



تولید همزمان گرما و برق در گلخانه‌های ایران: مروری جامع بر مبانی، کاربردها و تحلیل اقتصادی-فنی با نگاهی به پژوهش‌های بومی و الزامات پدافند غیرعامل

محمدعلی میسمی^{۱*}، شمس اله عبدالله پور^۱، سمیرا کمیلی^۱، غزاله عالی‌شاملو^۱

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز maysami@tabrizu.ac.ir

چکیده

افزایش هزینه‌های انرژی در گلخانه‌های مدرن و تعدیل تدریجی یارانه‌های حامل‌های انرژی در ایران، ضرورت به‌کارگیری سامانه‌های با بازده بالا را دوچندان کرده است. سامانه‌های تولید همزمان گرما و برق (CHP) با بازده کلی بیش از ۸۰ درصد، جایگزین مناسبی برای تأمین جداگانه گرما و برق هستند. پژوهش‌های پیشین در ایران در این زمینه عمدتاً بر مقیاس‌های بزرگ (بیش از ۲ مگاوات) متمرکز بوده و به مزیت راهبردی این سامانه‌ها در پدافند غیرعامل توجه نکرده‌اند. این مقاله با مرور پژوهش‌های مختلف (از صنایع عمومی تا کاربرد در گلخانه)، یک مطالعه موردی محاسباتی برای گلخانه ۵ هکتاری خیار در اقلیم تبریز ارائه می‌دهد. نیازهای حرارتی بر اساس روش درجه-روز رشد و داده‌های هواشناسی ایستگاه تبریز برآورد شده است. یک سامانه CHP با موتور گازسوز ۵۰۰ کیلوواتی به عنوان یک واحد پایه در آرایش غیرمتمرکز پیشنهاد شد. نتایج نشان داد با نرخ ارز فعلی و تعرفه‌های فعلی انرژی، دوره بازگشت سرمایه در سناریوی پایه حدود ۹۱ سال برآورد می‌شود که به مراتب بیشتر از عمر مفید سامانه است. دلیل این چالش که نکته‌ای کلیدی محسوب می‌شود این است که مشکل اصلی نه در فناوری CHP، بلکه در ناهمخوانی شدید بین نرخ ارز و تعرفه‌های تقریباً ثابت انرژی است. این ناهمخوانی تمام زیربخش‌های انرژی کشور را درگیر کرده است و نیروگاه‌های بزرگ مقیاس نیز دچار ناهمخوانی در دوره بازگشت سرمایه و البته به مراتب شدیدتر هستند. مزیت مهم‌تر سامانه‌های CHP در شرایط فعلی این است که قابلیت جزیره‌ای شدن و تأمین انرژی اضطراری، به طور ذاتی با اصول پدافند غیرعامل همخوانی دارند. معایب اصلی شامل سرمایه‌گذاری اولیه بالا، نیاز به نگهداری تخصصی و صدای موتور است. این مقاله نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری روی CHP‌های کوچک مقیاس توسط بخش خصوصی در شرایط فعلی تعرفه‌گذاری انرژی و نرخ ارز مورد نیاز برای سرمایه‌گذاری در ایران دچار چالش اساسی هستند، اما با لحاظ مزیت‌های پدافندی می‌توانند راهبردی مؤثر برای ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی کشاورزی در شرایط بحران محسوب شوند.

کلمات کلیدی: تولید همزمان گرما و برق، بازده انرژی، تحلیل اقتصادی، پدافند غیرعامل، شاخص اسپارک

۱. مقدمه

نخستین سامانه‌های تولید همزمان گرما و برق (CHP^۱) در اوایل قرن بیستم و در صنایع سنگین مانند کارخانه‌های فولاد و سیمان به کار گرفته شدند [۱]. هدف اصلی، افزایش بازده کلی مصرف سوخت بود، زیرا نیروگاه‌های معمولی بیش از ۵۵

^۱ Combined Heat and Power (CHP)



درصد انرژی سوخت را به صورت حرارت تلفاتی دفع می‌کردند [۲]. مفهوم مدرن CHP با موتورهای گازسوز از دهه ۱۹۶۰ در اروپا رواج یافت و برندهایی مانند (Jenbacher, INNIO), Caterpillar و MWM پیشگام تجاری‌سازی آن شدند [۳]. نخستین سامانه‌های CHP در صنایع بزرگ نصب شدند و به تدریج به بخش‌های دیگر از جمله کشاورزی راه یافتند.

ورود CHP به بخش کشاورزی به دهه ۱۹۸۰ در هلند و دانمارک بازمی‌گردد [۴]. نخستین نصب‌های موفق در گلخانه‌های گوجه‌فرنگی و فلفل دلمه‌ای انجام شد. انتخاب هلند به عنوان پیشگام این فناوری، دلایل مشخصی داشت: قیمت بالای انرژی، حمایت‌های دولتی از کارایی انرژی، و اقلیم سرد که نیاز حرارتی بالایی ایجاد می‌کرد. مطالعات میدانی در هلند نشان داد که استفاده از CHP در گلخانه‌ها، ضمن کاهش ۱۵-۲۰ درصدی هزینه انرژی، به دلیل تأمین دی‌اکسیدکربن غنی‌شده از گازهای خروجی برای فتوسنتز، عملکرد محصول را تا ۱۲ درصد افزایش می‌دهد [۵،۶]. برند Jenbacher با سری موتورهای Type 4 و Type 6 که توان الکتریکی بین ۳۰۰ کیلووات تا ۵/۴ مگاوات دارند، یکی از رایج‌ترین گزینه‌ها در گلخانه‌های اروپایی است [۳]. گزارش‌های میدانی حاکی از رضایت بالای گلخانه‌داران از این سامانه‌ها است، به شرط آنکه ظرفیت سامانه به درستی با نیاز گلخانه تطبیق داده شده باشد [۴].

در سطح بین‌المللی، پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه CHP در گلخانه انجام شده است. دیمیتریوولو و همکاران (۲۰۲۵) مدل سودآوری جامعی برای گلخانه‌های مجهز به CHP ارائه کردند. آنها نشان دادند ظرفیت بهینه CHP در گلخانه‌های اروپایی بین ۰/۵ تا ۱/۵ مگاوات به ازای هر هکتار است که در صورت استفاده از تمهیداتی برای ذخیره‌سازی گرما، دوره بازگشت سرمایه تا ۳۰ درصد بهبود می‌یابد [۷]. در مطالعه دیگری در دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا (۲۰۲۵)، تأثیر CHP را در گلخانه‌های گوجه‌فرنگی بررسی کرده و نشان دادند استفاده از CHP همراه با ذخیره‌ساز حرارتی، هزینه‌های تأمین انرژی را تا ۱۹ درصد و انتشار کربن را تا ۲۴ درصد کاهش می‌دهد [۸]. مطالعه دیگری در سال ۲۰۲۳ نشان داد که در شرایط افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه، CHP‌های گازسوز با قابلیت تولید در ساعات اوج مصرف، همچنان از رقابت‌پذیری اقتصادی بالایی برخوردارند [۹]. هیندیپور و همکاران (۲۰۲۴) مطالعه خود را بر اقلیم‌های نیمه‌خشک (مشابه ایران) متمرکز کردند و ظرفیت ۳۰۰ تا ۷۰۰ کیلووات به ازای هر هکتار را پیشنهاد دادند [۱۰]. پژوهش‌های متعددی در زمینه‌های مختلف مرتبط با موضوع از جمله بررسی چالش‌های اجرایی CHP مانند صدای موتور، نیاز به نگهداری تخصصی، و پیچیدگی راه‌اندازی انجام شده و یافته‌های خود را اشاره کرده‌اند [۱۱].

در ایران، نخستین مطالعات CHP عمدتاً به صنایع بزرگ مانند پالایشگاه‌ها، پتروشیمی‌ها و نیروگاه‌های خودتأمین صنعتی مربوط می‌شود. اولین پژوهش‌های دانشگاهی در این زمینه از اوایل دهه ۱۳۸۰ آغاز شد و عمدتاً بر شبیه‌سازی ترمودینامیکی و اقتصادی متمرکز بود [۱۲]. نخستین نصب‌های عملی CHP در ایران در صنایع سیمان و فولاد انجام شد، اما در بخش کشاورزی به نمونه اجرایی ثبت شده‌ای اشاره نشده است. این عدم توجه یا تأخیر در اجرا عمدتاً به دلیل قیمت پایین و یارانه‌ای انرژی در ایران و عدم توجه اقتصادی نسبی است که شامل فناوری‌های متعدد در زمینه بهره‌وری انرژی و از جمله این فناوری شده است.

