

دراسة وتحليل استراتيجية ترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية وخفض الانبعاثات الغازية لمبنى مستشفى خاص في اليمن

عبد الجليل علي العبيدي^(1,*)

© 2020 University of Science and Technology, Sana'a, Yemen. This article can be distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](#), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

©2020 جامعة العلوم والتكنولوجيا، اليمن. يمكن إعادة استخدام المادة المنشورة حسب رخصة مؤسسة المشاع الإبداعي شريطة الاستشهاد بالمؤلف والمجلة.

¹ قسم هندسة التكييف والتبريد، كلية المجتمع صنعاء، صنعاء، اليمن
*عنوان المراسلة: drjalil@scc.edu.ye

دراسة وتحليل استراتيجية ترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية وخفض الانبعاثات الغازية لمبنى مستشفى خاص في اليمن

الملخص:

تستهلك المستشفيات طاقة عالية أكثر من المباني الأخرى في قطاع المباني التجارية والخدمية حيث يوجد طلب مستمر على إمدادات الطاقة. يمكن خفض استهلاك الطاقة وتقليل انبعاثات الغازات الدفينة في قطاع المباني باستخدام طرق مختلفة لترشيد استهلاك الطاقة. في هذه الدراسة، أجريت زيارة ميدانية الى مستشفى خاص في صنعاء - اليمن لتسجيل جميع البيانات ذات الصلة باستهلاك الطاقة الكهربائية من أجهزة ومعدات وجميع الأنظمة الميكانيكية الأخرى لدراسة إمكانية ترشيد استهلاك الطاقة فيه. تم دراسة سيناريوهات مختلفة لترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية مثل استخدام أجهزة اضاءة عالية الكفاءة، رفع درجة حرارة الترموستات لأجهزة التكييف، استخدام محركات عالية الكفاءة بنسبة تحميل مختلفة واستخدام محركات متغيرة السرعة. أشارت النتائج إلى أن الاستهلاك السنوي للطاقة الكهربائية للمستشفى 4061.8 ميغاوات ساعة سنويا، بينما كانت كثافة الطاقة 207 كيلوواط ساعة / متر مربع. بلغ مقدار ترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية السنوي 150.32 ميغاوات. ساعة باستخدام أجهزة اضاءة عالية الكفاءة و689.72 ميغاوات. ساعة عند إعادة ضبط ترموستات أجهزة التكييف لدرجة 26 درجة مئوية. وجد أنه تخفيض السرعة بنسبة 60% باستخدام محركات متغيرة السرعة أدى الى ترشيد استهلاك الطاقة بحوالي 1513 ميغاوات ساعة سنويا، في حين استخدام محرك ذو الكفاءة عالية ونسبة 100%، أدى الى ترشيد استهلاك الطاقة السنوي بمقدار 95.8 ميغاوات ساعة، تم عمل الدراسة الاقتصادية لاستراتيجيات ترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية حيث وجد ان استخدام محركات عالية الكفاءة غير مجدية اقتصاديا بينما استخدام محركات متغيرة السرعة عالية القدرة أفضل من الناحية الاقتصادية والبيئة.

الكلمات المفتاحية: مباني المستشفيات، استهلاك الطاقة، مؤشر الطاقة، ترشيد استهلاك الطاقة، خفض الانبعاثات الغازية.

Study and Analysis of an Electrical Energy Saving Strategies and Gas Emissions Reduction for a Private Hospital Building in Yemen

Abstract:

Hospital buildings consume high energy more than other buildings in the commercial buildings sector as there is a continuous demand for power supplies. Energy consumption and greenhouse gas emissions can be reduced in the buildings sector by using various energy saving methods. In this study, on-sight visiting for energy audit has been conducted at a private hospital in Sana'a - Yemen to record all data relevant to energy consumption by equipment, machines, and all other mechanical systems. Different energy saving scenarios were using to estimate the potential of energy saving such as using high-efficiency lighting devices, raising the thermostat set point temperature for air conditioners, using high-efficiency motors (HEM) with a different load ratio, and using variable speed motors (VSM). Results indicated that energy consumption for the hospital was 4,061.8 Megawatt-hour per year whereas energy intensity was 232 kWh/m². It is found that about 150.32 megawatt-hours of annual energy saving is achieved by using HEM and 689.72 Megawatt-hour per year by raising the set point of air conditioners thermostat to 26 °C. In addition, 1513 megawatt-hours per year of energy can be saved by reducing the VSM speed to 60% whereas 95.8 megawatt-hours per year is estimated by adopting 100% load of HEM. The economic study of energy saving strategies was found that the use of HEM is not economically viable, while the use of VSM with large capacity motors is better from economic and environmental points of view.

Keywords: Hospital building, energy consumption, Energy index, Energy saving, Emission reduction.

