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

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[1]*، شمس اله عبداله پور[1]، سمیرا کمیلی[1]، غزاله عالی‌شاملو[1]

گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز

maysami@tabrizu.ac.ir

کدمقاله: EFAB015831211

چکیده

- پیشینه و هدف:
با افزایش هزینه‌های انرژی و تعدیل یارانه‌ها در ایران، به‌کارگیری سامانه‌های تولید همزمان گرما و برق (CHP) ضرورت یافته است. پژوهش‌های پیشین بیشتر بر مقیاس بزرگ (بیش از ۲ مگاوات) متمرکز بوده و مزیت پدافند غیرعامل این سامانه‌ها را نادیده گرفته‌اند.

- روش تحقیق:
این مطالعه با مرور پژوهش‌های مختلف، یک مطالعه موردی محاسباتی برای گلخانه ۵ هکتاری خیار در اقلیم تبریز ارائه می‌دهد. نیاز حرارتی به روش درجه-روز رشد برآورد شده و یک سامانه CHP با موتور گازسوز ۵۰۰ کیلوواتی پیشنهاد می‌گردد.

- یافته‌ها:
دوره بازگشت سرمایه در سناریوی پایه حدود ۹۱ سال برآورد می‌شود که دلیل آن نه نقص فناوری CHP، بلکه ناهمخوانی شدید نرخ ارز با تعرفه‌های ثابت انرژی است. با این حال، قابلیت جزیره‌ای شدن این سامانه‌ها با اصول پدافند غیرعامل همخوانی دارد.

- نتیجه‌گیری:
اگرچه سرمایه‌گذاری خصوصی روی CHPهای کوچک‌مقیاس در شرایط فعلی تعرفه‌گذاری انرژی در ایران با چالش اساسی مواجه است، اما با لحاظ مزیت‌های پدافندی، این سامانه‌ها راهبردی مؤثر برای ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌های کشاورزی در شرایط بحران محسوب می‌شوند.

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

مقدمه: CHP چیست؟ معرفی و مبانی علمی

- تعریف: سیستم تولید همزمان برق و حرارت

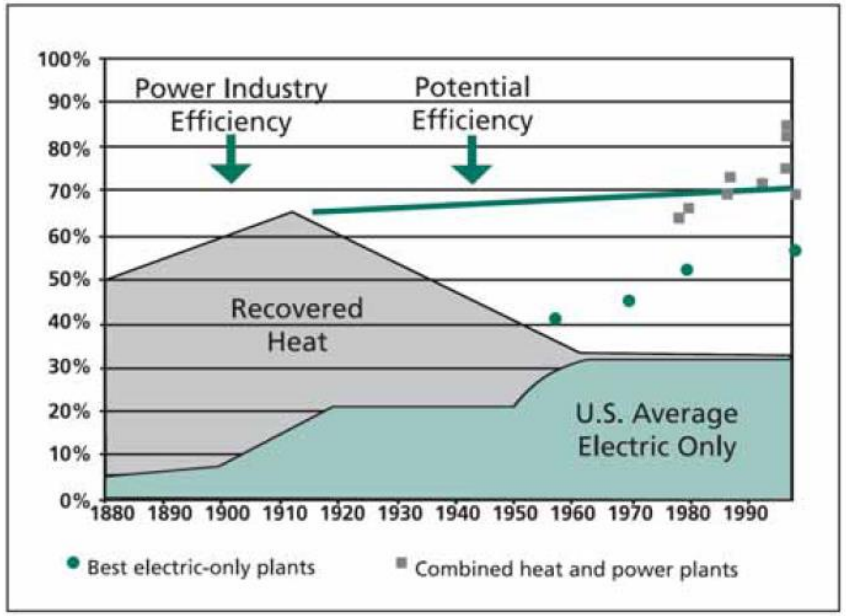
CHP
Combined Heat and Power
(Waste Heat Recycling)

فناوری است که از یک منبع انرژی اولیه (مانند دیزل، گاز طبیعی یا زیست سوخت) برای تولید همزمان برق و حرارت مفید استفاده می‌کند.

