

امکان سنجی فنی، اقتصادی و زیست محیطی استفاده از تولید همزمان برق و حرارت (CHP) در صنعت سیمان

قاسم عرب^۱ امید جلالی^۲

چکیده

فناوری های تولید همزمان برق و حرارت (CHP)، برق و یا توان مکانیکی تولید نموده و حرارت اضافی را برای مصارف مختلف بازیافت می نمایند. در ابتدای این تحقیق، با مروری بر نحوه بازیافت انرژی برای تولید برق در صنعت سیمان، به تشریح فناوری CHP مورد نظر پرداخته می شود. در ادامه با تحلیل امکان سنجی فنی، اقتصادی و زیست محیطی استفاده از این فناوری در یک کارخانه نمونه سیمان، مزیت استفاده از آن را برای صنعت سیمان از دید ملی و بنگاه اقتصادی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

بر اساس نتایج این تحقیق می توان گفت استفاده از سیستم های CHP در صنعت سیمان کاملاً موجه بوده و علاوه بر مزیت اقتصادی که برای دولت و کارخانه در بر دارد در کاهش آلاینده های زیست محیطی نقش مهمی ایفا می نماید. همچنین با توجه به اینکه بر اساس برنامه دولت، قیمت حامل های انرژی بتدریج افزایش خواهد یافت لذا جذابیت اقتصادی طرح برای واحدهای صنعتی بسیار بیشتر خواهد شد. در این تحقیق، بررسی بر روی نمونه ای با ظرفیت ۳۳۰۰ تن در روز انجام شده است و نتایج نشان می دهند دوره بازگشت سرمایه در واحد نمونه از دید ملی ۱/۱ سال و از دید واحد صنعتی برابر ۳/۳ سال می باشد. میزان کاهش در هزینه های اجتماعی که می تواند برای دولت ها بسیار مهم باشد در این طرح نمونه برابر ۰/۶۷ میلیون دلار در سال و میزان پتانسیل جذب تسهیلات بین المللی از محل CDM، برابر ۰/۴۸ میلیون دلار در سال بدست آمده است که به جذابیت اقتصادی بیشتر طرح از دید واحد صنعتی می انجامد. مشارکت دولت در سرمایه گذاری طرح های CHP، آشناسازی مدیران و کارشناسان با فناوری و تصویب قوانین و مقررات در جهت توسعه استفاده از این سیستم ها در کارخانجات جدید و موجود از راهکارهای پیشنهادی جهت توسعه استفاده از این فناوری در صنعت سیمان کشور بوده است.

واژه های کلیدی:

تولید همزمان برق و حرارت (CHP) - سیمان - بهینه سازی مصرف انرژی - بازیافت انرژی - هزینه های اجتماعی - CDM