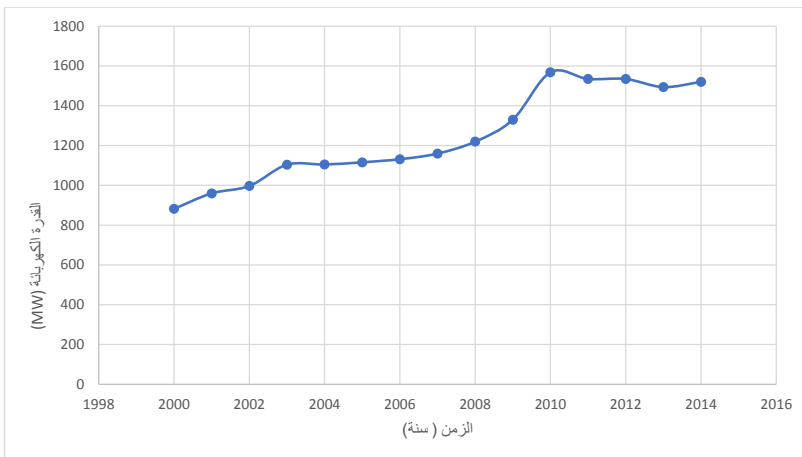
1. المقدمة

يعتمد النمو الاقتصادي والتطوير الصناعي لأي دولة بشكل كبير على إمدادات واستهلاك الطاقة خاصة في البلدان المتطورة، يتزايد الطلب على الطاقة حالياً ومستقبلاً نتيجة زيادة النمو السكاني والعمري وزيادة النشاط التجاري والصناعي في البلدان النامية. رافق زيادة استهلاك الطاقة زيادة الانبعاثات الغازية الناتجة عن احتراق الوقود الأحفوري وأدى الى بروز ظاهرة الاحترار العالمي وظهور مشاكل بيئية مختلفة على وجه المعمورة. تم دراسة طرق مختلفة للتقليل من الانبعاثات الغازية في مراكز البحوث والجامعات المختلفة حول العالم وقد ركز العلماء والباحثون على تطبيق استراتيجيات ترشيد استهلاك الطاقة والبحث عن مصادر بديلة ونظيفة للطاقة مثل استخدام المصادر المتجددة في مختلف القطاعات لتوفير الاحتياجات المستقبلية للطاقة.

يستهلك قطاع المباني نسبة 30% من استخدام الطاقة العالمي [1]، كما تستهلك المباني التجارية والخدمية ما يقرب من 40% من الطاقة الأولية في قارة أوروبا [2]، ويستهلك قطاع المباني التجارية والخدمية 32% من الاستهلاك النهائي للكهرباء في دول منظمة التعاون والتنمية الاقتصادية [3] بينما يستخدم المباني التجاري والخدمية 33.91% من إجمالي الكهرباء المنتجة في ماليزيا [4]. وقد استهلك الطاقة في المباني التجارية والخدمية في اليمن بمقدار 31% من استهلاك الطاقة الكهربائية و10% من إجمالي الطاقة النهائية، ويوضح الشكل (1) نمو الطلب على الطاقة الكهربائية في اليمن من العام 2000 الى العام 2013 نتيجة زيادة النشاط التجاري والصناعي عدا الفترة 2011 يلاحظ تناقص التوليد وذلك نتيجة دخول البلد في حالة من عدم الاستقرار السياسي التي أدت الى زيادة الانقطاع في الإمدادات الكهربائية وتوقف بعض محطات التوليد الكهربائية [5].

يعتبر المستشفيات من اهم المباني في قطاع المباني التجارية والخدمية وأكثرها استهلاكاً للطاقة الكهربائية غالباً لأنها تتطلب أربعة أنواع مختلفة من الطاقة: الكهرباء، التدفئة، توفير المياه الساخنة، والتبريد [6]. إضافة الى المعدات والأجهزة الطبية المتخصصة وأجهزة التعقيم والمغاسل والمطابخ وغيرها التي تستوجب طلب مستمر على إمدادات الطاقة.

يعبر عن استهلاك الطاقة في المباني بما يعرف بمؤشر الطاقة وهي عبارة عن استهلاك الطاقة الكهربائية في المبنى بالنسبة للمساحة الكلية له بوحدة كيلوات. ساعة لكل متر مربع ويوضح الجدول (1) مؤشر الطاقة لبعض المستشفيات في بعض الدول حول العالم.



شكل (1): القدرة الكهربائية المنتجة في اليمن من العام 2000 الى 2014

جدول (1): مؤشر الطاقة للمستشفيات في بعض الدول حول العالم

الدولة	مؤشر الطاقة (kWh/m ²)	المبنى / القسم	المرجع
ماليزيا	234.0	مبنى المستشفى	[1]
ماليزيا	384	العيادات والمركز التعليمي	[7]
المملكة المتحدة	413-488	مبنى المستشفى	[8]
المانيا	94-190	قسم المختبرات الطبية	[9]
المانيا	115	المستشفى	[8]
مصر	324.88	المستشفى	[10]
تايوان	259.45	المستشفى	[11]
اليونان	407	المستشفى	[12]
اليونان	275	العيادات	[12]

2. الدراسات السابقة

وفقا للدراسات والبحوث السابقة، فقد تم تطبيق العديد من استراتيجيات ترشيد استهلاك الطاقة في قطاع المباني المنزلية والتجارية والخدمية، ويعرض الجدول (2) بعض هذه الطرق ومقدار ترشيد الطاقة وفترة استرداد راس المال في مناطق مختلفة حول العالم. يمكن تقسيم هذه الاستراتيجيات الى ثلاث محاور رئيسية وهي استراتيجيات متعلقة بغلاف المبنى، استراتيجيات تتعلق بالأجهزة والمعدات المستخدمة في المبنى، استراتيجيات تتعلق بإدارة الطاقة في المبنى.