- مبنای ترمودینامیکی: به جای هدر دادن گرمای تولیدی در فرآیند تولید برق (مانند نیروگاه‌های مرسوم)، این حرارت بازیافت و برای مصارف گرمایشی، سرمایشی یا فرآیندی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

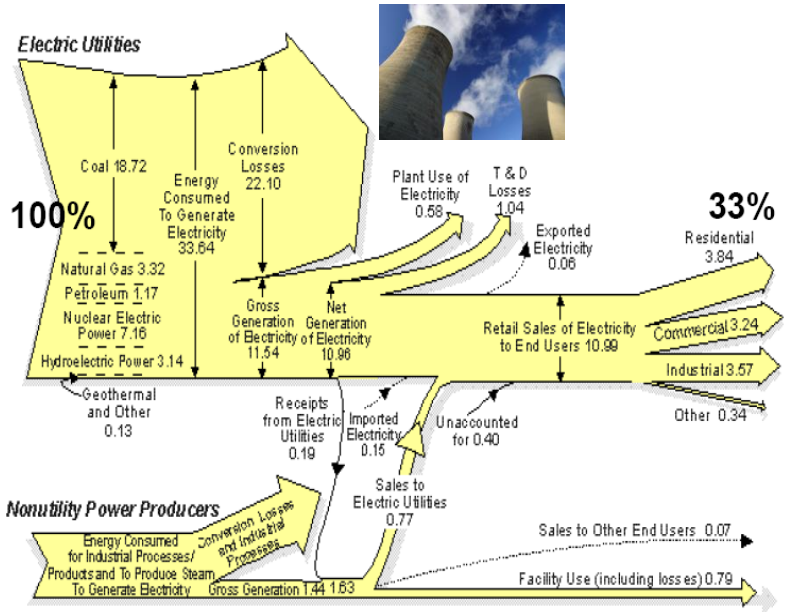
- اجزای اصلی سیستم:
  - مولد نیروی محرکه (موتور پیستونی یا توربین)
  - ژنراتور الکتریکی
  - سیستم بازیافت حرارت
  - سیستم کنترلی یکپارچه

مقدمه: بازده انرژی در تولید برق



Source: Primary Energy

In 1910 Fuel utilization was 65%
Today, nearly 100yrs later, it is only 33%



کارایی فوق‌العاده CHP: در حالی که راندمان نیروگاه‌های **گازی سنتی** حدود ٪۳۵-۳۰ و نیروگاه‌های **سیکل ترکیبی** حداکثر ٪۵۵ است، **سیستم‌های CHP** می‌توانند به راندمان کلی **۷۵ تا ۹۰ درصد** دست یابند.

مقدمه: انواع CHP: موتور پیستونی – توربین (میکروتوربین)

نمونه ای از یک CHP توربینی

First microturbine to CE certify under severe Gas Appliance Directive rules.

UL2200 Certified

3 configurations CE Marked

- CHP
- Monogen
- Hazardous Area / Offshore

واحدهای CHP توربینی نصب شده در داخل شهرها و کارخانجات یا مجتمع ها

15 - TA100 CHP units installed to provide hot water and supplemental electric power to the US Military base.