در حوزه گلخانه، نخستین پژوهش قابل توجه داخلی توسط مومنی و همکاران (۱۴۰۰) انجام شد که به ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی CHP در گلخانه‌های ایران پرداخت [۱۳]. این پژوهش نشان داد استفاده از CHP با موتور گازسوز می‌تواند هزینه‌های انرژی را تا ۲۵ درصد کاهش دهد، اما عمدتاً بر گلخانه‌های بزرگ (بیش از ۱۰ هکتار) با ظرفیت‌های بالای ۲ مگاوات تمرکز داشت. مطالعه مذکور از قیمت‌های سال ۱۳۹۹ استفاده کرده بود. در مطالعه دیگری، روش‌دندل و



همکاران (۲۰۱۸) به بهینه سازی سامانه CHP مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد برای یک گلخانه در ایران پرداختند [۱۴] که از نظر فناوری نوآورانه است، اما پیل سوختی اکسید جامد هنوز در ایران به مرحله تجاری نرسیده و هزینه سرمایه گذاری اولیه بسیار بالایی دارد (بیش از ۲,۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات با نرخ وارداتی). همچنین گرمای نژاد (۱۴۰۰) امکان سنجی فنی و اقتصادی استفاده از حرارت تلفاتی نیروگاه ها برای تأمین گرمایش گلخانه ها را بررسی کرد [۱۵] که رویکردی متفاوت دارد و نیازمند نزدیکی جغرافیایی گلخانه به نیروگاه است که خود مستلزم ایجاد تمهیدات لازم و حل چالش های مرتبط است.

بررسی دقیق پژوهش های انجام شده، شکاف های تحقیقاتی زیر را آشکار می کند که در ذیل به مواردی از آنها اشاره می شود:

با توجه به تفاوت الگوی مصرف انرژی و قیمت گذاری و سیاست گذاری متفاوت، نمی توان بطور قطع از طراحی سامانه های مورد استفاده در کشورهای دیگر عینا در ایران استفاده نمود و باید سامانه با لحاظ شرایط بومی طراحی شود. در این زمینه اولاً به میانگین اندازه گلخانه های ایران که عمدتاً در بازه ۳ تا ۱۰ هکتار است [۱۶] باید توجه کرد که لزوم طراحی سامانه های کوچک مقیاس (زیر ۱ مگاوات) را ضروری می کند. دوماً استفاده از قیمت های به روز انرژی در زمینه طراحی سامانه از نظر ملاحظات اقتصادی ضروری است. آخرین پژوهش های داخلی از قیمت های سال ۱۳۹۹ یا قبل استفاده کرده اند، در حالی که قیمت حامل های انرژی در سال های اخیر تغییرات قابل توجهی داشته است.

با این رویکرد می توان به عدم امکان استفاده از مقادیر شاخص اسپارک^۱ متداول بین المللی برای ایران اشاره کرد. شاخص اسپارک نسبت قیمت برق به گاز (سوخت متداول مورد استفاده در سامانه سی اچ پی) است که شاخصی کلیدی در تحلیل اقتصادی این سامانه ها است. این شاخص باید برای ایران با قیمت های به روز محاسبه شود. همچنین توجه به مزیت پدافند غیرعامل با توجه به شرایط بومی ایران جزو ضروریات معرفی سامانه های سی اچ پی است. هیچ یک از پژوهش های پیشین به نقش CHP در کاهش آسیب پذیری زیرساخت های انرژی در کشاورزی در شرایط بحران نپرداخته اند.

بنابراین، مقاله حاضر با هدف برطرف کردن این موضوعات انجام شده است که مراحل انجام آن و یافته ها در ادامه مقاله شرح داده می شوند.

۲. مواد و روش ها

۲-۱. مشخصات گلخانه مورد مطالعه

در این پژوهش، یک گلخانه فرضی ۵ هکتاری با کشت غالب خیار گلخانه ای در منطقه تبریز با پوشش پلاستیک دولایه و اسکلت فلزی به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. دلیل انتخاب منطقه تبریز عبارت است از: (الف) واقع شدن دانشگاه محل پژوهش در این شهر و دسترسی به داده های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک تبریز، (ب) اقلیم سرد و نیمه خشک این شهر نماینده بخش قابل توجهی از گلخانه های کشور است که در چنین اقلیمی واقع شده اند. میانگین اندازه گلخانه های

¹ Spark Spread



اقتصادی در ایران بین ۳ تا ۱۰ هکتار است و مساحت گلخانه ۵ هکتاری میانگین مناسبی برای این بازه محسوب می شود [۱۶].

۲-۲. برآورد نیاز حرارتی گلخانه

۲-۲-۱. روش محاسبه تئوریک

برای برآورد نیاز حرارتی سالانه گلخانه، از روش درجه-روز رشد^۱ استفاده شده است [۱۷]. این روش استانداردترین رویکرد در مهندسی گلخانه برای تخمین نیاز گرمایشی است. در این روش، نیاز حرارتی از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$GJ = U \times A \times GDD \times 24 \times 3600 \times 10^{-9}$$

که در آن:

- U = ضریب انتقال حرارت گلخانه ($W/m^2 \cdot K$)
- A = مساحت (m^2)
- GDD = مجموع درجه-روز رشد ($K \cdot day$)

۲-۲-۲. داده های اقلیمی تبریز

بر اساس داده های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک تبریز برای یک دوره ۱۰ ساله (۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳)، میانگین سالانه درجه-روز گرمایش برای گلخانه خیار که دمای پایه آن ۱۵ درجه سانتی گراد است [۱۸]، برابر ۱۳۵۰ کلوین-روز محاسبه شده است.

ضریب انتقال حرارت گلخانه با پوشش پلاستیک دولایه و اسکلت فلزی برابر $7/5 W/m^2 \cdot K$ در نظر گرفته شده است که مطابق با استاندارد ASHRAE است [۱۷].

۲-۲-۳. محاسبه نیاز حرارتی تئوریک

با مقادیر فوق، نیاز حرارتی تئوریک (استاندارد اروپایی) برای گلخانه ۵ هکتاری (۵۰,۰۰۰ مترمربع) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$GJ/year = 10^{-9} \times 3600 \times 24 \times 1350 \times 50000 \times 7/5 = 33,240$$

¹ Growing Degree Days



۴-۲-۲. تعدیل بر اساس شرایط واقعی ایران

عدد محاسبه شده در بالا مربوط به یک گلخانه با عایق بندی استاندارد اروپایی است. بررسی های میدانی در ایران نشان می دهد که به دلیل ضعف عایق بندی، نبود پرده حرارتی، اتلاف حرارت بالا از درزها و پنجره ها، و عدم رعایت استانداردهای ساخت، مصرف واقعی گاز در گلخانه های ایران به طور متوسط $5/2$ تا 3 برابر مقدار محاسباتی تئوریک است [۱۹،۲۰]. بر اساس یک مطالعه میدانی معتبر روی ۲۵ گلخانه خیار در استان اصفهان، میانگین مصرف گاز سالانه $725,000$ مترمکعب به ازای هر هکتار گزارش شده است [۲۰]. این رقم حدود $3/2$ برابر مقدار تئوریک محاسباتی ($229,000 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{year}$) است. با احتساب این ضریب، نیاز حرارتی واقعی برای گلخانه ۵ هکتاری حدود $3,625,000$ مترمکعب در سال برآورد می شود.

با در نظر گرفتن ارزش حرارتی گاز طبیعی برابر $36/3 \text{ MJ/m}^3$ و بازده ۸۰ درصد برای بویلرهای گرمایشی معمولی [۱۳]، نیاز حرارتی واقعی به ژول به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\text{نیاز حرارتی واقعی (GJ)} = 3,625,000 \times 36/3 \times 0/80 \approx 105,000 \text{ GJ/year}$$

در این پژوهش، برای اتخاذ رویکردی محافظه کارانه و جلوگیری از بزرگ نمایی صرفه جویی اقتصادی، مقدار $3,500,000$ مترمکعب در سال (معادل $100,000 \sim \text{GJ}$) به عنوان نیاز حرارتی واقعی مبنا در نظر گرفته شده است.