۱- مقدمه

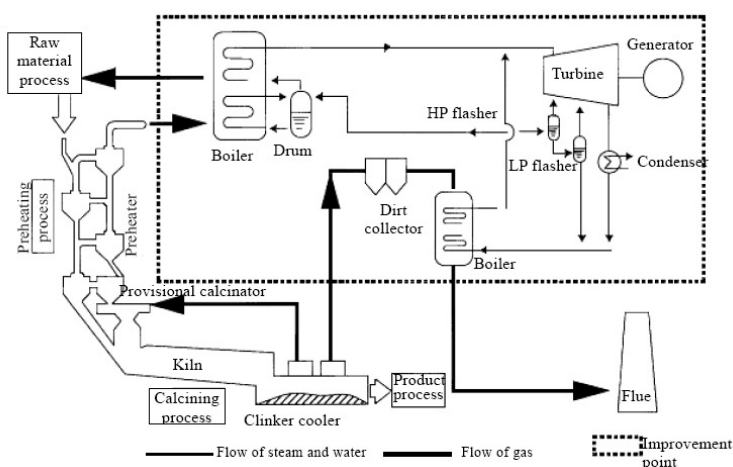
با توجه به مصرف قابل توجه انواع حامل‌های انرژی در زیربخش‌های صنعتی مختلف، به کارگیری روش مناسب برای کاهش مصرف انرژی و استفاده بهینه از آن گامی مؤثر در توسعه صنعتی می‌باشد. علاوه بر اهمیت مسأله انرژی، اطمینان از نحوه تأمین آن در بسیاری از صنایع بسیار حیاتی است. به دلیل وجود مقدار زیادی تلفات در هنگام تبدیل انرژی حرارتی به انرژی مکانیکی یا الکتریکی فرضیه استفاده از تولید همزمان شکل گرفته است. این تلفات معمولاً به صورت حرارت وارد دودکش شده، دمای آن کنترل شده و در اتمسفر آزاد می‌شوند. با بازیافت مقداری از حرارت در مبدل‌های حرارتی، بازدهی کل سیستم به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و در عین حال که برق تولید می‌شود، حرارت مورد نیاز مراکز تجاری، صنعتی و عمومی نیز تأمین می‌گردد. در بسیاری از کشورهای دنیا، سهم زیادی از توان تولید شده مربوط به تولید همزمان می‌باشد و CHP یکی از ارکان مهم در زیربخش‌های صنعتی به شمار می‌رود. این در حالی است که در ایران در حال حاضر اطلاع کافی از مزایای این فناوری وجود نداشته و بسیاری از عوامل مانند غیر واقعی بودن قیمت انرژی و امکان دسترسی آسان به آن، مانع از توسعه این فناوری کارآمد شده است. از عوامل نفوذ بالای CHP در کشورهای صنعتی، می‌توان به حمایت‌های دولتی از قبیل دادن وام‌های کم بهره برای نصب تأسیسات CHP، حذف هزینه‌های گمرکی از تجهیزات مورد استفاده در CHP و تعیین قیمت عادلانه برای خرید مازاد برق تولید شده در واحدهای صنعتی اشاره نمود. به کارگیری این تجربیات می‌تواند نقش مؤثری در تشویق صاحبان صنایع و توسعه تولید همزمان توان و حرارت داشته باشد.

۲- شرح فناوری

این فناوری حرارت اتلافی دما پایین و متوسط (350°C – 380°C) که در یک کارخانه سیمان به اتمسفر وارد می‌شود را در یک HRSG^3 بازیافت می‌نماید. اتلاف حرارت قابل بازیافت در یک کارخانه سیمان از دو بخش صورت می‌گیرد:

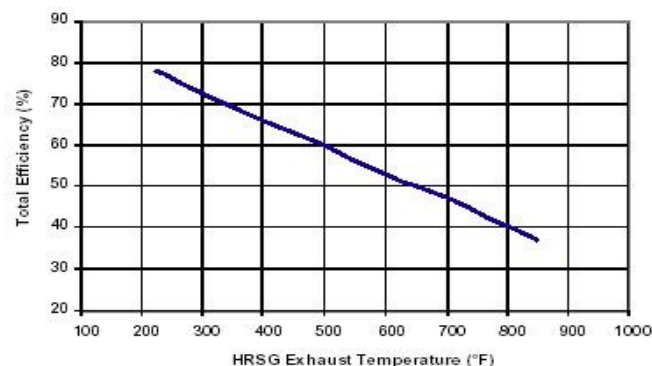
- ۱- حرارت اتلافی از سیکلون‌ها و ۲- حرارت اتلافی از کولر کلینکر

در این فناوری، حرارت اتلافی وارد یک HRSG شده و بخار تولیدی وارد توربین بخار شده و برق تولید می‌کند. شماتیک فناوری در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل (۱) شماتیک استفاده از CHP در یک کارخانه سیمان

دمای خروجی از HRSG تاثیر مستقیمی بر بازده کل سیستم دارد. در سیستم‌های معمول CHP، نمودار زیر بدست آمده است.