استراتيجية غلاف المبنى تعتبر هذه الاستراتيجية مكلفة نسبيا ومعامل استرداد راس المال فيها عالي كما هو موضح في الجدول (2) وقد تم استخدام طرق مختلفة لتقليل استهلاك الطاقة في المباني وزيادة ترشيدها في اطار هذه الاستراتيجية مثل استخدام مواد عازلة في غلاف المبنى، استخدام مواد بطيئة التوصيل الحراري في الغلاف، إنشاء حوائط مزدوجة، استخدام مواد خازنة للحرارة من النوع المتغيرة الطور في غلاف المبنى، ودمج الطاقة المتجددة في غلاف المبنى مثل البناء المتكامل الأنظمة الكهرو حرارية الشمسية، استخدام مواد عاكسة للحرارة في الغلاف الخارجي، تركيب الواقيات الشمسية / الظلال الشمسية، استخدام مزدوج، استخدام زجاج قليلة الابتعاشي، استخدم السقوف الخضراء، تبريد الاسقف، الاستفادة من الإضاءة الطبيعية، وأخيرا طلاء الجدران الداخلية بالألوان الفاتحة . ويجب الاخذ بالاعتبار لفقدان الطاقة من المبنى شتاء وانتقالها اليه صيفا. تم تطبيق احدى هذه الطرق في بعض البحوث في اطار هذه الاستراتيجية بينما تم تطبيق عدة طرق لترشيد استهلاك الطاقة وأحيانا يتم تطبيق عدة طرق من الاستراتيجيات المختلفة .

استراتيجيات تتعلق بالأجهزة والمعدات المستخدمة في المبنى وتعتمد هذه الاستراتيجية على استخدام معدات عالية الكفاءة وقليلة الاستهلاك للطاقة مع الحصول على نفس الخدمة المطلوبة والطرق المستخدمة في هذه الاستراتيجية هي استخدام معدات عالية الكفاءة في كلا من معدات الإضاءة، أجهزة التكييف والتبريد والتدفئة، معدات تسخين المياه المنزلية او استخدام محركات متغيرة السرعة التي يقل استهلاكها للطاقة وفق الاحمال المؤثرة عليها، استخدام خازن حراري واجهزة استعادة الطاقة في أجهزة التكييف، وأخيرا استغلال مصادر الطاقة المتجددة لتوفير الطاقة اللازمة لتشغيل معدات وأجهزة الخدمات المختلفة مثل استخدام الطاقة الشمسية في أنظمة (انتاج المياه الساخنة، التدفئة، تسخين مياه المسابح، الإضاءة، التبريد). بعض الطرق المستخدمة في هذه الاستراتيجية عالية التكاليف وفترة استرداد راس المال فيها كبير مثل استخدام بعض مصادر الطاقة المتجددة مثل نظام التكييف والتبريد بالطاقة الشمسية، وانتاج الكهرباء باستخدام الألواح الكهروضوئية كما هو موضح في الجدول (2) في حين أن بعض الطرق أفضل من الناحية الاقتصادية وفترة استرداد راس المال فيه قليلة نسبيا مثل الإضاءة، استخدام محركات متغيرة السرعة. أحيانا يتم استبدال المعدات السابقة وإحلال أجهزة عالية الكفاءة بدلا عنها مثل تبديل مصابيح الإنارة العادية او مصابيح الإنارة فلورسنت (النيون) الى المصابيح الموفرة للطاقة بكافة أنواعها.

استراتيجيات تتعلق بأنظمة إدارة الطاقة وهي وسائل تحكم ذكية مسؤولة عن ترشيد استهلاك الطاقة في التطبيقات الهندسية وتقنين استهلاكها على قدر الحاجة وفي وقت الضرورة مثل استخدام أجهزة تحكم في تشغيل المصابيح عند الحاجة، صمامات التحكم في أجهزة التكييف والتبريد، ومنظم الحرارة في أجهزة التدفئة والتي يتم تثبيت جهاز التحكم بالحرارة على درجة معينة. ويدخل أيضا برامج التوعية والتدريب لتغيير سلوك شاغلي المباني لترشيد استهلاك الطاقة وتعتبر هذه الاستراتيجية الافضل من الناحية الاقتصادية وفترة استرداد راس المال فيه قليلة.

لخصت دراسة تم اجرائها في مدينة النجف - العراق مقدار استهلاك الطاقة الكهربائية للفرد العراقي وامكانية ترشيد هذا الاستهلاك وأثره على توفير الطاقة، تم إحصاء 2000 وحدة سكنية موزعة على عموم المدينة باعتماد الأسلوب المباشر لجمع البيانات لمعرفة نوع وعدد الأجهزة وكمية الطاقة المستهلكة فيها وكذلك فترات استخدام تلك الأجهزة وقدراتها التصميمية المثبتة عليها. اظهرت الدراسة ان استهلاك الفرد العراقي الواحد بلغ 6551 كيلووات. ساعة سنويا بينما استهلاك العائلة العراقية المكونة من خمسة افراد 32755 كيلووات. ساعة سنويا. وتم تقدير الترشيد في الطاقة المستهلكة للوحدات السكنية قيد الدراسة بمقدار 31110 ميغاوات. ساعة سنويا [13].

درس طرق ترشيد الطاقة عن طريق تطبيق بعض الطرق الذكية لمعالجة واجهات المباني السكنية مثل المواد المتغيرة الطور الحراري، الزجاج الذكي او نظام الزجاج المزدوج الذكي، أنظمة التظليل الشمسي الذكي، تم اختيار مبنى سكني مساحته 64 م لأجراء الدراسة في أظهرت النتائج تخفيض الحمل التبريدي للمبنى من 3,84 كيلووات ساعة الى 3,59 كيلووات ساعة عند استخدام المادة العازلة، 3,39 كيلووات ساعة في حالة استخدام الزجاج الالكتروكروميك الذكي ومادة البيرلايت الذكية، 2,99 كيلووات ساعة استخدام مادة الإخزن الحرار المتغيرة الطور الذكية واستخدام الزجاج المزدوج الذكي بالإضافة إلى استخدام أنظمة التظليل الشمسي [14].