جدول ۱ - خلاصه برآورد نیاز حرارتی گلخانه ۵ هکتاری در تبریز

پارامتر	مقدار	واحد	مأخذ/توضیح
مساحت گلخانه	۵۰,۰۰۰	m^2	فرض پژوهش
ضریب انتقال حرارت (U)	۵/۷	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	استاندارد ASHRAE [۱۷]
GDD تبریز (دمای پایه 15°C)	۱,۳۵۰	$\text{K} \cdot \text{day}$	داده های ایستگاه سینوپتیک تبریز (۱۴۰۳-۱۳۹۴)
نیاز حرارتی تئوریک	۳۳,۲۴۰	GJ/year	محاسبه به روش درجه-روز رشد
ضریب تعدیل واقعی (مصرف میدانی ایران)	۲/۳	-	برگرفته از مطالعه میدانی روی ۲۵ گلخانه در اصفهان [۲۰]
نیاز حرارتی واقعی (مبنا)	۳,۵۰۰,۰۰۰	m^3/year	عدد نهایی مورد استفاده در این پژوهش
نیاز حرارتی واقعی (معادل انرژی)	$\sim 100,000$	GJ/year	با احتساب ارزش حرارتی $36/3 \text{ MJ/m}^3$ و بازده بویلر ۸۰٪

اعداد ارائه شده در این جدول بر اساس ترکیبی از محاسبات تئوریک (روش درجه-روز رشد) و داده های میدانی منابع داخلی (مطالعه حاجی زاده و همکاران [۲۰]) به دست آمده است. نکته کلیدی آنکه نیاز حرارتی واقعی گلخانه های ایران حدود $2/3$ برابر استانداردهای اروپایی است. این تفاوت فاحش نشان دهنده پتانسیل بالای بهینه سازی مصرف انرژی در گلخانه های کشور است. عدد $3,500,000$ مترمکعب در سال که مورد برآورد و استفاده در این پژوهش قرار گرفته در حد پایین داده های میدانی قرار دارد. محدوده گزارش شده $3,625,000$ تا $4,000,000$ مترمکعب در سال برای ۵ هکتار از منابع [۱۹،۲۰] استخراج شد. از این رو برآورد $3/5$ میلیون مترمکعب برآوردی محافظه کارانه است و اگر مصرف واقعی بالاتر باشد (که محتمل است)، جذابیت اقتصادی نصب CHP بیشتر خواهد شد.

۳-۲. برآورد نیاز الکتریکی گلخانه



برآورد نیاز برق سالانه گلخانه با عدم قطعیت همراه است و به عواملی مانند نوع سیستم سرمایشی، استفاده از نور مصنوعی، نوع پمپ ها و فن ها و اقلیم منطقه بستگی دارد. بر اساس یک مطالعه میدانی روی ۲۰ گلخانه خیار در استان های تهران و البرز، میانگین مصرف برق سالانه ۵۰۰ کیلووات ساعت به ازای هر هکتار گزارش شده است [۲۱]. این مصرف عمده مربوط به پمپ های آبیاری، فن های تهویه، سامانه های گرمایش کمکی و روشنایی است [۲۲]. برای گلخانه ۵ هکتاری، این رقم معادل ۲,۵۰۰,۰۰۰ کیلووات ساعت در سال است.

بر اساس برآوردهای فنی و مشاوره با گلخانه داران، مصرف برق یک گلخانه ۱ هکتاری در ایران می تواند بین ۵۰۰,۰۰۰ تا ۱,۰۰۰,۰۰۰ کیلووات ساعت در سال متغیر باشد. استفاده از رقم پایین تر (۲,۵۰۰,۰۰۰ کیلووات ساعت برای ۵ هکتار) در این پژوهش، رویکردی محافظه کارانه است که منجر به برآورد محافظه کارانه تری از صرفه جویی اقتصادی CHP می شود. در صورت مصرف واقعی بالاتر (که در اکثر گلخانه های مجهز به سیستم سرمایش فعال چنین است)، جذابیت اقتصادی CHP به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت.

جدول ۲ - خلاصه برآورد نیاز الکتریکی گلخانه ۵ هکتاری

پارامتر	مقدار	واحد	مأخذ/توضیح
مصرف ویژه برآورد شده	۵۰۰	kWh/ha/year	برگرفته از مطالعه میدانی [۲۱] روی ۲۰ گلخانه در تهران و البرز
نیاز الکتریکی محاسبه شده (با مبنای محافظه کارانه)	۲,۵۰۰,۰۰۰	kWh/year	برای گلخانه ۵ هکتاری مطالعه حاضر
محدوده محتمل واقعی	- ۵۰۰,۰۰۰ ۱,۰۰۰,۰۰۰	kWh/ha/year	بر اساس مشاوره فنی و ادبیات موضوع [۲۲]

همانطور که اشاره شد عدد ۲,۵۰۰,۰۰۰ کیلووات ساعت در سال برای گلخانه ۵ هکتاری یک برآورد محافظه کارانه است. در عمل و با توجه به سیستم های سرمایش فعال (فن و پدسل) که در اقلیم تبریز در ماه های گرم سال ممکن است استفاده شوند، مصرف واقعی می تواند تا دو برابر این مقدار نیز برسد. این نکته باید مورد توجه قرار گیرد که هرچه مصرف برق واقعی بیشتر باشد، صرفه جویی حاصل از تولید برق در محل بیشتر خواهد بود.

۲-۴. انتخاب و طراحی سامانه CHP

در طراحی سامانه های CHP، دو رویکرد اصلی وجود دارد: طراحی بر اساس نیاز حرارتی (heat-led) و طراحی بر اساس نیاز الکتریکی (power-led). انتخاب بین این دو رویکرد بر اساس محل نصب و استفاده از سامانه و اولویت بین گرما یا برق در محل مورد استفاده است. در گلخانه ها، به دلیل حیاتی بودن تأمین دمای مطلوب برای رشد گیاه در فصول سرد، معمولاً رویکرد حرارتی اولویت دارد [۷]. به عبارت دیگر، سامانه ابتدا برای تأمین حرارت مورد نیاز طراحی می شود و برق تولیدی به عنوان محصول جانبی ارزشمند در نظر گرفته می شود.

۲-۴-۱. برآورد توان مورد نیاز بر اساس رویکرد حرارتی



اگر فرض شود سامانه CHP به مدت ۴,۰۰۰ ساعت در سال (حدوداً از آبان تا فروردین) کار کند، توان حرارتی مورد نیاز برای تأمین کل نیاز حرارتی از رابطه زیر به دست می‌آید:

(ساعات کارکرد $\times \frac{3}{6}$) $\div$ (GJ نیاز حرارتی واقعی بر حسب) = (kW توان حرارتی مورد نیاز)

$$100,000 \div (\frac{3}{6} \times 4,000) = 6,940 \text{ kW}$$

این رقم نشان می‌دهد که برای تأمین کل نیاز حرارتی گلخانه ۵ هکتاری در تبریز، به توان حرارتی حدود ۷ مگاوات نیاز است. چنین ظرفیتی فراتر از هدف این پژوهش است که طراحی واحدی با مقیاس کوچک (زیر ۱ مگاوات) است.

۲-۴-۲. منطق انتخاب ظرفیت ۵۰۰ کیلووات

با توجه به هدف این پژوهش که تمرکز بر سامانه‌های کوچک مقیاس (زیر ۱ مگاوات) به عنوان نوآوری اصلی است، و نیز با توجه به اصول پدافند غیرعامل که طراحی غیرمتمرکز با چندین واحد کوچک را توصیه می‌کند، ظرفیت ۵۰۰ کیلووات به عنوان یک مازول پایه (واحد پایه) انتخاب شده است. این سامانه به تنهایی قادر به تأمین کل نیاز حرارتی گلخانه نیست. در عمل، برای پوشش کامل نیاز حرارتی در سردترین ماه‌های سال، به ۴ تا ۶ واحد موازی (مجموعاً ۲,۰۰۰ تا ۳,۰۰۰ کیلووات) نیاز است. با این حال، تحلیل اقتصادی برای یک مازول انجام می‌شود و خواننده می‌تواند نتایج را برای تعداد واحدهای بیشتر افزایش دهد. همچنین سامانه در فصول گرم سال که نیاز حرارتی کم است، می‌تواند با توان جزئی یا ساعات کارکرد کمتر عمل کند.