CHP

80 kW Power Generation
Direct Exhaust Fired 40 USrT Absorption Chiller

CCHP

مقدمه: مقایسه انواع CHP

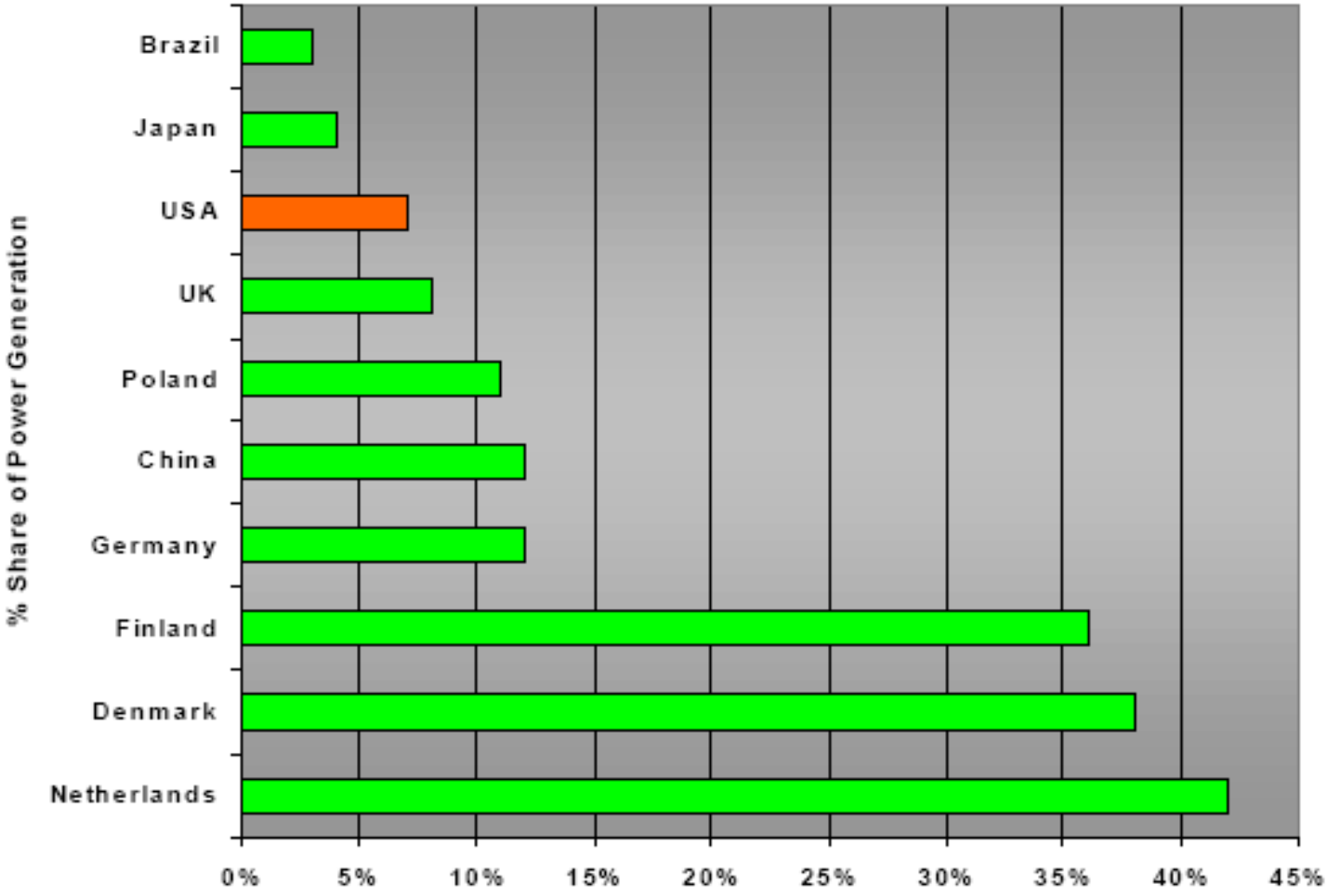
فناوری	محدوده ظرفیت	راندمان الکتریکی	دمای حرارت بازیافتی	مناسب برای بخش کشاورزی
موتورهای درونسوز	۵ کیلووات – ۱۰ مگاوات	۳۵–۴۵٪	متوسط (۸۰–۱۲۰ °C)	بسیار مناسب برای واحدهای متوسط (دامداری، کارگاه فرآوری)
میکروتوربین‌ها	۳۰ کیلووات – ۱ مگاوات	۲۵–۳۵٪	پایین (۲۰۰–۳۰۰ °C)	مناسب برای گلخانه‌ها و واحدهای کوچک
توربین‌های گازی	۱ مگاوات – ۳۰۰ مگاوات	۳۰–۴۰٪	بالا (۴۵۰–۶۰۰ °C)	برای مجتمع‌های کشاورزی-صنعتی بسیار بزرگ
پیل سوختی	۵ کیلووات – ۲ مگاوات	۴۰–۶۰٪	پایین (۶۰–۹۰ °C)	فناوری نوظهور، بازده بالا، آلایندگی کم

