



انتخاب بهترین محرک و استراتژی تعیین ظرفیت برای یک سیستم تولید همزمان به کمک روش تصمیم‌سازی سلسله مراتبی

علی سوهانی^{1*}، پریسا حاجی‌علی‌گل²، حسین صیادی³، یعقوب خسروانی فرد⁴

- 1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
 - 2- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
 - 3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
 - 4- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
- * تهران، صندوق پستی 19395-1999، asohani@mail.kntu.ac.ir

چکیده

یک سیستم تولید همزمان توان، حرارت و برودت تامین کننده نیازهای یک واحد مسکونی پنج طبقه در شهر رشت در نظر گرفته شده و پس از محاسبه توان مورد نیاز و بارهای حرارتی و برودتی آن، از بین موتور ملی و پیل سوختی به عنوان محرک و تعیین ابعاد محرک براساس تامین بیشینه توان یا تامین بیشینه حرارت مورد نیاز سیستم، بهترین گزینه انتخاب گردیده است. برای این منظور از روش تصمیم‌سازی سلسله مراتبی استفاده شده و مجموع هزینه‌های چرخه عمر، دی‌اکسیدکربن تولیدی و میانگین بازدهی سالانه به عنوان معیارهای تصمیم‌سازی انتخاب گردیده‌اند. در غالب پژوهش‌ها فرض می‌شود که تمام تجهیزات در هر اندازه ممکن موجود هستند، حال آن‌که در کاربردهای مسکونی تجهیزات حالت سفارشی نداشته و باید از تجهیزات موجود در بازار که در ظرفیت‌های مشخصی موجود هستند بهره گرفت که در این پژوهش این نکته در نظر گرفته شده است. طبق نتایج به‌دست آمده، سیستم با محرک موتور ملی با بازدهی 37.60% که تعیین ابعاد آن براساس بار حرارتی بیشینه انجام گرفته، با امتیاز 44.4 از 100 بهترین گزینه می‌باشد.

کلید واژگان: سیستم‌های تولید همزمان توان و حرارت و برودت، تصمیم‌سازی، موتور ملی، پیل سوختی، استراتژی تعیین ظرفیت محرک اولیه

Selection of the best prime mover and sizing strategy for a CCHP system by analytic hierarchy process

Ali Sohani*, Parisa Hajjaligol, Hoseyn Sayyaadi, Yaghoob Khosravanifard

Department of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, asohani@mail.kntu.ac.ir

ABSTRACT

A combined cooling, heating and power (CCHP) system which provides power and heat demands of a five story benchmark residential building was considered. After calculation of power demand, cooling and heating loads, the best alternative for the prime mover and sizing strategy was selected. The selection was made by analytic hierarchy process (AHP). The decision making criteria were the life cycle cost, annual carbon dioxide emission and annual average of efficiencies. Limitations in available equipment and their specific capacities were considered in this research. According to the results, the national motor with the efficiency of 37.60%, sized based on the maximum electrical load, and with the score of 44.4/ 100 found to be the best alternative.

Keywords: Combined cooling, heating and power (CCHP), Decision making, National motor (EF7), Fuel cell, Strategy of sizing the prime mover

1- مقدمه

نمودند [1]. همچنین ابراهیمی و کشاورز نیز با فرض وجود محرک در تمام ظرفیت‌های ممکن، با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه بهترین محرک مورد نیاز برای یک سیستم تولید همزمان را مشخص نمودند [2].

تعیین ابعاد و مشخصات سیستم‌های تولید همزمان برای کاربردهای مختلف، بر مبنای یکی از دو بار الکتریکی یا بار حرارتی بیشینه انجام می‌شود که به طور معمول در کاربردهای مسکونی با توجه به شرایط، این امر بر مبنای بار الکتریکی بیشینه صورت می‌گیرد، حال آن‌که به دلیل تنوع شرایط اقلیمی، شرایط اقتصادی، وجود یا عدم وجود منابع کمکی و نیازهای دیگر مسئله، شرایط بهینه الزاماً در این حالت رخ نداده و ممکن است در حالت دیگر رخ دهد. به‌علاوه در غالب پژوهش‌ها فرض می‌شود که تمام تجهیزات در هر اندازه ممکن موجود هستند، حال آن‌که در کاربردهای مسکونی تجهیزات حالت