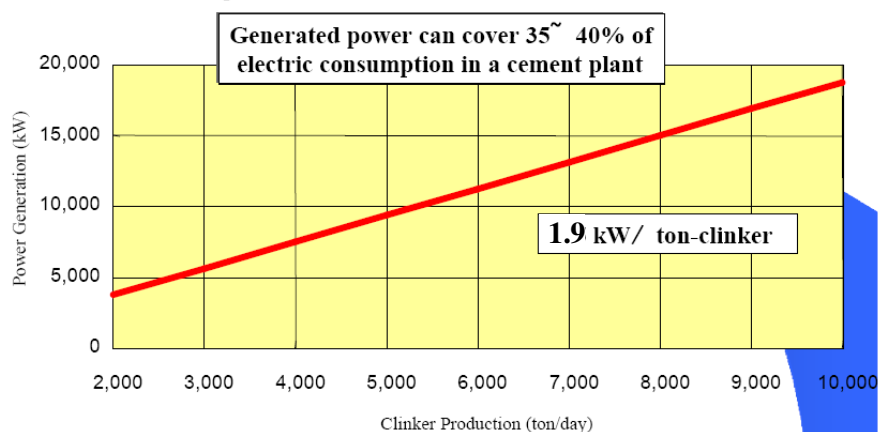


شکل (۲) نمودار تاثیر دمای دود خروجی دودکش بر روی بازده CHP

این نمودار نشان می‌دهد در صورتی که بتوان دمای خروجی HRSG را تا حدود ۲۲۰ درجه فارنهایت (۱۰۴ درجه سلسیوس) پایین آورد، بازده کلی به حدود ۷۸٪ خواهد رسید.

نمودار تجربی زیر پتانسیل تولید توان در کارخانجات سیمان در ظرفیت‌های مختلف را ارائه می‌دهد. این نمودار در مصرف توان ۴۵ kw/ton clinker ارائه شده است و نشان می‌دهد در حدود ۳۵ تا ۴۰٪ مصرف انرژی الکتریکی مجتمع می‌تواند توسط برق تولیدی از CHP تامین شود. با توجه به نمودار می‌توان گفت در یک مجتمع تولیدی با ظرفیت ۳۳۰۰ تن در روز، پتانسیل تولید ۶/۵ مگاوات توان الکتریکی وجود دارد.

Expected Power Generation



شکل (۳) نمودار میزان توان مورد انتظار در ظرفیت‌های مختلف تولیدی در صنعت سیمان

۳- تجربیات جهانی

در جدول (۱) مشخصات پروژه های اجرا شده توسط شرکت کاواساکی^۴ ژاپن می باشد. در این قسمت به تجربیات این شرکت پرداخته می شود. استفاده از سیستم های CHP در صنعت سیمان در کشورهای ژاپن و آسیای جنوب شرقی کاملاً رایج است. برای نمونه کارخانه Taiheiyo در ژاپن، ۱۵ Mw توان با استفاده از این سیستم تولید می کند. این کارخانه به عنوان یک تجربه موفق در سال ۱۹۸۲ شروع و برای مدت ۲۵ سال به صورت موفقیت آمیزی کار نمود.

No.	Company	Nationality	Production (t/d)	Output (kw)	Date
1	Sumitomo Osaka Cement	Japan	5700	2640	1980
2	Hachinohe Cement	Japan	4400	2200	1981
3	Taiheiyo Cement	Japan	12000	15000	1982
4	Mitsubishi Materials	Japan	4500	7300	1984
5	Mitsui Kozan	Japan	7000	9000	1984
6	Toh Soh	Japan	9000	9000	1984
7	Taiheiyo Cement	Japan	4800	8000	1985
8	Taiheiyo Cement	Japan	8300	12000	1987
9	Taiheiyo Cement	Taiwan	3000	1000	1989
10	Hitachi Cement	Japan	4000	1500	1989
11	Taiwan Cement	Japan	13000	15100	1990
12	Tokuyama Cement	Taiwan	12000	13000	1991
13	Jiaxin Cement	China	7000	9650	1992
14	Ninguo Cement	Taiwan	4000	7200	1998
15	Taiwan Cement	Vietnam	25880	34000	2001
16	Ha Tien 2 Cement	India	3000	2950	2002
17	Liuzhou Cement	Korea	3300	5700	2004
18	The India Cements	China	4000	7700	2004
19	Tongyang cement	China	19200	19700	2004
20	Anhui Jiande Conch Cement	China	5000	8300	2006
21	Anhui Ningguo Cement Plant	China	5000	9100	2006
22	Anhui Chizhou Conch Cement	China	10000	17000	2006
23	Anhui Tongling Conch Cement	China	9500	16300	2007
24	Anhui Zongyang Conch Cement	China	10000	18300	2007
25	Anhui Digang Conch Cement	China	10000	18500	2007
26	Yingde Longshan Cement	China	15000	27000	2007
27	Siam Cement	Thailand	5500	9100	2008
28	Anhui Chizhou Conch Cement	China	8000	11000	2008
29	Anhui Zongyang Conch Cement	China	10000	15000	2008
30	Anhui Huaining Conch Cement	China	10000	18000	2008
31	Anhui Tongling Conch Cement	China	20000	30500	2008
32	Bestway Cement	Pakistan	10700	14900	2009