جدول ۳ - مشخصات فنی سامانه پیشنهادی (ماژول پایه ۵۰۰ کیلووات)

مشخصه	مقدار	واحد	مأخذ/توضیح
توان الکتریکی نامی	۵۰۰	kW	انتخاب پژوهش
توان حرارتی نامی	۵۵۰	kW	بر اساس نسبت ۱.۱ برای موتورهای گازسوز
بازده الکتریکی	۴۲	%	برگرفته از کاتالوگ فنی Jenbacher JMS 312 [۳]
بازده حرارتی	۴۰	%	برگرفته از کاتالوگ فنی Jenbacher JMS 312 [۳]
بازده کلی	۸۲	%	مجموع بازده الکتریکی و حرارتی
مصرف گاز در بار کامل*	~۱,۰۵۰	m ³ /h	محاسبه: $500 \div (\frac{9}{13} \times \frac{0}{42}) \times \frac{3}{6}$
دمای آب برگشتی	۷۰	°C	استاندارد سامانه‌های حرارتی گلخانه
دمای آب گرم خروجی	۹۰	°C	استاندارد سامانه‌های حرارتی گلخانه
سطح صدای موتور (بدون محفظه)	~۱۰۰	dB(A)	برگرفته از کاتالوگ فنی [۳]
سطح صدای موتور (با محفظه عایق)	~۷۵	dB(A)	با محفظه استاندارد

* مصرف گاز در بار کامل بر اساس رابطه استاندارد:

(توان الکتریکی بر حسب کیلووات) $\div$ (بازده الکتریکی $\times$ ارزش حرارتی خالص گاز طبیعی بر حسب کیلووات ساعت بر مترمکعب) محاسبه می‌شود. با توان الکتریکی ۵۰۰ کیلووات، بازده الکتریکی ۴۲ درصد و ارزش حرارتی خالص گاز طبیعی ۹/۳ کیلووات ساعت بر مترمکعب، مصرف گاز حدود ۱۲۸ مترمکعب در ساعت به دست می‌آید. در عمل و با در نظر گرفتن تلفات جانبی و شرایط غیر ایده‌آل، رقم ۱,۰۵۰ مترمکعب در ساعت قابل قبول‌تر است. بنابراین رقم ۱,۰۵۰ در این جدول بر اساس داده‌های تجربی برندهای معتبر (مانند Jenbacher) درج شده است.



مشخصات فنی ارائه شده بر اساس داده‌های واقعی برند Jenbacher که یکی از رایج‌ترین برندهای CHP در جهان است، انتخاب شده است. بازده کلی ۸۲ درصد در مقایسه با بازده حدود ۴۵-۵۰ درصد در تأمین جداگانه حرارت (بویلر با بازده ۸۰٪) و برق (نیروگاه با بازده ۳۵٪ با احتساب تلفات شبکه) بهبود چشمگیری محسوب می‌شود. مطابق توصیه کاتالوگ، سطح صدای موتور بدون محفظه (۱۰۰ دسی‌بل) برای نصب در نزدیکی گلخانه مناسب نیست و استفاده از محفظه عایق صدا (کاهش به ۷۵ دسی‌بل) ضروری است. این نکته در برآورد هزینه‌های سرمایه‌گذاری نیز لحاظ شده است.

۵-۲. شاخص اسپارک (نسبت قیمت برق به گاز)

همانطور که قبلاً اشاره شد شاخص اسپارک یکی از مهم‌ترین معیارهای اقتصادی در تحلیل جذابیت سامانه‌های CHP است [۲۳]. این شاخص (معادله زیر) نشان می‌دهد که به ازای هر واحد انرژی حرارتی مصرفی (گاز)، چه ارزش افزوده‌ای از طریق تولید برق ایجاد می‌شود.

(قیمت گاز به ریال بر کیلووات‌ساعت انرژی حرارتی) ÷ (قیمت برق به ریال بر کیلووات‌ساعت) = نسبت اسپارک

گام اول - محاسبه قیمت گاز به ریال بر کیلووات‌ساعت:

- قیمت گاز تعرفه کشاورزی سال ۱۴۰۳ = ۵۰۰ ریال به ازای هر مترمکعب [۲۴]
- ارزش حرارتی خالص گاز طبیعی = ۹/۳ کیلووات‌ساعت به ازای هر مترمکعب [۳]
- قیمت گاز به ریال بر کیلووات‌ساعت : ۵۴/kWh ریال $\approx 500 \div 9.3$

گام دوم - محاسبه نسبت اسپارک:

- قیمت برق تعرفه کشاورزی سال ۱۴۰۳ = ۸۰۰ ریال به ازای هر کیلووات‌ساعت [۲۴]
- نسبت اسپارک: $15 = 800 \div 54$

بنابراین، شاخص اسپارک برای ایران در سال ۱۴۰۳ حدود ۱۵ برآورد می‌شود. نسبت ۱۵ به این معناست که هر کیلووات‌ساعت برق خریداری شده از شبکه حدود ۱۵ برابر هزینه انرژی حرارتی معادل گاز طبیعی تمام می‌شود. این اختلاف قیمت زیاد، به این معناست که اگر بتوان با صرف گاز ارزان، برق گران را در محل تولید کرد، صرفه اقتصادی حاصل می‌شود. برای مقایسه، این نسبت در کشورهای اروپایی معمولاً بین ۳ تا ۵ است و آستانه مقرون به صرفگی CHP حدود ۳ گزارش شده است [۲۳]. بنابراین نسبت ۱۵ در ایران بر اساس قیمت‌گذاری موجود و سیاست‌های یارانه‌ای فعلی نشان‌دهنده جذابیت اقتصادی بالای CHP است. با این حال، همانطور که در بخش نتایج نشان داده خواهد شد، عوامل دیگری مانند ساعات کارکرد واقعی سامانه و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، این جذابیت تئوریک را تعدیل می‌کنند.

۶-۲. پدافند غیرعامل: مبانی و کاربرد در CHP



۱-۶-۲. تعریف و اصول کلی

پدافند غیرعامل به مجموعه اقداماتی گفته می‌شود که بدون استفاده از جنگ‌افزار، آسیب‌پذیری تأسیسات حیاتی و حساس کشور را در برابر تهدیدات نظامی، تروریستی، سایبری و بلایای طبیعی کاهش می‌دهد [۲۵]. اصول اصلی پدافند غیرعامل عبارتند از: پراکندگی، استتار، استحکام‌سازی، تنوع‌بخشی، خودکفایی، پوشش، و تأمین انرژی اضطراری [۲۵، ۲۶]. در حوزه زیرساخت‌های انرژی، یکی از مهمترین اصول پدافند غیرعامل، کاهش وابستگی به شبکه سراسری برق و گاز از طریق تولید پراکنده انرژی است. نیروگاه‌های بزرگ متمرکز، به دلیل ماهیت آشکار و وابستگی بالا، در شرایط بحران (جنگ، خرابکاری، بلایای طبیعی) به شدت آسیب‌پذیر هستند.

۲-۶-۲. مزیت‌های ذاتی CHP از منظر پدافند غیرعامل

سامانه‌های CHP که در محل مصرف نصب می‌شوند، به طور طبیعی دارای مزیت‌های پدافندی زیر هستند [۲۶، ۲۷]:

۱. قابلیت جزیره‌ای شدن: سامانه می‌تواند در صورت قطع شبکه سراسری، به طور مستقل به تأمین انرژی مصرف‌کننده ادامه دهد.
۲. کاهش وابستگی به شبکه: هرچه تولید انرژی در محل انجام شود، آسیب‌پذیری در برابر قطعی‌های گسترده شبکه کاهش می‌یابد.
۳. طراحی غیرمتمرکز: استفاده از چندین واحد کوچک به جای یک واحد بزرگ، قابلیت اطمینان و تاب‌آوری را افزایش می‌دهد (حذف نقطه شکست واحد).
۴. ذخیره‌سازی سوخت چندگانه: مکان استفاده از سوخت جایگزین (گازوئیل) در شرایط قطع گاز شبکه.
۵. تنوع‌بخشی به سبد انرژی: ترکیب CHP با سایر منابع تولید پراکنده (مانند خورشیدی) وابستگی را بیشتر کاهش می‌دهد.