جهان به سرعت در حال دگرگونی و حرکت رو به جلو می‌باشد که با افزایش شهرنشینی، پیشرفت صنایع و افزایش نیاز به انرژی همراه است. سیستم‌های تولید همزمان توان، حرارت و برودت از جمله تجهیزاتی هستند که در طول سالیان اخیر به منظور استفاده کارا تر از منابع سوخت‌های فسیلی توسعه یافته و در بخش‌های مختلف خانگی و صنعتی از آن‌ها استفاده می‌شود و پژوهش‌ها و مطالعات مختلفی در راستای بهبود آن‌ها انجام شده است. به‌عنوان نمونه‌ای از این پژوهش‌ها ماگو و همکاران، یک سیستم تولید همزمان را که محرک اولیه آن با استفاده از سیکل ارگانیک رانکین عمل می‌کرد، با در نظر گرفتن توابع هدف هزینه‌های خریداری تجهیزات و دی‌اکسیدکربن تولیدی بهینه

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A.Sohani, P.Hajjaligol, H.Sayyaadi, Y.Khosravanifard, Selection of the best prime mover and sizing strategy for a CCHP system by analytic hierarchy process, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 119-122, 2016 (in Persian)

آب گرم بهداشتی هر طبقه در جدول 4 آورده شده است که با فرض دمای آب سرد ورودی برابر با دمای زمین و دمای آب گرم بهداشتی مصرفی برابر 60°C ، به کمک رابطه 1 به دست می‌آید.

$$Q = \dot{m}_{HDW} c_{p,HDW} \Delta T \quad (1)$$

در "شکل 2" نمودار مقدار بار الکتریکی مورد نیاز ماهانه هر واحد که مطابق با میانگین قبض‌های برق موجود به دست آمده، آورده شده است.

جدول 2 مشخصات ساختمان نمونه مورد بررسی [4]

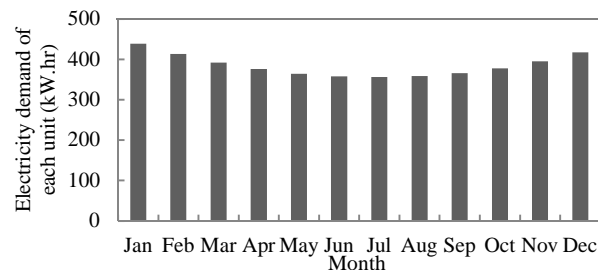
مقدار	پارامتر
3	ارتفاع سقف (متر)
1.278	ضریب انتقال حرارت دیوارهای خارجی (وات بر متر مربع بر کلوین)
1.204	ضریب انتقال حرارت دیوارهای در مجاورت فضای تهویه نشده (وات بر متر مربع بر کلوین)
3.095	ضریب انتقال حرارتی کلی پنجره (وات بر متر مربع بر کلوین)
341.8	میانگین وزن بر واحد سطح جداره‌های هر طبقه (کیلوگرم بر متر مربع)
7	تعداد پنجره‌ها
1.68	مساحت هر پنجره (متر مربع)
5	حداکثر تعداد افراد حاضر در هر طبقه (نفر)

جدول 3 مقدار بیشینه بارهای حرارتی و برودتی به دست آمده توسط نرم‌افزار کریر هپ 4.50

طبقه	بیشینه بار برودتی (W)	بیشینه بار حرارتی (W)
اول	4327.8	5470.2
میانی	3934.3	5315.0
آخر	5508.2	7740.8

جدول 4 میزان مصرف آب گرم بهداشتی هر طبقه [5]

میزان استاندارد آب گرم مصرفی ($\text{l} \cdot \text{h}^{-1}$)	تعداد در هر طبقه	مصرف کننده‌های آب گرم بهداشتی
114	1	حمام
7.6	1	دستشویی
7.6	1	توالت
38	1	آشپزخانه
0.3		ضریب مصرف



شکل 2 مقدار بار الکتریکی مورد نیاز ماهانه هر واحد با شروع از ماه ژانویه

Fig. 2 The amount of required electricity of each unit starts in January

سفارشی نداشته و باید از تجهیزات موجود در بازار که در ظرفیت‌های مشخصی موجود هستند بهره گرفت که در این پژوهش این نکته در لحاظ شده است. یک واحد مسکونی 5 طبقه در شهر رشت در نظر گرفته شده و با استفاده از روش نوین تصمیم‌سازی سلسله مراتبی بهترین استراتژی و بهترین محرک از بین موتور ملی و پیل سوختی پلیمری انتخاب شده است.