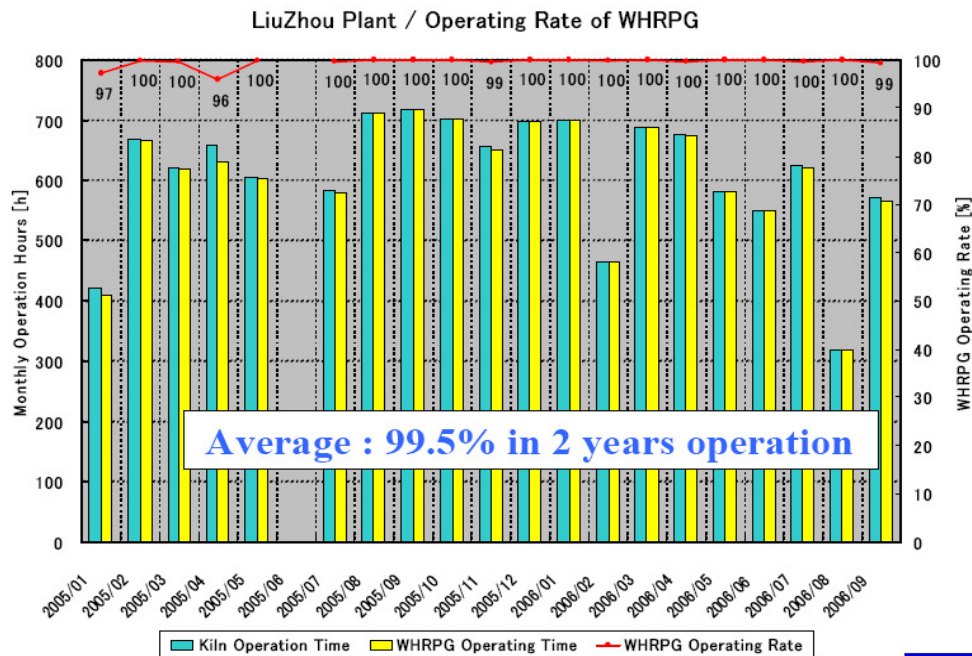
جدول (۱) مشخصات پروژه های اجرا شده توسط شرکت کاواساکی ژاپن

سایر مشخصات این پروژه و همچنین مشخصات نمونه تجربیات کشورهای تایوان، ویتنام، هند و چین در شکل (۴) ارائه شده‌اند.



ITEM	UNIT	PH BOILER	AQC BOILER
		Forced Circulation	Natural Circulation
BOILER CONDITION	TYPE		
	EVAPORATION RATE	T/H	22.32
	STEAM PRESS.	MPa	1.67
STEAM TURBINE	STEAM TEMP	?	335
	TYPE	Condensing Turbine	
GENERATOR	OUTPUT	KW	6,500
	CAPACITY	KVA	7,000
	TERMINAL VOLTAGE	V	6,706





شکل (۴) مشخصات تکمیلی تعدادی از پروژه‌های CHP اجرا شده در دنیا

۴- امکان‌سنجی اقتصادی و زیست‌محیطی

محاسبات بر اساس دو دیدگاه ملی و بنگاه اقتصادی انجام می‌گیرند. در محاسبه بر اساس دید بنگاه، هزینه انرژی صرفه‌جویی شده مبنا خواهد بود و در دیدگاه ملی هزینه فرصت حاصل از صرفه‌جویی و صادرات حامل انرژی مبنا قرار می‌گیرد. پیش‌فرض‌های محاسبات عبارتند از:

- محاسبات برای یک واحد با تولید ۳۳۰۰ ton/day و ۳۳۰ Day/yr انجام شده است.
- قیمت برق کارخانه \$/kwh ۰/۱۹
- قیمت گاز از دید ملی \$/m³ ۰/۲۳
- ۱ N.G m³ = ۴ kwh
- مبلغ خریداری دی‌ماند برق صنعتی \$/kw ۱/۱۹

مشخصات فنی سیستم CHP نصب شده در زیر آمده است:

$$Power \cdot Production = 6500kw$$

$$Energy \cdot Production = 6500 \cdot 330 \cdot 24 = 51480000kwh / yr$$

$$Equivalent \cdot Gas \cdot Savings = 12.87Mm^3 / yr$$

۴-۱- دید ملی

در دیدگاه ملی، بجای محاسبه میزان برق صرفه‌جویی شده، میزان گاز صرفه‌جویی شده برای تولید برق در نیروگاه‌های کشور محاسبه شده است. به طور متوسط فرض می‌شود با توجه به راندمان نیروگاه‌های کشور، هر متر مکعب گاز، ۴ کیلو وات ساعت برق تولید کند. با توجه به اینکه این گاز قابلیت صادرات را دارد، لذا قیمت صادراتی گاز مبنای محاسبه صرفه‌جویی انرژی از دیدگاه ملی قرار گرفته است. لذا داریم:

$$Equivalent \cdot Gas \cdot Savings = 12.87 Mm^3 / yr$$

$$Profit.Gas.Saving = 12.87 * 0.23 = 2.96 M \$ / yr$$

از سوی دیگر به ازای هر کیلووات توان در سیستم‌های CHP میزان ۵۰۰ دلار سرمایه‌گذاری نیاز دارد که شامل هزینه‌های سرمایه‌ای و ساخت می‌گردد. لذا داریم:

$$CHP.Investment = 6500 * 500 = 3.25 M \$$$

$$Profit.Gas.Saving = 12.87 * 0.23 = 2.96 M \$ / yr$$

$$Simple.Payback.Period = 1.1 yr$$

۲-۴- دید بنگاه اقتصادی

از دید بنگاه اقتصادی، در صورت نصب سیستم CHP در کارخانه، علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی الکتریکی، به میزان توان تولیدی از دیماندر قراردادی کارخانه کم خواهد شد که در محاسبات موثر خواهد بود.

$$CHP.Investment = 6500 * 500 = 3.25 M \$$$

$$Profit.Electricity.Saving = 51480000 * 0.019 = 0.978 M \$ / yr$$

$$Profit.Demand = 6500 * 1.19 = 0.008$$

$$Profit.Sum = 0.978 + 0.008 = 0.986$$

$$Simple.Payback.Period = 3.3 yr$$

۳-۴- تحلیل جذابیت‌های زیست‌محیطی

در روند حرکت جهانی به سوی توسعه پایدار، توجه به آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از بخش انرژی، امری ضروری محسوب می‌گردد. در این راستا توجه به میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای ناشی از بخش‌های مختلف انرژی از منظر اثرات محلی، منطقه‌ای و جهانی آن از اهمیت بسزایی برخوردار است. به همین منظور در ادامه اثرات زیست‌محیطی حاصل از نصب این سیستم بررسی خواهد شد.

میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای

با توجه به میزان کاهش صورت گرفته در مصرف گاز طبیعی در اثر نصب سیستم CHP، میزان کاهش انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای توسط این کارخانه معادل با ۲۷۵۰۲/۰۸ تن می‌باشد که میزان هر یک از آنها در جدول (۲) آورده شده است. همانگونه که در این جدول مشخص شده، سهم دی اکسید کربن بیش از ۹۹/۸٪ از این گازها می‌باشد.