ونظرا لأهمية تحسين كفاءة الطاقة لترشيد استهلاكها في القطاعات المختلفة التجارية والصناعية والمباني فقد أصدرت العديد من دول العالم تنظيمات وقوانين ولوائح منظمة حددت فيها معايير ومتطلبات يجب استنفائها لتحقيق كفاءة الطاقة البعض منها يتم تطبيقها اجباريا والبعض اختياري. شملت هذه اللوائح معايير متعلقة بغلاف المبنى (قوانين البناء)، معايير متعلقة بالأجهزة والمعدات المختلفة (كفاءة الطاقة)، ومعايير متعلقة بإدارة الطاقة. تستخدم العديد من الحكومات لوائح حول كثافة الطاقة للحد من استخدام الطاقة في المباني المنزلية والتجارية. على مستوى الدول العربية تم اصدار دليل استرشادي لتعزيز تحسين كفاءة استخدام الطاقة في القطاع الاقتصادي من قبل إدارة الطاقة - أمانة المجلس الوزاري العربي للكهرباء وقد أوصى الدليل الدول الأعضاء بوضع برنامج وطني لكفاءة الطاقة واتخاذ الإجراءات اللازمة لتحسين كفاءة الطاقة والرقابة عليها على ان يتم تطبيقها في المباني والمؤسسات الحكومية كما أوصى التقرير بالترويج لكفاءة الطاقة وعمل برامج توعية وملصقات دعائية وتقديم حوافز مالية وتسهيلات واعفاءات من الضرائب والجمارك وغيره [15].

ونتيجة العجز في الامدادات الكهربائية على مستوى اليمن تم وضع استراتيجية الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة في وزارة الكهرباء والطاقة بحسب قانون مجلس الوزراء رقم 199 لعام 2009م استغلال وتطوير مصادر الطاقة المتجددة لزيادة مساهمتها في مجموع الطاقة الكلي وقد اوصى التقرير لسد هذا العجز في الطاقة اتخاذ عدة إجراءات منها: شراء الطاقة من خلال تنفيذ مشروع الربط مع دول المشرق العربي، توليد الطاقة بواسطة الغاز، توليد الكهرباء بالطاقة المتجددة، إدارة الطلب وكفاءة الطاقة وترشيد استهلاكها. كما أصدرت المؤسسة العامة.

جدول (2): نسبة حفظ الطاقة وفترة استرداد راس المال لاستراتيجيات ترشيد استهلاك الطاقة لبعض الدراسات السابقة

م	غلاف المبنى	الأجهزة والمعدات	إدارة الطاقة	انخفاض القدرة / الحمل	استرداد راس المال (سنة)	المرجع
1	إعادة تأهيل كامل غلاف المبنى	جهاز توليد الحرارة	جهاز تحكم للإضاءة	77 %	13	[16]
	إعادة تأهيل كامل غلاف المبنى	جهاز توليد الحرارة	جهاز تحكم للإضاءة	79 %	20	
	إعادة تأهيل كامل غلاف المبنى	جهاز توليد كهرباء وحرارة	جهاز تحكم للإضاءة	79 %	15	
	تبديل نوافذ	جهاز تدفئة جديد، اضاءة بالطاقة الشمسية	جهاز تحكم للإضاءة	33.9 % تدفئة 47.4 % تبريد	11.6	
	تبديل نوافذ، عازل للسقف	جهاز توليد الحرارة، اضاءة بالطاقة الشمسية	جهاز تحكم للإضاءة	49.8 % تدفئة 32.4 % تبريد	9.5	
2	1- عازل حراري للحائط	جهاز التكييف بدون هواء نقي خارجي	.....	50 %	21.4	[17]
	2- زجاج مزدوج	جهاز التكييف مع هواء نقي خارجي	.....	31 %	19.1	
	3- حائط مزدوج 4- زجاج قليل الانبعاث	جهاز تكييف مع هواء نقي خارجي مكيف	.....	16 %	15.5	
3	تبديل الزجاج، عازل حراري للسقف	.....	.....	1.4 - 18.6 %	56.3 - 20	[18]
	.....	.....	.....	4.7 - 23.1 %	2.7 - 0.7	
	.....	.....	.....	0.5 - 2.6 %	8.6 - 1.1	
	.....	.....	.....	15.1 %	0.2	
	.....	.....	.....	4. %	.....
3	مساحة النافذة الى مساحة الحائط	.....	.....	1.7 %	.....
	عوازل حراري	.....	.....	6.37 %	.....
	تبديل نوافذ	.....	.....	2.6 %	.....
	.....	.....	.....	34.28 %	.....
	.....	.....	.....	41 \$	.....
3	مساحة النافذة الى مساحة الحائط عوازل حراري، تبدل نوافذ	.....	.....	4. %	.....
3	مساحة النافذة الى مساحة الحائط عوازل حراري، تبدل نوافذ	.....	.....	1.7 %	.....
3	مساحة النافذة الى مساحة الحائط عوازل حراري، تبدل نوافذ	.....	.....	6.37 %	.....
3	مساحة النافذة الى مساحة الحائط عوازل حراري، تبدل نوافذ	.....	.....	2.6 %	.....
3	مساحة النافذة الى مساحة الحائط عوازل حراري، تبدل نوافذ	.....	.....	34.28 %	.....
3	مساحة النافذة الى مساحة الحائط عوازل حراري، تبدل نوافذ	.....	.....	41 \$	.....