2- توصیف سیستم

طرحواره انتخاب شده برای این سیستم در شکل نشان داده شده است. این سیستم شامل یک محرک اولیه است که سوخت وارد آن شده و توان مکانیکی در آن توسط ژنراتور تولید می‌شود. سپس گرمای دفع شده محرک در ابتدا در مبدل بازیاب اول مورد نیاز سیستم تبرید جذبی (که سیستم سرمایشی در نظر گرفته شده در این پژوهش است) را تامین می‌نماید. سپس باقی‌مانده گرما در مبدل بازیاب دوم گرمای مورد نیاز سیستم گرمایشی و آب گرم بهداشتی را تامین می‌نماید. البته در صورتی که نیاز الکتریکی یا گرمایشی توسط مجموعه قابل تامین نباشد، برق از شبکه خریداری شده یا از یک مشعل کمکی بهره گرفته می‌شود.

3- معرفی ساختمان مورد بررسی

یک ساختمان مسکونی پنج طبقه با نقشه طبقات یکسان با مساحت هر طبقه 97.1 m^2 به منظور مطالعه انتخاب شده است. در جدول‌های 1 و 2 شرایط طرح خارج شهر رشت و مشخصات ساختمان مورد بررسی ذکر گردیده است. شهر رشت از نظر آب و هوایی در گروه Cfa مقیاس کوپن-گیگر¹ قرار می‌گیرد [3].

مقدار حداکثر بارهای حرارتی و برودتی ساختمان نمونه که به کمک نرم‌افزار کریر هپ 4.50² محاسبه شده، در جدول 3 آورده شده است. میزان مصرف

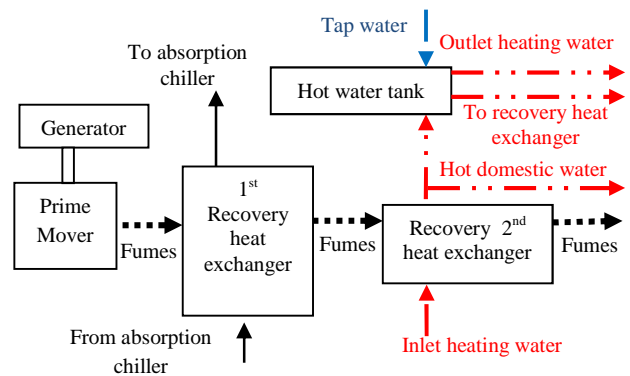


Fig. 1 The schematic of CCHP system

شکل 1 طرحواره سیستم تولید همزمان

جدول 1 شرایط طرح خارج شهر رشت [4]

مقدار	پارامتر
-4	ارتفاع از سطح دریا (متر)
31.9	دمای حباب خشک (درجه سانتی‌گراد)
61.3	رطوبت نسبی هوا (درصد)
49.7	طول جغرافیایی (درجه شرقی)
37.3	عرض جغرافیایی (درجه شمالی)

¹ Koppen-Geiger climate classification system

² Carrier HAP 4.50

$$\eta = \frac{E_{pm} + Q_{heating} + Q_{cooling} + Q_{HDW}}{\dot{m}_{fuel}LHV} \quad (3)$$

$$CDE = D_1 E_{purchased} + D_2 \dot{m}_{fuel}LHV \quad (4)$$

مقدار ضرایب D_1 و D_2 در معادله (4) برابر 0.598 و 0.185 کیلوگرم بر کیلووات ساعت در نظر گرفته شده‌اند [4].