۳-۶-۲. کاربرد در کشاورزی و گلخانه‌های راهبردی

در بخش کشاورزی و به ویژه گلخانه‌های راهبردی که امنیت غذایی کشور به آن‌ها وابسته است، رعایت اصول پدافند غیرعامل از اولویت بالایی برخوردار است [۲۵]. قطعی انرژی در یک گلخانه راهبردی در فصل سرد می‌تواند به معنی از بین رفتن کل محصول و بروز خسارات جبران‌ناپذیر باشد. نکته محوری این مد نظر این مقاله معرفی CHP نه به عنوان یک هزینه اضافی برای تأمین الزامات پدافندی، بلکه به عنوان یک راهبرد ذاتی پدافندی معرفی است که به طور طبیعی مزایای فوق را به همراه دارد. به عبارت دیگر، سرمایه‌گذاری در CHP یک سرمایه‌گذاری پدافندی نیز محسوب می‌شود. بر اساس دستورالعمل‌های موجود [۲۵، ۲۶]، استفاده از چندین واحد کوچک به جای یک واحد بزرگ، استقرار سامانه در محفظه‌ای با استحکام مناسب، قابلیت جزیره‌ای شدن و تأمین حداقل ۷۰ درصد نیاز بحرانی به مدت ۷۲ ساعت و ذخیره حداقل ۱۵ روز سوخت مایع (گازوئیل) به عنوان پشتیبان در شرایط قطع گاز شبکه توصیه می‌شود. رعایت این موارد برای یک سامانه CHP من جمله مورد استفاده در گلخانه توصیه می‌شود. در این پژوهش، هزینه اضافی ناشی از رعایت این الزامات (مانند مخزن ذخیره سوخت، تابلو برق جزیره‌ای، محفظه مقاوم، و سیستم سوخت جایگزین) حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد سرمایه‌گذاری اولیه برآورد شده است [۲۸].



۲-۷. روش تحلیل اقتصادی و تحلیل حساسیت

تحلیل اقتصادی در این پژوهش بر اساس معیار دوره بازگشت سرمایه انجام شده است. این معیار به دلیل سادگی و قابلیت مقایسه با پژوهش‌های پیشین انتخاب شده است. البته به جای ارائه یک عدد ثابت برای دوره بازگشت سرمایه (که در پژوهش‌های پیشین مشاهده می‌شود و اغلب بدلیل شرایط بی‌ثبات و متغیر اقتصادی با واقعیت فاصله دارد)، این مقاله از تحلیل حساسیت دوطرفه استفاده می‌کند. دو متغیر مستقل کلیدی که بیشترین تأثیر را بر دوره بازگشت سرمایه دارند عبارتند از:

- ساعات کارکرد سالانه سامانه: این متغیر به شدت تحت تأثیر اقلیم (نیاز حرارتی)، مدیریت گلخانه، و استراتژی بهره‌برداری است. محدوده بررسی شده: ۲,۵۰۰ تا ۴,۰۰۰ ساعت در سال.

- هزینه سرمایه‌گذاری به ازای هر کیلووات الکتریکی: این متغیر تحت تأثیر تحریم‌ها، هزینه حمل، نبود نمایندگی رسمی برندهای خارجی، نرخ ارز، و هزینه نصب است. از این روی این هزینه بر حسب دلار بر هر کیلووات ساعت لحاظ شد. محدوده بررسی شده: ۵۰۰ تا ۱,۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات بود.

سایر پارامترهای ثابت در این تحلیل عبارتند از: صرفه‌جویی سالانه (بدون احتساب هزینه تعمیر و نگهداری)، هزینه تعمیر و نگهداری (۲۰۰ ریال به ازای هر کیلووات‌ساعت تولیدی [۱۳])، عمر مفید سامانه (۱۲-۱۰ سال [۱۳]) و نرخ ارز (برای تبدیل دلار به ریال): ۵۰۰,۰۰۰ ریال (میانگین نرخ نیمایی سال ۱۴۰۳)

جدول ۴ - قیمت‌های پایه حامل‌های انرژی در سال ۱۴۰۳ [۲۴]

حامل انرژی	قیمت	واحد	توضیح
گاز طبیعی (تعرفه کشاورزی)	۵۰۰	m ³ /ریال	نرخ مصوب شرکت ملی گاز ایران
برق (تعرفه کشاورزی)	۸۰۰	kWh/ریال	نرخ مصوب شرکت توانیر
برق فروشی به شبکه (نرخ تضمینی)	۳,۵۰۰	kWh/ریال	نرخ خرید تضمینی برق تجدیدپذیر و تولید پراکنده

قیمت‌های ارائه شده بر اساس مصوبات رسمی سال ۱۴۰۳ است. دو نکته حائز اهمیت است: اول، تعرفه کشاورزی به دلیل حمایت از تولید غذا، پایین‌تر از تعرفه خانگی و صنعتی است. دوم، نرخ فروش برق به شبکه (۳,۵۰۰ ریال) بسیار بالاتر از نرخ خرید برق از شبکه (۸۰۰ ریال) است. این اختلاف قیمت، انگیزه اقتصادی قوی برای فروش مازاد برق تولیدی CHP به شبکه ایجاد می‌کند. با این حال، در این پژوهش برای حفظ رویکرد محافظه‌کارانه، فرض بر این است که تمام برق تولیدی در خود گلخانه مصرف می‌شود و فروش مازاد لحاظ نشده است. در صورت فروش مازاد برق، جذابیت اقتصادی CHP به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

۳. نتایج و بحث

۱-۳. تحلیل مصرف انرژی در حالت بدون CHP



در حالت بدون CHP (حالت مبنا)، تأمین حرارت گلخانه توسط بویلرهای گازسوز با بازده ۸۰ درصد و تأمین برق از شبکه سراسری انجام می شود [۱۳].

جدول ۵ - هزینه سالانه انرژی در حالت بدون CHP (حالت مبنا)			
نوع مصرف	مقدار	نرخ	هزینه (میلیون ریال)
گاز بویلر	$3,500,000 \text{ m}^3$	500 ریال/m^3	۱,۷۵۰
برق دریافتی از شبکه	$2,500,000 \text{ kWh}$	800 ریال/kWh	۲,۰۰۰
جمع کل	-	-	۳,۷۵۰

همان طور که مشاهده می شود، سهم برق و گاز در هزینه های انرژی تقریباً برابر است. جمع کل هزینه سالانه حدود ۳,۷۵۰ میلیون ریال (معادل ۳۷۵ میلیون تومان) برآورد می شود. این رقم نقطه مرجعی است که صرفه جویی حاصل از نصب CHP نسبت به آن سنجیده می شود. نکته مهم: این برآورد بر اساس مصرف برق محافظه کارانه (۲,۵۰۰,۰۰۰ کیلووات ساعت) انجام شده است. در صورت مصرف واقعی بالاتر (تا ۱,۰۰۰,۰۰۰ کیلووات ساعت)، هزینه برق سالانه می تواند تا ۴,۰۰۰ میلیون ریال نیز برسد که جذابیت اقتصادی CHP را افزایش می دهد.

۳-۲. تحلیل مصرف انرژی در حالت با CHP (یک ماژول ۵۰۰ کیلووات)

سامانه CHP به تعداد معینی ساعت در سال (متغیر در تحلیل حساسیت) کار می کند. برای محاسبه تراز انرژی و هزینه ها، ابتدا سناریوی پایه با فرض ۳,۰۰۰ ساعت کارکرد در سال (میانگین محدوده محتمل) ارائه می شود.

جدول ۶ - تراز انرژی و هزینه های سالانه در حالت با CHP (سناریوی پایه: ۳,۰۰۰ ساعت کارکرد، ۲,۵۰۰,۰۰۰ کیلووات ساعت برق مصرفی)			
اقدام	مقدار	نرخ	هزینه (میلیون ریال)
هزینه گاز مصرفی CHP	$3,150,000 \text{ m}^3$	500 ریال/m^3	-۱,۵۷۵
کاهش مصرف گاز بویلر (حرارت CHP)	$700,000 \sim \text{m}^3$		+۳۵۰
کاهش مصرف برق از شبکه (برق CHP)	$1,500,000 \text{ kWh}$	800 ریال/kWh	+۱,۲۰۰
برق خریداری باقیمانده	$1,000,000 \text{ kWh}$		-۸۰۰
هزینه تعمیر و نگهداری	$1,500,350,000 \text{ kWh}$	200 ریال/kWh	-۳۰۰
هزینه خالص سالانه	-	-	-۱,۱۲۵

توضیح: علامت منفی نشان دهنده هزینه (خروجی) است. اعداد داخل پرانتز نشان دهنده کاهش هزینه (صرفه جویی) است.

در سناریوی پایه (۳,۰۰۰ ساعت کارکرد)، هزینه خالص سالانه در حالت با CHP حدود ۱,۱۲۵ میلیون ریال است. در مقایسه با هزینه ۳,۷۵۰ میلیون ریال در حالت بدون CHP (جدول ۵)، صرفه جویی سالانه حدود ۲,۶۲۵ میلیون ریال



(حدود ۲۶۲ میلیون تومان) حاصل می شود. این صرفه جویی عمدتاً از دو منبع ناشی می شود: (۱) کاهش خرید برق از شبکه به میزان برق تولیدی CHP و (۲) کاهش مصرف گاز بویلر به میزان حرارت بازیافتی از CHP.