گاز	NOx	SO ₂	CO ₂	CO	CH	SPM
میزان کاهش	۴۴/۰۷	۰/۰۹	۲۷۴۵۱/۷۱	۱/۷۵	۰/۷۶	۳/۷۱

جدول (۲) میزان کاهش انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای (تن)

۳-۴-۱- هزینه‌های اجتماعی

هزینه‌هایی که به علت اثرات زیست‌محیطی مستقیم (مانند انتشار آلاینده‌ها) نظیر تخریب اکوسیستم‌ها، آسیب به ساختارها (اعم از ساختمان‌ها، پل‌ها و ...) و اثرات بهداشتی در افراد ایجاد می‌گردد، هزینه تخریب (هزینه اجتماعی) نامیده

می‌شود. در واقع هزینه‌های اجتماعی، هزینه‌ای است که اثرات تخریب‌کننده یا سوء یک آلاینده یا فعالیت بر محصولات کشاورزی، اکوسیستم‌ها، مواد و سلامت انسان را بیان می‌کند. به عبارت دیگر به مجموع پولی که بتواند صدمات ناشی از انتشار مواد آلاینده و گازهای گلخانه‌ای را جبران نماید، هزینه‌های اجتماعی گفته می‌شود.

کاهش هزینه‌های اجتماعی ناشی از کاهش مصرف گاز طبیعی در اثر نصب سیستم CHP بر اساس مطالعات انجام شده توسط بانک جهانی و سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران و همچنین بر اساس ضرایب EPA امریکا در جدول (۳) آورده شده است.

گاز	NOx	SO ₂	CO ₂	CO	CH	SPM
بانک جهانی و سازمان حفاظت محیط زیست ایران	۲۱۱/۶۱	۱/۳۲	۶۵۸/۷۹	۲/۶۲	۰/۴۱	۱۲۷/۵۸
ضرایب EPA امریکا	۲۲۷۳/۶۸	۰/۶۳	۴۳۹۲/۲۴	*	*	*

جدول (۳) کاهش هزینه‌های اجتماعی گازهای انتشار یافته (میلیون ریال)

* ارقام در دسترس نمی‌باشد.

متولی هزینه‌های اجتماعی در کشور دولت می‌باشد و با توجه به نتایج بدست آمده، در مجموع بالغ بر ۰/۶۷ میلیون دلار، توسعه یک سیستم CHP در کارخانه‌ای با ظرفیت ۳۳۰۰ تن در روز برای دولت منفعت خواهد داشت که این منفعت، به توجیه‌پذیری اقتصادی بیشتر طرح می‌انجامد.

۴-۳-۲- مکانیسم توسعه پاک

افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو زمین به ایجاد پدیده گلخانه‌ای و در نتیجه گرم شدن کره زمین و تغییر اقلیم منجر شده است. در سال‌های اخیر این میزان و روند تغییرات در حدی نگران‌کننده‌ای بوده که جوامع بین‌المللی در کنوانسیون تغییرات آب و هوا و پروتکل کیوتو تصمیم به کنترل این پدیده گرفته است. برای اجرایی شدن اهداف این پروتکل و تشویق انتشار گازهای گلخانه‌ای، مکانیسم‌های مالی متعددی برای پروژه‌های منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته شده است.

بر اساس این مکانیسم‌ها، میزان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به صورت اعتباری قابل خرید و فروش است که به بازار کربن معروف شده است. یکی از این مکانیسم‌ها، مکانیسم توسعه پاک می‌باشد که بر اساس آن کشورهای عضو غیر ضمیمه ۱ (کشورهای در حال توسعه که تا سال ۲۰۱۲ هیچ گونه تعهدی نسبت به کاهش انتشار ندارند) از جمله ایران می‌تواند با کاهش نشر از اعتبارات آن استفاده کنند.

برای اجرای این مکانیسم، باید گواهی نشری مبنی کاهش میزان انتشار معادل دی اکسید کربن هر طرح گرفته شود که بر اساس آن می‌توان در بازار کربن خرید و فروش انجام داد.