7- نتایج

با استفاده از کدنویسی‌های انجام شده در نرم‌افزار متلب² مقادیر هزینه‌های چرخه عمر، دی‌اکسید کربن سالانه تولیدی و بازدهی برای چهار گزینه مورد بررسی محاسبه گردیده است که نتایج در جدول 7 آورده شده است. با استفاده از روش تصمیم‌سازی سلسله مراتبی و بهره‌گیری از نرم‌افزار اکسپرت چویس³ 11، گزینه نهایی از میان چهار گزینه موجود انتخاب شده است. به این صورت که وزن سه معیار نسبت به هم و وزن گزینه‌ها نسبت به یکدیگر براساس هر معیار به صورتی که در جدول‌های 8 الی 11 مشاهده می‌شود تعیین شده است و سپس مقدار عدد اولویت هر گزینه نسبت به گزینه‌های دیگر به صورت آن چه در جدول 12 به دست آمده است. در روش سلسله مراتبی ارزش برابر با عدد 1 و ارزش بسیار بالا با عدد 9 و ارزش‌های بینابین آن‌ها با اعداد بین آن‌ها سنجیده می‌شود. هر چقدر هم ارزش یک گزینه نسبت به گزینه دیگر عددی کمتر از یک (که معکوس اعداد صحیح بین یک تا نه است) باشد، ارزش آن کمتر است.

چنان که ملاحظه می‌شود از بین گزینه‌های موجود، سیستمی که محرک آن موتور ملی باشد و تعیین ظرفیت آن براساس بیشینه بار حرارتی انجام شده باشد (سیستم 2)، بهترین گزینه است. این گزینه 44.4٪ از 100 امتیاز ممکن را به دست آورده است. چنان که ملاحظه می‌شود، این سیستم بر خلاف سایر سیستم‌ها دارای پتانسیل کسب درآمد در طول چرخه عمر خود به میزان 95,874 دلار می‌باشد. پس از این گزینه، سیستم 1 با 29.0٪ و سیستم 3 با 20.2٪ امتیاز از 100 در جایگاه‌های دوم و سوم قرار دارند. با توجه به اعداد به دست آمده نتیجه گرفته می‌شود در کشورهای مثل کشور ایران که مسائل اقتصادی به عنوان مهم‌ترین عامل بوده و پس از آن بازدهی و آلودگی دارای اهمیت هستند و همچنین بهای گاز نسبت به نرخ فروش برق به شبکه عدد پایینی می‌باشد استفاده از محرک‌های به نسبت ارزان با بازدهی متوسط رو به بالا از جمله موتور ملی در حالتی که براساس بار حرارتی بیشینه تعیین ظرفیت شده باشد، بهترین انتخاب خواهد بود. در این حالت به طور معمول و چنان‌که در این پژوهش نیز چنین بود، مقدار برق تولیدی به حدی بالا

جدول 7 مقادیر هزینه‌های چرخه عمر، دی‌اکسید کربن سالانه تولیدی و بازدهی برای چهار گزینه مورد بررسی

Table 7 The values of life cycle costs, annual carbon dioxide emissions and annual average of effectiveness

سیستم	موتور ملی+چیلر جذبی			
	FTL	FEL	FTL ⁴	FEL ⁵
شماره سیستم	4	3	2	1
بازده (%)	30.56	62.80	37.60	51.34
نشر سالانه دی‌اکسیدکربن (کیلوگرم)	274.7884	0.9522	716140	238710
هزینه‌های چرخه عمر (دلار)	2,862,300	102,110	-95,874	26,174

² MATLAB

³ Expert choice 11

⁴ Following thermal load (FHL)

⁵ Following electrical load (FEL)

4- مشخصات سیستم مورد بررسی

در این پژوهش فرض گردیده است تجهیزات در دسترس، مشخصاتی مطابق با آن چه که در جدول 5 آورده شده است، دارند. باتوجه به این که بار الکتریکی ساختمان متغیر می‌باشد، بیشینه بار برای انتخاب محرک‌ها مدنظر قرار گرفته است و بار اضافی الکتریسیته (در صورت وجود) به شبکه فروخته می‌شود و بار حرارتی مازاد نیز به صورت گازهای داغ حاصل از احتراق هدر می‌رود. در مورد تجهیزات سرمایشی و گرمایشی نیز انتخاب بر مبنای بیشینه بار صورت گرفته است. در ضمن در صورت جوابگو نبودن مولد از ژنراتور آماده به خدمت¹ سیستم چیلر جذبی که از نوع آب گرم می‌باشد هم استفاده می‌شود. همچنین در صورتی که نیاز توسط یک تجهیز تامین نشود، از تعداد بیشتری تجهیز بهره گرفته می‌شود. 15 درصد ضریب اطمینان نیز برای در نظر گرفتن سایر تجهیزات در نظر گرفته شده است.