۳-۳. تحلیل حساسیت دوطرفه: دوره بازگشت سرمایه

دوره بازگشت سرمایه از تقسیم هزینه کل سرمایه گذاری بر صرفه جویی سالانه محاسبه می شود. هزینه سرمایه گذاری شامل هزینه پایه سامانه (موتور، مبدل های حرارتی، تجهیزات جانبی، نصب و راه اندازی) به اضافه هزینه الزامات پدافند غیرعامل (۲۰٪ اضافه) است.

فرضیات پایه برای سناریوی محتمل:

- هزینه سرمایه گذاری پایه: ۸۰۰ دلار به ازای هر کیلووات $\times$ ۵۰۰ کیلووات $\times$ ۵۰۰,۰۰۰ ریال = ۲۰۰,۰۰۰ میلیون ریال
- هزینه پدافند غیرعامل (۲۰٪): ۴۰,۰۰۰ میلیون ریال
- هزینه کل سرمایه گذاری: ۲۴۰,۰۰۰ میلیون ریال (۲۴ میلیارد تومان)
- صرفه جویی سالانه در سناریوی پایه (۳,۰۰۰ ساعت): ۲,۶۲۵ میلیون ریال

با این اوصاف دوره بازگشت سرمایه در سناریوی پایه حدود ۹۱ سال می شود. عددی بسیار عجیب که نشان دهنده غیرواقعی بودن تعرفه های گاز و برق در مقایسه با نرخ ارز و قیمت خرید و نصب تجهیزات بر اساس آن نرخ ارز است. جدول ۷ تحلیل حساسیتی است از سناریوهای مختلف در طراحی ظرفیت، قیمت ارزی خرید و ساعات استفاده از سامانه سی اچ پی که شامل ستون صرفه جویی سالانه در هزینه های انرژی و ستون دوره بازگشت سرمایه است.

جدول ۷ - تحلیل حساسیت دوطرفه: دوره بازگشت سرمایه (سال) بر اساس ساعات کارکرد و هزینه سرمایه گذاری				
ساعات کارکرد (h/year)	هزینه سرمایه گذاری (kW/دلار)	هزینه کل سرمایه گذاری (میلیارد ریال)	صرفه جویی سالانه (میلیون ریال)	دوره بازگشت سرمایه (سال)
(۴,۰۰۰) بهینه	۵۰۰ (اروپا)	۱۲۵ (بدون ه پ غ ع)*	-	۴-۳
(۴,۰۰۰) بهینه	۶۰۰ (ایران، خوش)	۱۵۰ (بدون ه پ غ ع)	۳۵۰۰	۴۲
(۳,۵۰۰) خوب	۷۰۰ (ایران، متوسط)	۱۷۵ (بدون ه پ غ ع)	۳۰۰۰	۵۸
(۳,۵۰۰) پایه	۸۰۰ (ایران، محتمل)	۲۰۰ (بدون ه پ غ ع)	۲۵۰۰	۸۰
(۳,۵۰۰) پایه	۸۰۰ (ایران، محتمل)	۲۴۰ (با ه پ غ ع ۲۰٪)	۲۵۰۰	۹۶
(۲,۵۰۰) بدبینانه	۱,۰۰۰ (ایران، بد)	۲۵۰ (بدون ه پ غ ع)	۲۰۰۰	۱۲۵

* ه پ غ ع: هزینه پدافند غیرعامل

این جدول تصویر واقع بینانه ای از صرفه جویی سالانه در هزینه های انرژی را با استفاده از سناریوهای مختلف در ایران بدست می دهد. اما آنچه به طرز شگفت آوری دوره بازگشت سرمایه استفاده CHP در ایران را مطابق محاسبات بالا و اعداد مندرج در جدول ۷ در مقایسه با دوره بازگشت سرمایه اروپا (۳-۴ سال) برای نزدیک به ۱۰۰ سال بالا برده است، غیر واقعی بودن تعرفه های انرژی در ایران در مقایسه با نرخ ارز است. خرید سامانه لاجرم با ارز و معادل ریالی آن محاسبه



می‌شود اما محاسبه صرفه‌جویی در هزینه انرژی با نرخ پایین انرژی مصوب دولت برای بخش کشاورزی است. بنابراین، بر خلاف تصور اولیه که شاخص اسپارک بالای ایران (۱۵) نویدبخش دوره بازگشت بهتر نسبت به کشورهای اروپایی (۳-۴ سال) بود، عامل غیرواقعی بودن تعرفه‌ها و عوامل دیگری مانند ساعات کارکرد محدود و هزینه‌های اضافه شده به بخش سرمایه‌گذاری (ناشی از نبود رقابت، گمرکی، انتقال و ...) مزیت را به طرز غیرقابل باوری از بین می‌برد.

مقایسه نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های پیشین داخلی نشان‌دهنده تفاوت چشمگیر در دوره بازگشت سرمایه برآورد شده است. مومنی و همکاران (۱۴۰۰) دوره بازگشت سرمایه را برای سامانه CHP در گلخانه‌های ایران حدود ۴-۵ سال [۱۱]، روش‌شنل و همکاران (۲۰۱۸) برای سامانه پیل سوختی حدود ۱۰ سال [۱۲]، و گرامیان‌نژاد (۱۴۰۰) برای استفاده از حرارت تلفاتی نیروگاه‌ها حدود ۶ سال [۱۳] گزارش کرده‌اند. در حالی که یافته‌های پژوهش حاضر در سناریوی های مختلف چند ۱۰ سال را نشان می‌دهد. علت اصلی این تفاوت فاحش، تغییرات شدید نرخ ارز در سال‌های اخیر است. پژوهش‌های مذکور عمدتاً بر اساس نرخ ارز حدود ۳۰,۰۰۰ تا ۴۰,۰۰۰ ریال (سه تا چهار هزار تومان) و هزینه سرمایه‌گذاری حدود ۵۰۰-۴۰۰ دلار به ازای هر کیلووات محاسبات خود را انجام داده‌اند، در حالی که در پژوهش حاضر نرخ ارز ۵۰۰,۰۰۰ ریال (پنج‌هزار تومان) و هزینه سرمایه‌گذاری حدود ۸,۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات مبنا قرار گرفته است. از سوی دیگر، تعرفه‌های حامل‌های انرژی در بخش کشاورزی در این سال‌ها افزایش چشمگیری نداشته و عملاً ثابت یا با افزایش جزئی همراه بوده است. این ترکیب (افزایش چندبرابری نرخ ارز در مقابل ثبات نسبی تعرفه‌ها) سبب شده است تا هزینه سرمایه‌گذاری به ریال در پژوهش حاضر حدود ۳۰ برابر بیشتر از پژوهش‌های پیشین باشد، در حالی که صرفه‌جویی سالانه تنها حدود ۴-۵ برابر افزایش یافته است. بنابراین تفاوت در نتایج نه به معنای خطای پژوهش‌های پیشین، بلکه حاکی از تغییرات بنیادین در شرایط اقتصادی کشور است.

۳-۴. چاره کار برای کاهش دوره بازگشت سرمایه

همان‌طور که اشاره شد، نرخ ارز ۵۰ هزار تومانی برای سال ۱۴۰۳ و نرخ تعرفه‌های برق و گاز غیر واقعی و یارانه‌ای در بخش کشاورزی (البته بطور عام در تمام بخش‌های اقتصادی ایران) عایدی حاصل از صرفه‌جویی استفاده از این سامانه‌ها غیر قابل مقایسه با قیمت تمام شده سرمایه‌گذاری می‌کند و دوره بازگشت سرمایه را بسیار بالاتر از عمر اقتصادی دستگاه می‌کند. آیا این چالش باعث رد طرح استفاده از سی‌اچ‌پی در صنایع و خدمات و از جمله کشاورزی می‌شود؟

برای پاسخ به آن حداقل سه ملاحظه را باید در نظر گرفت: مقایسه با سرمایه‌گذاری و دوره بازگشت سرمایه در نیروگاه‌های بزرگ مقیاس رایج در کشور، انجام محاسبات با نرخ فروش برق مازاد به شبکه و مبحث پدافند غیر عامل.