مقدمه: استفاده از واحد CHP در گلخانه ها

برای ایجاد گرمای لازم در زمستان و یا سرمای لازم (چیلر جذبی) در تابستان و تولید برق

[Clarke Energy: installed CHP in Glasshouse in Isle of Wight in UK]

مقدمه: سهم CHP از کل تولید برق در کشورهای مختلف



مواد و روشها: مسئله و انگیزه پژوهش

- افزایش هزینه انرژی در گلخانه‌ها
- تعدیل یارانه حامل‌های انرژی در ایران
- CHP با بازده ۸۰٪< جایگزین مناسب تأمین جداگانه گرما و برق
- شکاف تحقیقاتی:
  - تمرکز پیشین روی مقیاس‌های بزرگ (۲< مگاوات)
  - غفلت از پدافند غیرعامل
  - عدم استفاده از قیمت‌های به‌روز انرژی

مواد و روشها: اهداف و نوآوری

- طراحی CHP کوچک‌مقیاس (<۱ مگاوات) برای گلخانه ۵ هکتاری در تبریز
- استفاده از قیمت‌های به‌روز انرژی (۱۴۰۳)
- محاسبه شاخص اسپارک برای ایران
- ادغام الزامات پدافند غیرعامل در تحلیل اقتصادی

مواد و روش ها: پیش فرض های گلخانه مد نظر

- موقعیت: تبریز (اقلیم سرد و نیمه‌خشک)
- مساحت: ۵ هکتار
- کشت: خیار گلخانه‌ای
- پوشش: پلاستیک دولایه، اسکلت فلزی
- دلیل انتخاب: دسترسی به داده هواشناسی + نمایندگی اقلیم

مواد و روش‌ها: برآورد بار حرارتی گلخانه

- روش: درجه-روز رشد (GDD)
- دمای پایه خیار: ۱۵ °C
- GDD تبریز: ۱۳۵۰ کلوین-روز
- ضریب انتقال حرارت

$$U = ۷.۵\ W/m^2 \cdot K$$

- **نکته کلیدی:** مصرف واقعی گاز در ایران ۳-۲ برابر استاندارد اروپاست.

- نیاز حرارتی واقعی (محافظه‌کارانه): **۳٫۵ میلیون مترمکعب گاز در سال**
- نیاز الکتریکی واقعی: **۲٫۵ میلیون کیلووات‌ساعت در سال**
- جمع هزینه انرژی سالانه بدون CHP: **۳،۷۵۰ میلیون ریال** (~۳۷۵ میلیون تومان)

مواد و روش‌ها: انتخاب سامانه CHP

- رویکرد Heat-led: (اولویت تأمین گرما)
- ظرفیت انتخاب‌شده: **۵۰۰ کیلووات الکتریکی** (یک ماژول پایه)
- توان حرارتی نامی: ۵۵۰ کیلووات
- بازده الکتریکی ٪۴۲، حرارتی ٪۴۰، کلی ٪۸۲
- مصرف گاز در بار کامل: ~۱،۰۵۰ m^3/h

مواد و روشها: شاخص اسپارک (Spark Spread)

- **شاخص اسپارک:** نسبت قیمت برق به گاز
- گاز کشاورزی: ۵۰۰ ریال/m^3 ~ ۵۴ ریال/kWh
- برق کشاورزی: ۸۰۰ ریال/kWh
- **شاخص اسپارک ایران = ۱۵**
- مقایسه: اروپا ۳-۵~، آستانه اقتصادی ۳~
- ظاهراً جذاب، اما...