5- مدل‌سازی اقتصادی

از روش چرخه عمر به منظور مدل‌سازی اقتصادی استفاده شده است. در این روش همه هزینه‌ها و درآمدهای سیستم در طول چرخه عمر آن در این روش با استفاده از رابطه (2) به زمان حال که مبدا محاسبات اقتصادی است آورده می‌شوند.

$$PW = \frac{A(1 + \text{inflation})^{j-1}}{(1 + \text{discount})^j} \quad (2)$$

هزینه‌های جاری نیز شامل هزینه‌های گاز و هزینه‌های احتمالی برق خریداری یا فروخته شده از شبکه و همچنین هزینه‌های تعمیرات سیستم که برابر 10 درصد هزینه‌های اولیه در نظر گرفته شده است، می‌باشد. مقدار این نرخ‌ها در جدول 7 آورده شده است. به منظور محاسبه هزینه‌ها برحسب دلار، نرخ هر دلار برابر 3500 تومان فرض گردیده است. سود و تورم در کشور ایران نیز به ترتیب 17.2٪ و 14.0٪ در نظر گرفته شده اند [6].

6- شاخص‌های عملکردی

علاوه بر هزینه‌های چرخه عمر، دو شاخص مقدار دی‌اکسید کربن تولیدی و مقدار میانگین سالانه بازدهی سیستم که به ترتیب می‌توان آن را مطابق روابط (3) و (4) بدست آورد، به عنوان شاخص‌های عملکردی انتخاب شده‌اند.

جدول 5 قیمت تجهیزات [5]

تجهیزات	ظرفیت	مدل	قیمت (دلار)
موتور گازسوز ملی	45.879 kW	EF7	1,200
پیل سوختی	1.2 kW	پلیمری	7,636
چیلر جذبی	20 TR	آب گرم	20,000
دیگ	30000 kcal.hr ⁻¹	S90-3	431.43
مبدل حرارتی	50000 kcal.hr ⁻¹	HP-100	120
منبع آب سرد	1000 lit	DT.CW1000-2	160.46
رادیاتور	1260 kcal.hr ⁻¹	تروکالر 500	942.86

جدول 6 نرخ‌های گاز و برق سالانه بر حسب دلار [5]

شرح	قیمت (دلار)
خرید برق از شبکه	0.01
گاز طبیعی (ماه‌های سرد سال)	0.03
گاز طبیعی (ماه‌های گرم سال)	0.04

¹ standby

طبقه در شهر رشت انتخاب شد. طبق نتایج به‌دست آمده، سیستم برگزیده سیستمی با محرک موتور ملی با بازدهی 37.60% است که به دلیل ارزان بودن بهای گاز در ایران نسبت به تعرفه برق مازادی که در این حالت به شبکه فروخته می‌شود، 95,874 دلار درآمد در طول چرخه عمر خود به همراه دارد. این گزینه 44.4 از 100 امتیاز را به‌دست آورده است. استفاده از موتور ملی که ابعاد آن براساس بار الکتریکی بیشینه تعیین شده باشد، با 29.0 امتیاز اولویت دوم و بهره‌گیری از پیل سوختی که براساس تامین بار الکتریکی و بار حرارتی بیشینه تعیین ابعاد شده باشد به ترتیب با 20.2 و 6.4 امتیاز در اولویت‌های بعدی قرار دارند. به علاوه چنان که ملاحظه گردید به طور کلی سیستم‌هایی با محرک اولیه موتور ملی، گزینه‌های بهتری در مقایسه با سیستم‌هایی هستند که از پیل سوختی به عنوان محرک استفاده می‌کنند.

