinho, "Direct and indirect energy consumption in farming: Impacts from fertilizer use," *Energy*, vol. 236, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121504.

[6] H. Mamashli, M. Naeemi, N. Rezvantalab, and A. Rahemi Karizaki, "The study of energy indices and greenhouse gas emissions in some crops production in the east of Golestan Province, A case study: Minoodasht township," *Agric. Environ. Soc.*, vol. 5, no. 1, pp. 33–43, 2025, doi: 10.22034/jelsa.2025.492657.1092.

[7] B. Paris *et al.*, "Energy Use in Greenhouses in the EU: A Review Recommending Energy Efficiency Measures and Renewable Energy Sources Adoption," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 10, 2022, doi: 10.3390/app12105150.

[8] F. Goto, A. Terazoe, and K. Shoji, "Comparison of energy consumption and tomato yield and quality from greenhouses heated by an oil heater or an air-source heat pump," *Acta Hortic.*, vol. 1170, pp. 447–452, 2017, doi: 10.17660/ActaHortic.2017.1170.55.

[9] E. Bolandnazar, A. Keyhani, and M. Omid, "Determination of efficient and inefficient greenhouse cucumber producers using Data Envelopment Analysis approach, a case study: Jiroft city in Iran," *J. Clean. Prod.*, vol. 79, pp. 108–115, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.05.027.

[10] H. Saadi, M. Behnia, M. Taki, and A. Kaab, "A comparative study on energy use and environmental impacts in various greenhouse models for vegetable cultivation," *Environ. Sustain. Indic.*, vol. 25, 2025, doi: 10.1016/j.indic.2024.100553.

[11] A. Ahmadbeyki, M. Ghahderijani, A. Borghaee, and H. Bakhoda, "Energy use and environmental impacts analysis of greenhouse crops production using life cycle assessment approach: A case study of cucumber and tomato from Tehran province, Iran," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 988–999, 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2022.11.205.

[12] K. Mesmoudi, A. Soudani, B. Zitouni, P. E. Bournet, and L. Serir, "Experimental study of the energy balance of unheated greenhouse under hot and arid climates: Study for the night period of winter season," *J. Assoc. Arab Univ. Basic Appl. Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 27–37, 2010, doi: 10.1016/j.jaubas.2010.12.007.

[13] S. A. Mostafavi and A. Rezaei, "Energy consumption in greenhouses and selection of an optimized heating system with minimum energy consumption," *Heat Transf. - Asian Res.*, vol. 48, no. 7, pp. 3257–3277, 2019, doi: 10.1002/htj.21540.

[14] M. P. Trépanier, P. O. Schwarz, and L. Gosselin, "Simulating the impact of climate change on energy consumption and yield in Canadian greenhouse horticulture," *Sustain. Futur.*, vol. 8, 2024, doi: 10.1016/j.sftr.2024.100354.

[15] M. Soussi, M. T. Chaibi, M. Buchholz, and Z. Saghrouni, "Comprehensive Review

on Climate Control and Cooling Systems in Greenhouses under Hot and Arid Conditions," *Agronomy*, vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/agronomy12030626.

[16] C. Kittas, N. Katsoulas, T. Bartzanas, and S. Bakker, "Greenhouse climate control and energy use," *Food Agric. Organ. United Nations*, pp. 62–96, 2013.

[17] J. Gołaszewski, C. De Visser, Z. Brodziński, and R. Myhan, "State of the art on Energy Efficiency in Agriculture. Country data on energy consumption in different agro-production sectors in the European countries. Vinhos que pensam View project Sustainable Farming-SFARM View project," 2012, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/303773901

[18] F. Golzar, N. Heeren, S. Hellweg, and R. Roshandel, "Optimisation of energy-efficient greenhouses based on an integrated energy demand-yield production model," *Biosyst. Eng.*, vol. 202, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.11.012.

[19] S. H. Pishgar-Komleh, M. Omid, and M. D. Heidari, "On the study of energy use and GHG (greenhouse gas) emissions in greenhouse cucumber production in Yazd province," *Energy*, vol. 59, pp. 63–71, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.07.037.

[20] B. Ozkan, R. F. Ceylan, and H. Kizilay, "Energy inputs and crop yield relationships in greenhouse winter crop tomato production," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 3217–3221, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2011.03.042.

[21] Z. Ghaffarpour, M. Fakhroleslam, and M. Amidpour, "Calculation of energy consumption, tomato yield, and electricity generation in a PV-integrated greenhouse with different solar panels configuration," *Renew. Energy*, vol. 229, 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.120723.

[22] تقی نژاد، جبرائیل و واحدی، عادل،۱۴۰۰،مدل سازی الگوی مصرف انرژی و تحلیل حساسیت نهاده ها در تولید گندم آبی، مطالعه موردی: استان اردبیل،https://civilica.com/doc/1585579