جدول (2): يتبع

م	غلاف المبنى	الأجهزة والمعدات	إدارة الطاقة	انخفاض القدرة / الحمل	استرداد راس المال (سنة)	المرجع
4	1- التظليل 2- إعادة تأهيل الجدران الخارجية 3- زجاج مزدوج 4- تبريد السقف 5- اسقف خضراء	.....	.....	4.8 % 12 % 7.5 % 12 % 24.7 %	.....	[19]
5	التكييف - استخدام مخزن حراري	.....	71 %	8.4	[20]
6	التكييف - استخدام استعادة الطاقة في وحدة مناولة الهواء	.....	17.8 %	1.6	[4]
7	التكييف - محرك متغير السرعة 1. وحدة مناولة الهواء 2. ملف ومروحة	.....	.....	0.5 2.6	[21]
8	محركات عالية الكفاءة تخفيض في سرعة محرك	.....	1.64 % 33 %	7.89 - 0.59 3-1	[1]
9	تكييف - نظام تبريد بالطاقة الشمسية	.....	96.5 %	11.5	[22]
11	استخدام أجهزة عالية الكفاءة، 1. وحدة مناولة هواء 2. تشغيل 3. اضاءة	.....	31 % 22 % 68 %	0.67 2.27 0.22	[23]
12	الحوائط، النوافذ	تهوية طبيعية	.....	53-18 %	.....	[24]
	تهوية ميكانيكية	.....	28-19 %	4.6-7.4	
	تهوية مع نقاهة	.....	38-23 %	20.7-13	
13	اضاءة عالية الكفاءة	.....	86-36 %	8.5-1	[25]

لل كهرباء دليل استرشادي للمستهلكين وضعت فيه عدة توصيات منها اختيار أجهزة عالية الكفاءة في الإضاءة، التلاجة، الغسالة وغيرها من الأجهزة المنزلية، واستخدام السخان الشمسي بدلا عن السخان الكهربائي [26].

ونظرا لأهمية ترشيد استهلاك الطاقة في قطاع المباني التجارية والخدمية في اليمن خصوصا في ظل العجز الحاصل في الشبكة التوليدية الرئيسية وحصول النقص في توفير الوقود اللازم لمحطات التوليد سواء في القطاع العام والخاص في الظروف الحالية تم دراسة تطبيق استراتيجيات ترشيد استهلاك الطاقة في مستشفى جامعة العلوم والتكنولوجيا - صنعاء بالطرق التالية : استخدام أجهزة اضاءة عالية الكفاءة،

رفع درجة حرارة ثرموستات أجهزة التكييف الى الحد الأعلى للراحة، تخفيض تحميل محرك عالية كفاءة وأخيرا استخدام محرك السرعة المتغيرة لمعرفة مقدار الترشيد في استهلاك الطاقة الكهربائية ومقدار الخفض في انبعاثات الغازات الدفيئة.

3. منهجية البحث

1.1 العمل الميداني ووصف الدراسة

يقع مستشفى جامعة العلوم والتكنولوجيا في صنعاء بين خطوط طول وعرض (15.35 درجة شمالا) (44.27 درجة شرقا). يتراوح متوسط درجة الحرارة السنوي فيها بين 10 درجات مئوية و22 درجة مئوية تأسس المستشفى في عام 2004، ويتكون من مبنين رئيسيين؛ مبنى المستشفى الرئيسي ومبنى الإدارة والعيادات. يوضح الجدول (3) الأقسام المختلفة من المستشفى. يعمل المبنى الرئيسي بشكل مستمر لمدة 24 ساعة وسبعة أيام في الأسبوع، في حين يعمل مبنى العيادات لمدة ستة أيام في الأسبوع من الساعة 8 صباحاً حتى الساعة 1 ظهراً ومن 4 مساءً إلى 8 مساءً. وقد بلغت المساحة الإجمالية للمبنى الرئيسي 10800 متر مربع ومبنى العيادات 6700 متر مربع.

جدول (3): الأقسام الرئيسية في الأدوار المختلفة في المستشفى

الدور	المبنى الرئيسي	مبنى العيادات
البيروم 2	غرفة الخدمات	-----
البيروم 1	الطوارئ الاشعة	المطبخ، المغسلة
الارضى	عيادات	مكاتب، الصيدلية الرئيسية
الاول	العمليات، وحدات العناية والتعقيم	الإدارة
الثاني	غرف العمليات، غرف مرضى	عيادات
الثالث	غرف المرضى	عيادات
الرابع	غرف المرضى	عيادات
الخامس	غرف المرضى	المختبر
السادس	معدات التكييف، العلاج الطبيعي، سكن اطباء	مخزن الملفات الطبية

في هذا الدراسة، تم تجميع البيانات في المستشفى بمساعدة قسم الصيانة والمسح والزيارات الميدانية التي استمرت لشهرين لجمع البيانات المطلوبة للدراسة مثل قدرات المحركات المختلفة للمراوح، المضخات، المصاعد، وحدات مناولة الهواء، وحدة الملف والمروحة، الغلاية، ضاغط الهواء، نظام الشفط الطبي، معدات المغسلة، وأجهزة الإضاءة وتكييف هواء المستشفى. يعرض الجدول (4) عدد وحدات الإضاءة وقدراتها في غرف المرضى التي تم اعتبارها للدراسة احمال الإضاءة في المستشفى، بينما يوضح الجدول (5) عدد أجهزة التكييف في المستشفى المستخدمة وقدراتها التشغيلية.