مواد و روشها: پدافند غیرعامل در CHP

- اصول: پراکندگی، خودکفایی، تأمین انرژی اضطراری
- مزایای ذاتی CHP:
  - جزیره‌ای شدن
  - کاهش وابستگی به شبکه
  - طراحی غیرمتمرکز
  - ذخیره سوخت چندگانه (گازوئیل پشتیبان)
- هزینه اضافی پدافند غیرعامل: **۱۵-۲۰٪ سرمایه‌گذاری اولیه**

نتایج: تحلیل اقتصادی – سناریوی پایه

- سرمایه‌گذاری پایه: ۸۰۰ دلار برای هر kW * ۵۰۰ = ۲۰۰،۰۰۰ میلیون ریال
- هزینه پدافند غیرعامل (۲۰٪): +۴۰،۰۰۰ میلیون ریال
- **کل سرمایه‌گذاری: ۲۴۰ میلیارد ریال (۲۴ میلیارد تومان)**
- صرفه‌جویی سالانه: ۲،۶۲۵ میلیون ریال
- **دوره بازگشت سرمایه = ۹۱ سال**
- عمر مفید سامانه: فقط ۱۲-۱۰ سال

نتایج: تحلیل حساسیت دوطرفه بر اساس ساعات کارکرد سالانه

ساعت کارکرد (ساعت در سال)	هزینه سرمایه‌گذاری (دلار / kW)	دوره بازگشت (سال)
۴،۰۰۰ (بهینه)	۵۰۰ (اروپا)	۳-۴
۴،۰۰۰	۶۰۰ (ایران، خوش)	۴۲
۳،۵۰۰	۸۰۰ (پایه)	۸۰
۳،۵۰۰	۸۰۰ + پدافند	۹۱
۲،۵۰۰	۱،۰۰۰ (بدبینانه)	۱۲۵

نتیجه: حتی در خوش‌بینانه‌ترین حالت <۴۰ سال

نتایج: چرا چنین دوره بازگشتی؟

- نرخ ارز: ۵۰۰،۰۰۰ ریال (۵۰،۰۰۰ تومان) در ۱۴۰۳
- تعرفه انرژی کشاورزی تقریباً ثابت
- هزینه سرمایه‌گذاری به ریال ~۳۰ برابر پژوهش‌های پیشین
- صرفه‌جویی سالانه فقط ~۵-۴ برابر افزایش
- **مشکل اصلی: ناهمخوانی نرخ ارز و تعرفه انرژی** (نه ضعف فناوری CHP)
- نیروگاه‌های بزرگ مقیاس در ایران نیز دوره بازگشت >۲۰-۱۵ سال دارند

نتایج: راهکارهای بهبود دوره بازگشت سرمایه

۱. **فروش برق مازاد با نرخ تضمینی ۳،۵۰۰ ریال** (۴ برابر نرخ خرید)

- کاهش دوره بازگشت از ۹۱ به ~۵۷ سال

۲. **بازنگری در تعرفه‌های انرژی متناسب با نرخ ارز**

۳. **نگاه پدافند غیرعامل: CHPیک دارایی راهبردی**

- در بحران، خسارت قطعی شبکه ≫ هزینه سرمایه‌گذاری CHP
- مشابه خرید ژنراتور در کارخانجات بدون محاسبه ROI