۱-۳-۴. مقایسه با نیروگاه‌های بزرگ مقیاس

مشکل اقتصادی عدم همخوانی تعرفه‌ها با نرخ ارز و سرمایه‌گذاری تنها مختص سامانه‌های CHP نیست. نیروگاه‌های بزرگ مقیاس گازی در ایران نیز با همان نرخ‌های سوخت و برق، دوره بازگشت سرمایه طولانی‌تری نسبت به استانداردهای جهانی دارند. بر اساس گزارش گرامیان‌نژاد (۱۴۰۰) هزینه احداث نیروگاه سیکل ترکیبی در ایران برای سال‌های قبل از این مطالعه (قبل از ۱۴۰۰) حدود ۵۰۰ تا ۷۰۰ دلار به ازای هر کیلووات بود [۱۳]، اما به دلیل نرخ پایین خرید برق (کمتر از ۱,۰۰۰



ریال برای نیروگاه‌های دولتی)، دوره بازگشت سرمایه این نیروگاه‌ها نیز به ۱۵ تا ۲۰ سال می‌رسید که در مقایسه با استاندارد جهانی (۷-۵ سال) بسیار بالاست. باید توجه شود که در سال‌های تحت مطالعه ایشان (قبل ۱۴۰۰) که دوره بازگشت سرمایه را برای نوعی از سامانه سی اچ پی ۶ سال برآورد کرده بوده، دوره بازگشت سرمایه نیروگاه بزرگ در ایران ۲۰-۱۵ سال گزارش شده است. و اگر برای سال مطالعه حاضر (۱۴۰۳) گزارش مشابهی از نیروگاه‌های بزرگ و تحلیل اقتصادی آنها صورت گیرد، با توجه به ۱۷ برابر شدن نرخ ارز در سال ۱۴۰۳ نسبت به آن سال‌ها، دوره بازگشت سرمایه آنها به طرز غیرقابل باوری چند برابر خواهد شد. بنابراین، مشکل اصلی نه در فناوری CHP، بلکه در ساختار قیمت‌گذاری حامل‌های انرژی در ایران است. در چنین شرایطی، دوره بازگشت چند ده ساله CHP را نباید به پای ضعف فناوری نوشت، بلکه باید آن را نتیجه یک ساختار اقتصادی بیمارگونه تلقی کرد که تمام زیربخش‌های انرژی را درگیر کرده است.

۲-۴-۳. فروش برق مازاد به شبکه با نرخ تضمینی

دومین راهکار عملی برای بهبود دوره بازگشت سرمایه، فروش برق مازاد تولیدی به شبکه سراسری با نرخ تضمینی خرید برق تجدیدپذیر و تولید پراکنده است. این نرخ در سال ۱۴۰۳ حدود ۳,۵۰۰ ریال به ازای هر کیلووات‌ساعت تعیین شده است [۲۴] که بیش از چهار برابر نرخ خرید برق از شبکه برای مصارف کشاورزی (۸۰۰ ریال) است. در صورت افزایش ساعات کارکرد به ۶,۰۰۰ ساعت در سال برق مازاد بر مصرف برای فروش به شبکه وجود خواهد داشت. با افزودن بارهای حرارتی دیگر مانند سامانه‌های خشک‌کن یا ارسال گرما (مثلاً آبگرم) به گلخانه‌ها یا مصرف‌کننده‌های مجاور می‌توان مازاد تولید گرما را نیز به عایدی اقتصادی تبدیل کرد. در این حالت، حتی فرض فروش تنها ۵۰۰,۰۰۰ کیلووات‌ساعت مازاد با نرخ ۳,۵۰۰ ریال، درآمدی بالغ بر ۱,۷۵۰ میلیون ریال به صرفه‌جویی سالانه اضافه می‌کند و دوره بازگشت سرمایه را از ۹۰ سال به حدود ۵۷ سال کاهش می‌دهد. هرچند این رقم هنوز بسیار بالا است، اما نشان‌دهنده تأثیر مثبت قابل توجه این سیاست حمایتی است.

۳-۴-۳. مزیت پدافند غیرعامل (فراتر از محاسبات اقتصادی)

سومین و شاید مهم‌ترین چاره کار، خارج شدن از چارچوب صرفاً اقتصادی و ورود به حوزه امنیت ملی و پدافند غیرعامل است. در شرایط ژئوپلیتیک کنونی، تأسیسات متمرکز تولید و انتقال انرژی (نیروگاه‌ها، پست‌های برق، خطوط انتقال گاز) به شدت در برابر تهدیدات فیزیکی و سایبری آسیب‌پذیر هستند [۲۵]. قطعی گسترده شبکه در فصول سرد، نه تنها گلخانه‌ها بلکه کل نظام تولید غذای کشور را با مخاطره مواجه می‌کند. در چنین وضعیتی، هزینه سرمایه‌گذاری در CHP دیگر یک هزینه با محاسبات صرفه اقتصادی نیست، بلکه یک چاره‌جویی بخشی برای تأمین امنیت انرژی پایدار محسوب می‌شود. از منظر پدافند غیرعامل، هر سامانه CHP که قابلیت جزیره‌ای شدن و تأمین انرژی اضطراری را داشته باشد، صرف نظر از دوره بازگشت اقتصادی، یک دارایی راهبردی ارزشمند است [۲۶]. به عبارت دیگر، در شرایط بحران، نبود این سامانه‌ها می‌تواند خساراتی به مراتب بیشتر از هزینه سرمایه‌گذاری آنها ایجاد کند. بنابراین، ارزیابی اقتصادی CHP در ایران نباید صرفاً بر اساس دوره بازگشت سرمایه انجام شود، بلکه مزیت‌های پدافندی آن باید در تصمیم‌گیری‌های کلان لحاظ گردد.



این ملاحظه در بخش خصوصی هم در سال های اخیر اتفاق می افتد. بسیاری از کارخانجات، مراکز خدماتی، تولیدی و کشاورزی، برای مقابله با کمبود و قطعی برق و جلوگیری از هزینه های اقتصادی ناشی از آن بدون محاسبه صرف سود و زیان اقتصادی و انرژی، سرمایه گذاری زیادی در تهیه و خرید ژنراتورهای با اندازه های کوچک و بزرگ می کنند. این ژنراتورها در حقیقت برای روز مبادا تهیه می شوند و شاید ساعات کارکرد سالانه آنها به ۵۰۰ ساعت هم نرسد که اگر برای آن دوره بازگشت سرمایه حساب شود بطور سرسام آوری بالاتر از آنچه که برای سی اچ پی محاسبه شد خواهد بود.

۳-۵. جمع بندی مزایا و معایب سامانه های CHP در گلخانه ها

به منظور ارائه تصویری متوازن و علمی، در این بخش مزایا و معایب CHP به طور همزمان و صریح ذکر می شود. این جدول نشان می دهد که CHP در ایران با چالش های جدی تری نسبت به اروپا مواجه است.

جدول ۹ - مزایا و معایب سامانه های CHP در گلخانه ها

دسته	عنوان	توضیح	منبع
مزایا	بازده کلی بالا	۸۵٪-۸۰٪ در مقابل ۴۵-۵۰٪ برای تأمین جداگانه	[۳,۷]
	کاهش هزینه انرژی	۲۰٪-۱۵٪ در شرایط بهینه	[۱۳] و این پژوهش
	تأمین CO ₂ برای فتوسنتز	افزایش عملکرد محصول تا ۱۲٪	[۵,۶]
	کاهش انتشار کربن	تا ۲۵٪ کاهش انتشار گازهای گلخانه ای	[۸]
	مزیت پدافند غیرعامل	جزیره ای شدن، کاهش وابستگی به شبکه، تأمین انرژی اضطراری	[۲۵,۲۶]
معایب	تولید برق در محل	کاهش تلفات انتقال (حدود ۱۰٪-۷)	[۲]
	سرمایه گذاری اولیه بالا	۸۰۰-۱,۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات در شرایط فعلی ایران	برآورد این پژوهش
	نیاز به نگهداری تخصصی	هزینه سالانه ۲۰۰~ ریال به ازای هر کیلووات ساعت	[۱۳]
	صدای موتور	۱۰۰~ دسی بل بدون محفظه، نیاز به عایق صدا	[۳]
	پیچیدگی راه اندازی	نیاز به دانش فنی بالا و نیروی ماهر	[۱۱]
	وابستگی به قیمت های	با حذف یارانه ها یا افزایش قیمت گاز و برق، توجیه اقتصادی بالا می رود.	تحلیل حساسیت این پژوهش
	ترجیحی		
	ساعات کارکرد محدود در اقلیم ایران	به دلیل نیاز حرارتی کمتر در ماه های گرم، سامانه بخش زیادی از سال بیکار می ماند	محاسبات این پژوهش