جدول (4): عدد وحدات الإضاءة والمبات المستخدمة وقدراتها في غرف المرضى في المستشفى

الدور	عدد وحدات الإضاءة	عدد المبات في الوحدة	قدرة اللمبة (وات)
الثاني	165	4	20
الثالث	330	4	20
الرابع	330	4	20
الخامس	330	4	20
السادس	165	4	20

جدول (5): قدرة أجهزة التكييف وعددها في المبنى الرئيسي ومبنى العيادات الخاص بالمستشفى

العيادات	الرئيسي	قدرة التكييف (kW)
7	3	1.5
13	10	2
23	35	2.5
12	0	4
0	1	5
1	0	7
0	2	8
4	0	26
0	1	30
1	0	35
1	0	42
0	2	138
0	2	150

علاوة على ذلك، تم استخدام الرسومات المعمارية والميكانيكية والكهربائية للمبنى لمزيد من التوضيح فيما يتعلق بمساحة ومواصفات بعض الأجهزة كما تم اخذ الأحمال الكهربائية اليومية والشهرية للمستشفى من قائمة سجلات المراقبة الخاصة بالمولدات الكهربائية وكذلك من فواتير الكهرباء. تم تسجيل معلومات فنية إضافية مثل مواصفات التصميم للوحدات، ووحدات الملف والمروحة، من موظفي قسم البناء والصيانة في المستشفى. يعرض الجدول (6) عدد المحركات الكهربائية وقدراتها المستخدمة في المستشفى.

جدول (6): قدرة المحركات وعددها في المبنى الرئيسي ومبنى العيادات الخاص بالمستشفى

العيادات	الرئيسي	قدرة التكييف (kW)
2	0	0.75
6	1	1.12
4	9	1.50
6	14	2.000
2	5	2.200
1	1	2.500
0	5	2.800
0	2	3.000
0	3	3.500
0	2	3.700
1	1	4.000
2	0	5.000
0	3	5.500
1	4	5.700
1	0	5.900
6	3	7.500
4	0	8.700
0	4	11.000
0	4	14.920

يوجد في المستشفى ثلاث مولدات كهربائية قدرة كل منها 1000 كيلو فولت أمبير يعمل حوالي اثنين من هذه المولدات خلال ساعات الذروة وتم وضع الثالث كوحدة احتياطية. يبلغ استهلاك الديزل الشهري حوالي 104,343 لتراً من الديزل، بينما يستخدم غاز البترول المسال للمطبخ.

2.3 النموذج الرياضي

1.2.3 استهلاك الطاقة وكثافة الطاقة

يمكن حساب كثافة الطاقة للمبنى (EI) بالكيلوواط ساعة / متر مربع باستخدام المعادلة التالية :

$$EI = \frac{AEC}{TFA} \quad (1)$$

حيث (AEC) هو الاستهلاك السنوي للطاقة والذي تم الحصول عليه من سجلات المراقبة الخاصة بالمستشفى في محطة الطاقة الرئيسية في المستشفى، TFA هو المساحة الاجمالية للمستشفى بالمتر المربع ويمكن حساب استهلاك طاقة الإضاءة السنوي ($AEC_{lighting}$) من خلال العلاقة التالية :

$$AEC_{lighting} = \frac{C_{lighting} * H * LF * N}{1000} \quad (2)$$

حيث $C_{lighting}$ قدرة لمبة الإضاءة وات، H عدد ساعات العمل السنوي، LF هونسبة الاشغال في المستشفى، N عدد اللمبات [27].

2.2.3 حساب ترشيد استهلاك الطاقة باستخدام الإضاءة وإعادة ضبط ترموستات أجهزة التكييف

يمكن حساب ترشيد استهلاك الطاقة السنوي باستخدام أجهزة اضاءة عالية الكفاءة باستخدام المعادلة التالية :

$$AES_{lighting} = AEC_{lighting} * \%ES_{eff.ligh} \quad (3)$$

حيث AES_{light} هو الترشيد السنوي لاستهلاك الطاقة في الإضاءة بوحدة ميغاوات. ساعة، $AEC_{lighting}$ هو الاستهلاك السنوي للإضاءة بوحدة ميغاوات. ساعة، $ES_{eff.ligh}$ هونسبة الترشيد السنوي نتيجة استخدام معدات اضاءة عالية الكفاءة

ويمكن حساب نسبة الترشيد السنوي نتيجة استخدام معدات اضاءة عالية الكفاءة $ES_{eff.ligh}$ بالعلاقة التالية :

$$ES_{eff.ligh} = \frac{(C_{old} - C_{new})}{C_{old}} \quad (4)$$

حيث C_{old} قدرة لمبة الإضاءة السابقة وات، C_{new} قدرة لمبة الإضاءة عالية الكفاءة وات.

ويمكن حساب ترشيد استهلاك الطاقة بإعادة ضبط تحكم درجة الحرارة لأجهزة التكييف بالعلاقة التالية :

$$AES_{ts} = TEC_{ac} * \%ES_{22-26} \quad (5)$$

حيث AES_{st} هو الترشيد السنوي لاستهلاك الطاقة بوحدة ميغاوات. ساعة نتيجة ضبط منظم درجة حرارة الترموستات الخاص بأجهزة التكييف من 22-26 درجة مئوية، TEC_{ac} الاستهلاك السنوي لأجهزة التكييف، ES_{22-26} نسبة الخفض في استهلاك الطاقة موضحة في الجدول (7) [28].