نتایج: جمع‌بندی مزایا و معایب

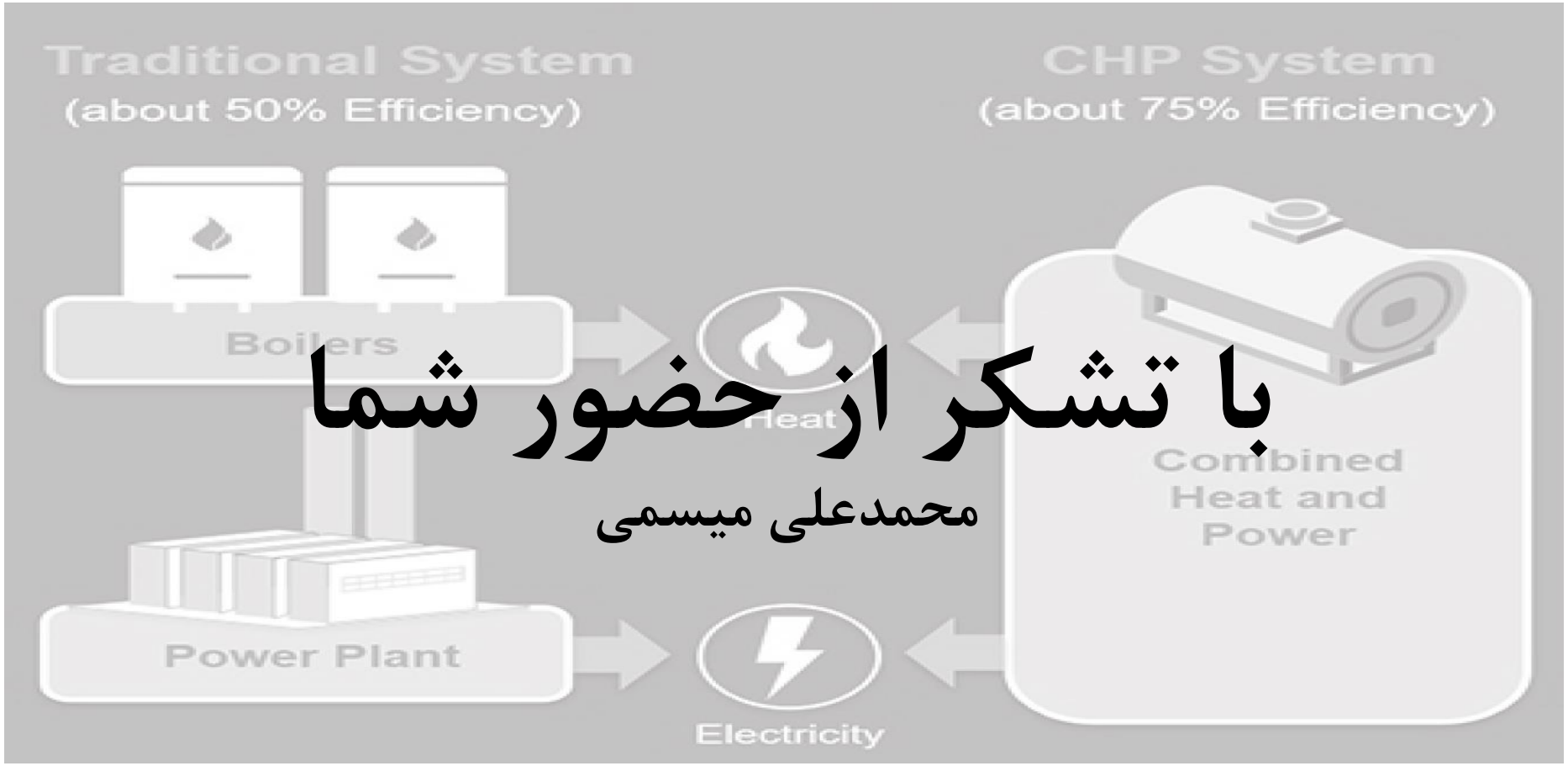
مزایا	معایب
بازده ٪۸۲	سرمایه‌گذاری اولیه بالا (~۸۰۰-۱۰۰۰ دلار /kW)
کاهش ٪۲۰-۱۵ هزینه انرژی	نگهداری تخصصی و هزینه‌بر
تامین CO_2 برای فتوسنتز	صدای موتور ~ ۱۰۰dB
جزیره‌ای شدن (پدافند غیرعامل)	وابستگی به قیمت‌های ترجیحی انرژی
کاهش تلفات انتقال	ساعات کارکرد محدود در اقلیم ایران

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- **CHP در شرایط فعلی تعرفه‌ای و ارزی ایران توجیه اقتصادی متداول برای بخش خصوصی ندارد**
- اما از منظر پدافند غیرعامل **دارای ارزش راهبردی** است

پیشنهادها:

- بازنگری در تعرفه انرژی هماهنگ با نرخ ارز
- توسعه نرخ تضمینی خرید برق مازاد
- حمایت از CHP های کوچک‌مقیاس خصوصی به جای نیروگاه‌های بزرگ متمرکز
- انجام مطالعات مقایسه‌ای چرخه حیات CHP کوچک در مقابل نیروگاه بزرگ



با تشکر از حضور شما

محمدعلی میسمی