9- فهرست علائم

- A هزینه یا درآمد (\$)
- c_p ظرفیت گرمایی در فشار ثابت ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
- D ثابت
- CDE نشر سالانه دی‌اکسید کربن (kg)
- discount سود بانکی
- E توان الکتریکی (kW)
- inflation نرخ تورم
- LCC هزینه‌های چرخه عمر (\$)
- LHV ارزش حرارتی پایین سوخت (kJ.kg^{-1})
- \dot{m} دبی جرمی (kg.s^{-1})
- PW ارزش کنونی پول (\$)
- Q توان حرارتی (kW)
- T دما ($^{\circ}\text{C}$)
- علائم یونانی**
- η بازدهی سیستم
- زیرنویس‌ها**
- cooling سرمایش
- heating گرمایش
- HDW آب گرم بهداشتی

10- مراجع

[1] P. J. Mago, A. Hueffed, L. M. Chamra, Analysis and optimization of the use of CHP-ORC systems for small commercial buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 9, pp. 1491-1498, 2010.

[2] M. Ebrahimi, A. Keshavarz, Sizing the prime mover of a residential micro-combined cooling heating and power (CCHP) system by multi-criteria sizing method for different climates, *Energy*, Vol. 54, pp. 291-301, 2013.

[3] A. Sohani, H. Sayyaadi, S. Hoseinpoori, Modeling and multi-objective optimization of an M-cycle cross-flow indirect evaporative cooler using the GMDH type neural network, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 69, pp. 186-204, 2016.

[4] H. Hasani Balyani, A. Sohani, H. Sayyaadi, R. Karami, Acquiring the best cooling strategy based on thermal comfort and 3E analyses for small scale residential buildings at diverse climatic conditions, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 57, pp. 112-137, 2015.

[5] M. Mohammadhoseini, Analysis of a residential CCHP system with gas engine and desiccant enhanced indirect evaporative cooler, B.Sc. Thesis, Faculty of mechanical engineering, K.N.Toosi university of technology.

[6] Kalogirou, Soteris A. *Solar energy engineering: processes and systems*. Academic Press, 2013.

جدول 8 وزن معیارها نسبت به یکدیگر

Table 8 The weights of decision criteria to each other

معیار	LCC	CDE	η
LCC	1	7	5
CDE	$\frac{1}{7}$	1	$\frac{1}{3}$
η	$\frac{1}{5}$	3	1

جدول 9 وزن گزینه‌ها نسبت به یکدیگر براساس مجموع هزینه‌های چرخه عمر

Table 9 The weights of alternatives to each other based on life cycle cost

سیستم	1	2	3	4
1	1	$\frac{1}{3}$	6	8
2	3	1	7	9
3	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{7}$	1	2
4	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{2}$	1

جدول 10 وزن گزینه‌ها نسبت به یکدیگر براساس مجموع آلودگی دی‌اکسیدکربن سالانه

Table 10 The weights of alternatives to each other based on annual carbon dioxide emission

سیستم	1	2	3	4
1	1	2	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{6}$
2	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{8}$
3	$\frac{1}{7}$	9	1	$\frac{3}{8}$
4	6	8	$\frac{1}{3}$	1

جدول 11 وزن گزینه‌ها نسبت به یکدیگر براساس میانگین بازدهی

Table 11 The weights of alternatives to each other based annual average of efficiencies

سیستم	1	2	3	4
1	1	3	1/2	7
2	1/3	1	1/5	4
3	2	5	1	9
4	1/7	1/4	1/9	1

جدول 12 امتیاز نهایی گزینه‌ها

Table 12 The final scores of alternatives

سیستم	امتیاز گزینه از 100
1	29.0
2	44.4
3	20.2
4	6.4

می‌رود که موجب جبران هزینه‌های اولیه و حتی درآمدزایی برای مجموعه می‌گردد. به علاوه این که به طور کلی استفاده از موتور ملی در مقایسه با پیل سوختی انتخاب معقول‌تری می‌باشد.

8- جمع‌بندی

در این پژوهش، با استفاده از روش تصمیم‌سازی سلسله مراتبی و در نظر گرفتن هزینه‌های چرخه عمر، دی‌اکسیدکربن تولیدی سالانه و بازدهی به عنوان شاخص‌های تصمیم‌گیری از بین موتور ملی و پیل سوختی به‌عنوان محرک و تعیین ظرفیت آن براساس بیشینه بار حرارتی یا بار الکتریکی، بهترین گزینه برای یک سیستم تولید همزمان در یک ساختمان نمونه 5