جدول (7): نسبة الخفض في استهلاك الطاقة نتيجة ضبط منظم درجة حرارة الثرموستات الخاص بأجهزة التكييف

انخفاض الطاقة %	درجة الحرارة (C°)
-	22
6	23
12	24
15	25
24	26

3.2.3 توفير الطاقة باستخدام محركات عالية الكفاءة

تستهلك المحركات الكهربائية أكثر من 70% من إجمالي الطاقة المنتجة في العديد من الدول الصناعية، وتستخدم المحركات في العديد من التطبيقات الهندسية المختلفة مثل تشغيل الآلات الصناعية، معدات الخدمات التجارية، الأجهزة الكهربائية المنزلية. تظهر المحركات الحثية القياسية ذات السرعة الثابتة أداءً ضعيفاً بسبب الفواقد المختلفة في أجزاء المحرك المختلفة (القلب الحديدي، الملفات، الدوران، الحمل الضال، احتكاك كرسي التحميل واحتكاك مروحة التهوية). تم إجراء العديد من التحسينات في تصميم / تصنيع المحركات لتقليل هذه الفواقد مما أدى إلى جيل جديد من المحركات الكهربائية تسمى المحركات الكهربائية الموفرة للطاقة وتعتبر ذو كفاءة أكبر من المحرك القياسي بينما زادت تكلفة التصنيع بمقدار يتراوح بين 10-25% أكثر من المحرك القياسي [29].

يمكن حساب ترشيد استهلاك الطاقة السنوية التي تم تحقيقها بواسطة المحركات الكهربائية الموفرة للطاقة المعتمد بدلا من المحركات الفعالة القياسية باستخدام العلاقة التالية [1، 29، 30].

$$AES_{HEM} = W * L * hr * \left[\frac{1}{E_{Std}} - \frac{1}{E_{ee}} \right] * 100 \quad (6)$$

حيث AES_{HEM} يعتبر ترشيد استهلاك الطاقة السنوي، W هو الطاقة المقدرة للمحرك، L هو عامل الحمل (%)، hr هو ساعات العمل السنوية، E_{Std} هي كفاءة المحرك القياسي (%)، E_{ee} هي كفاءة المحرك الموفر للطاقة (%). كما هو موضح في الجدول (8) [1، 29، 30].

جدول (8): كفاءة المحركات عالية الكفاءة والمحركات القياسية عند احتمالات مختلفة

Load (100%)		Load (75%)		Load (50%)		قدرة المحرك (kW)
Eee	Estd	Eee	Estd	Eee	Estd	
80.97	77.00	79.49	74.43	75.28	70.05	0.75
81.85	77.83	80.48	76.43	77.94	73.38	1
82.55	78.50	81.28	78.03	80.06	76.04	1.2
83.55	81.00	83.07	79.29	80.02	77.20	1.5
84.60	81.36	84.13	79.70	81.75	77.61	2
85.01	81.50	84.55	79.87	82.44	77.78	2.2
85.37	82.03	84.81	80.82	82.91	79.01	2.5
85.73	82.55	85.07	81.76	83.38	80.25	2.8
85.96	82.90	85.24	82.39	83.69	81.07	3
87.07	84.74	85.98	84.06	84.16	81.13	3.5
87.51	85.48	86.27	84.73	84.35	81.15	3.7
87.70	85.32	86.53	84.60	84.48	81.80	4
88.00	85.06	86.97	84.38	84.69	82.89	4.5
88.35	85.84	87.28	85.31	85.10	83.48	5

جدول (8): يتبع

Load (100%)		Load (75%)		Load (50%)		قدرة المحرك (kW)
Eee	Estd	Eee	Estd	Eee	Estd	
88.69	86.61	87.58	86.23	85.51	84.07	5.5
88.77	86.71	87.71	86.25	85.72	84.05	5.7
89.50	87.58	88.90	86.45	87.56	83.85	7.5
89.50	87.56	88.85	86.92	87.34	84.87	8.7
90.44	87.94	89.85	87.94	88.32	84.92	11
91.64	88.95	91.05	88.39	88.51	86.03	14.92

4.2.3 توفير الطاقة باستخدام استراتيجية المحركات المتغيرة السرعة

تعتمد كفاءة الطاقة للمحرك الكهربائي على حمل التشغيل، تكون كفاءة الطاقة عالية عندما يعمل المحرك على الحمل الاسمي بينما تنخفض الكفاءة عند الاحمال الجزئية. تكون المحركات أكثر كفاءة عند الاحمال التي تزيد عن 75% من قدرتها وتنخفض كفاءتها عند الاحمال التي تقل عن 50% من طاقتها المقدرة. يؤدي استخدام محركات متغيرة السرعة بدلاً عن المحركات القياسية على زيادة كفاءة الطاقة، وترشيد استهلاكها. كذلك يعمل على تحسين عامل القدرة ويسهل عملية الإقلاع والاستجابة للتغيرات المختلفة في الاحمال حسب ظروف العمل ويمكن حساب توفير الطاقة السنوي باستخدام المعادلة التالية:

$$AES_{VSD} = W * H_{avg-usage} * S_{SR} \quad (7)$$

AES_{VSD} هو توفير الطاقة السنوي مع تطبيق محرك متغير السرعة؛ W قدرة المحرك؛ $H_{avg-usage}$ متوسط الاستخدام السنوي لساعات الاستخدام؛ S_{SR} هي نسبة توفير الطاقة المصاحبة لنسبة معينة من انخفاض السرعة كما هو موضح في الجدول (9) [1].