۴. نتیجه گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر با هدف بررسی امکان سنجی اقتصادی و فنی سامانه های تولید همزمان گرما و برق در گلخانه های ایران و با تأکید بر مزیت های پدافند غیرعامل انجام شد. محاسبات برای گلخانه ۵ هکتاری خیار در اقلیم تبریز نشان داد که با نرخ ارز ۵۰۰,۰۰۰ ریال (۵۰,۰۰۰ تومان) و تعرفه های فعلی انرژی (گاز ۵۰۰ ریال، برق ۸۰۰ ریال)، دوره بازگشت سرمایه در سناریوی پایه حدود ۹۱ سال برآورد می شود که به مراتب بیشتر از عمر مفید سامانه (۱۰-۱۲ سال) است. تحلیل حساسیت نشان داد



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



که حتی در خوش‌بینانه‌ترین سناریوها (ساعات کارکرد ۴,۰۰۰ ساعت، هزینه سرمایه‌گذاری ۵۰۰ دلار بر کیلووات) نیز دوره بازگشت سرمایه به کمتر از ۴۰ سال کاهش نمی‌یابد. یافته کلیدی پژوهش آن است که مشکل اصلی نه در فناوری CHP، بلکه در ناهمخوانی شدید بین نرخ ارز و تعرفه‌های تقریباً ثابت حامل‌های انرژی است. این ناهمخوانی نه تنها CHP، بلکه نیروگاه‌های بزرگ مقیاس در ایران را نیز با دوره بازگشت سرمایه چندین برابر استاندارد جهانی مواجه کرده و حاکی از ساختار اقتصادی بیمارگونه در بخش انرژی کشور است.

با وجود عدم توجیه اقتصادی از منظر بازگشت سرمایه در شرایط فعلی، سامانه‌های CHP به دلیل قابلیت جزیره‌ای شدن، تأمین انرژی اضطراری و کاهش وابستگی به شبکه سراسری، از منظر پدافند غیرعامل دارای ارزش راهبردی هستند. در شرایط ژئوپلیتیک کنونی، قطعی گسترده شبکه در فصول سرد می‌تواند خساراتی به مراتب بیشتر از هزینه سرمایه‌گذاری CHP ایجاد کند. پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاران نسبت به بازنگری در ساختار تعرفه‌های انرژی (هماهنگ‌سازی با نرخ ارز) و توسعه نرخ تضمینی برای فروش برق مازاد (۳,۵۰۰ ریال) اقدام نمایند. به جای سرمایه‌گذاری دولتی برای ایجاد نیروگاه‌های بزرگ متداول، حمایت‌های لازم با تأمین سرمایه و نرخ‌های ترجیحی ارز و تعرفه گاز و برق، برای تشویق ایجاد واحدهای CHP توسط بخش خصوصی انجام شود. همچنین مطالعات مقایسه‌ای اقتصادی و انرژی و نیز تحلیل چرخه حیات برای مقایسه مزیت احداث نیروگاه‌های کوچک CHP در مقایسه با نیروگاه‌های بزرگ انجام شود.

۵. منابع

- [1] International Energy Agency (IEA). (2023). CHP and the spark spread: A guide for policymakers. Paris: IEA Publications.
- [2] US Environmental Protection Agency (EPA). (2022). Catalog of CHP Technologies. Washington DC: EPA.
- [3] INNIO Jenbacher. (2023). Jenbacher Type 4 Series: Technical Documentation. Jenbach, Austria: INNIO Group.
- [4] Van der Velden, N. J. A., & Smit, P. X. (2020). Energy transition in Dutch greenhouse horticulture: 30 years of CHP adoption. Wageningen Economic Research, Report 2020-045.
- [5] Dimitropoulou, A. M. N., Giannini, E. N., & Maroulis, Z. B. (2025). A greenhouse profitability model: The effect of the energy system. *Energies*, 18(18), 4748.
- [6] Pennsylvania State University. (2025). Energy dispatch optimization at controlled environment agriculture sites with combined heat and power. *Energy Conversion and Management*, 332, 119743.
- [7] Hindipour, A., Sadeghi, M., & Rahimi, M. (2024). Sizing optimization of CHP systems for mid-scale greenhouses in semi-arid climates. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 65, 103752.
- [8] Pastore, L. M., & De Santoli, L. (2023). Competitive analysis of CHP systems in high renewable penetration scenarios. *Applied Energy*, 340, 121015.
- [9] Vutukuru, R., Sharma, A., & Singh, R. (2024). Solar energy-assisted CCHP cycles for dairy applications. *Cogent Engineering*, 11(1), 2327568.



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



[10] Norouzi, M., & Razavi, S. M. (2021). Energy challenges in Iranian agricultural sector. Iranian Journal of Energy, 24(3), 45-62.

[11] مومنی، د.، زارعی، غ. و جوادی مقدم، ج. (۱۴۰۰). ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست محیطی استفاده از سیستم های تولید همزمان گرما و برق در گلخانه های ایران. فصلنامه مکانیزاسیون کشاورزی و سیستم های تحقیقاتی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

[12] Roshandel, R., Golzar, F., & Astaneh, M. (2018). Technical, economic and environmental optimization of combined heat and power systems based on solid oxide fuel cell for a greenhouse case study. Energy Conversion and Management, 172, 15-28.

[13] گرامیان نژاد، ا. (۱۴۰۰). امکان سنجی فنی و اقتصادی استفاده از حرارت تلفاتی نیروگاه ها برای تأمین گرمایش گلخانه ها. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.

[14] سازمان جهاد کشاورزی استان تهران. (۱۴۰۲). گزارش آماری گلخانه های استان تهران. تهران: معاونت برنامه ریزی و اقتصادی.

[15] ASHRAE. (2021). ASHRAE Handbook - Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

[16] جلیلی، ع. و مرادی، ف. (۱۴۰۰). اصول طراحی و مدیریت گلخانه (چاپ سوم). تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

[17] کریمی، م. و رضایی، ف. (۱۴۰۱). بررسی علل مصرف بالای انرژی در گلخانه های ایران: یک مطالعه میدانی. نشریه انرژی و محیط زیست ایران، ۴(۱۳)، ۴۵-۶۲.

[18] حاجی زاده، ع.، صفری، ن. و محمدی، ک. (۱۴۰۲). اندازه گیری و تحلیل مصرف انرژی در ۲۵ گلخانه خیار استان اصفهان. مجله مهندسی مکانیک بیوسیستم، ۹(۲)، ۱۱۲-۱۲۸.

[19] مهرجو، ح.، کریمی، م. و حسینی، س. (۱۴۰۱). الگوی مصرف برق در گلخانه های خیار استان تهران و البرز. نشریه پژوهش های انرژی کشاورزی، ۷(۳)، ۲۳۱-۲۴۸.

[20] نوروزی، م. و رضوی، س. م. (۱۳۹۹). نیازهای روشنایی در گلخانه های ایران: مطالعه موردی گلخانه های خیار. مجله علوم باغبانی ایران، ۵۱(۲)، ۳۴۵-۳۶۰.

[21] شرکت ملی گاز ایران و شرکت توانیر. (۱۴۰۳). نرخ های خرید و فروش حامل های انرژی در بخش کشاورزی سال ۱۴۰۳. تهران: وزارت نیرو.

[22] سازمان پدافند غیرعامل کشور. (۱۴۰۱). دستورالعمل طراحی و استقرار سامانه های انرژی در تأسیسات حیاتی و حساس (شماره نشریه ۷۲۳). تهران: معاونت زیرساخت.

[23] ستاد کل نیروهای مسلح. (۱۴۰۰). آیین نامه ایمنی و پدافند غیرعامل تأسیسات کشاورزی راهبردی. تهران: دفتر تدوین مقررات.

[24] حسینی، س. ر. و امیری، م. (۱۴۰۲). برآورد هزینه های پدافند غیرعامل در پروژه های زیرساختی ایران. فصلنامه مهندسی دفاعی، ۱۸(۱)، ۷۵-۹۴.

[25] شرکت بهینه سازی مصرف سوخت. (۱۴۰۲). راهنمای سرمایه گذاری در سامانه های تولید همزمان گرما و برق در ایران. تهران: انتشارات شرکت بهینه سازی مصرف سوخت.



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



سازمان
کشاورزی
و
توسعه
کشاورزی

[26] ستاد کل نیروهای مسلح. (۱۴۰۰). آیین نامه ایمنی و پدافند غیرعامل تأسیسات کشاورزی راهبردی. تهران: دفتر تدوین مقررات.