برای طرح مذکور، با توجه به ضرایب پتانسیل گرمایش زمین، میزان کاهش انتشارات حاصل از اجرای طرح، بالغ بر ۴۰ هزار تن کربن در سال می‌باشد. از طرف دیگر، با توجه به قیمت‌های موجود برای ایران که میزان آن حدود ۱۲ دلار به ازای هر تن کربن می‌باشد میزان اعتبارات قابل اکتساب از طریق مکانیسم توسعه پاک عددی معادل با ۴۸۰ هزار دلار در سال می‌باشد.

به عبارت دیگر، توسعه سیستم CHP در یک کارخانه نمونه قابلیت جذب ۰/۴۸ میلیون دلار در سال عواید بین‌المللی از

محل مجوز کربن برای واحد صنعتی بدنبال خواهد داشت. این مقدار در صورتی که با مقادیر صرفه‌جویی حاصل از کاهش مصرف برق و کاهش دیماند واحد صنعتی جمع شود در مجموع ۱/۴۶۶ میلیون دلار در سال صرفه‌جویی برای واحد صنعتی به دنبال دارد. در این صورت دوره بازگشت سرمایه به ۲/۲ سال کاهش خواهد یافت. این منافع منجر به توجیه‌پذیری بیشتر طرح می‌گردد.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

بر اساس نتایج این تحقیق می‌توان گفت استفاده از سیستم‌های CHP در صنعت سیمان کاملاً موجه بوده و علاوه بر مزیت اقتصادی که برای دولت و کارخانه در بر دارد در کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی نقش مهمی ایفا می‌نماید. همچنین با توجه به اینکه بر اساس برنامه دولت، قیمت حامل‌های انرژی بتدریج افزایش خواهد یافت لذا جذابیت اقتصادی طرح بسیار بیشتر خواهد شد. مهمترین دلایل توصیه به استفاده از سیستم CHP در کارخانجات کشور عبارتند از:

- ۱- تکنولوژی بالغ و اثبات شده در دنیا
- ۲- محدودیت منابع انرژی کشور
- ۳- کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی
- ۴- تلاش در جهت استفاده از تسهیلات بین‌المللی
- ۵- استفاده موثر از حرارت اتلافی در کارخانه
- ۶- توجیه‌پذیری اقتصادی طرح
- ۷- رعایت استانداردهای مصرف انرژی
- ۸- کاهش قیمت تمام‌شده محصول و افزایش توان رقابتی

مهمترین موانع گسترش استفاده از CHP نیز عبارتند از:

- ۱- عدم آشنایی تصمیم‌گیران صنعت سیمان با مزایا و همچنین وضعیت فناوری در دنیا
- ۲- ارزان بودن حامل‌های انرژی در کشور و تاثیر آن در توجیه‌پذیری طرح‌های صرفه‌جویی انرژی
- ۳- میزان سرمایه‌گذاری اولیه بالا
- ۴- نقدینگی پایین واحدهای صنعتی
- ۵- مقاومت در برابر تغییر

پیشنهادهای زیر در راستای توسعه استفاده از سیستم CHP در کارخانجات سیمان کشور ارائه می‌شود:

- ۱- مشارکت دولت در سرمایه‌گذاری طرح‌های CHP به نسبت توجیه‌پذیری طرح از دید ملی
- ۲- برگزاری سمینارهای تخصصی و آشناسازی مدیران و کارشناسان با فناوری CHP
- ۳- تصویب قوانین و مقررات در جهت استفاده از این سیستم‌ها در کارخانجات جدید و موجود

منابع و مراجع:

- ۱- بررسی و معرفی تولید همزمان گرما و توان و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به سابقه استفاده از CHP در صنایع مختلف در ایران و جهان، شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت - پژوهشگاه نیرو- ۱۳۸۷
- 2- Catalog of CHP Technologies, http://www.epa.gov/chp/chp_support_tools.htm
- 3- Combined Heat and Power – Evaluating the benefits of greater global investment, International energy agency, 2008, Internet Publication
- 4- www.energy.gov
- 5- www.iea.org
- 6- [Www.power-spar.com](http://www.power-spar.com)

زیر نویس:

۱- عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر ری

۲- شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت

Heat Recovery Steam Generator -3

Kawasaki -4