جدول (9): نسبة خفض استهلاك الطاقة للمحركات ذات السرعة المتغيرة

نسبة التخفيض في استهلاك الطاقة	نسبة تخفيض في السرعة (%)
15	20
35	40
55	60

5.2.3 تخفيضات الانبعاثات المرتبطة بتوفير الطاقة

يؤدي استخدام استراتيجيات ترشيد استهلاك الطاقة إلى انخفاض كبير في الانبعاثات الغازية. سيتم استخدام عامل الانبعاث لكل وحدة طاقة للتنبؤ بخص الانبعاثات من خلال تطبيق هذه الاستراتيجيات. يمكن استخدام المعادلة (8) لتقدير تخفيضات الانبعاثات المرتبطة بتوفير الطاقة ويتم استخدام عامل الانبعاث من المرجع [13].

$$EMR_i = AES_i * EM_i \quad (8)$$

حيث EMR_i هو إجمالي كمية الانبعاثات الغازية (كيلوجرام)، AES_i هو التوفير السنوي للطاقة، EM_i هو عامل انبعاث غازات الاحتباس الحراري لكل وحدة توليد كهرباء.

6.2.3 الدراسة الاقتصادية لاستراتيجيات ترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية

يمكن حساب مقدار التخفيض في التكلفة التشغيلية لاستراتيجيات ترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية أولاً عن طريق حساب الوحدة الاستهلاكية للطاقة الكهربائية (C) بوحدة (دولار لكل كيلوات. ساعة) في المستشفى من خلال المعادلة التالية:

$$C = \frac{Q_{Fuel} * COST_{fuel}}{AEC} \quad (9)$$

حيث Q_{Fuel} متوسط الاستهلاك السنوي للوقود (الديزل) بالتر، $COST_{fuel}$ هو قيمة المتر الواحد بالدولار، AEC هو الاستهلاك السنوي للطاقة الكهربائية كما يمكن حساب مقدار انخفاض التكلفة التشغيلية ($Cost_{red}$) نتيجة ترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية لكل استراتيجية على حدة من خلال المعادلة التالية:

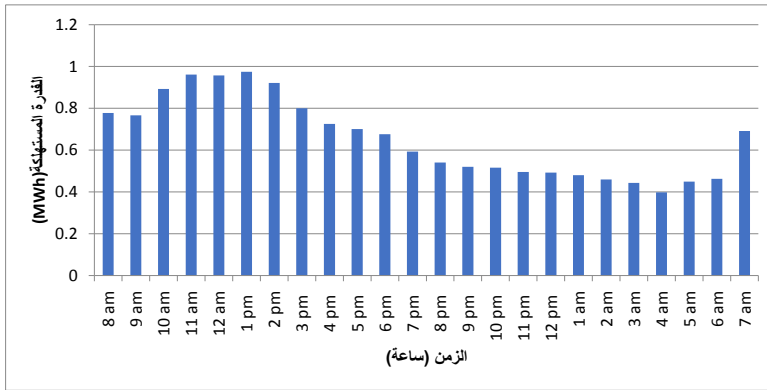
$$Cost_{red} = AES_l * C \quad (10)$$

حيث ان AES_l مقدار الترشيد السنوي للطاقة (كيلووات. ساعة) لكل طريقة و C هو سعر الوحدة الاستهلاكية لكل كيلووات. ساعة.

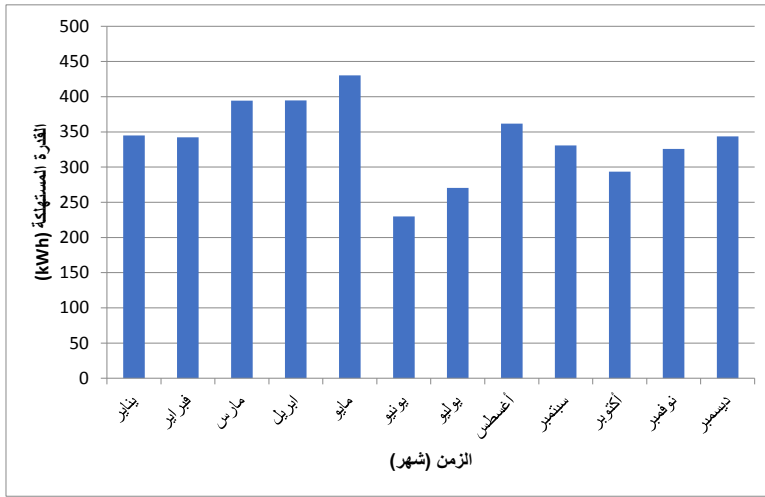
4. النتائج والمناقشة

1.4 استهلاك الطاقة وكثافة الطاقة

يوضح شكل (2) الاستهلاك اليومي لطاقة الكهربائية في المستشفى التي تم تسجيلها يوم 25 أكتوبر 2016، من الواضح أن استهلاك الطاقة الكهربائي يزداد من الساعة 7 صباحاً إلى الساعة 5 مساءً وهي فترة ساعات العمل بينما يقل الحمل الكهربائي بعد الساعة 7 مساءً. تم تسجيل الحمل الأقصى للمستشفى عند الساعة 11 صباحاً خلال ساعة الذروة في المستشفى بقيمة 961.8 كيلووات. الساعة بينما بلغ أقل حمل كهربائي 398.4 كيلووات. ساعة في الساعة 4 صباحاً وقد بلغ الاستهلاك اليومي مقدار 1569.8 كيلووات. الساعة، يوضح الشكل (3) الاستهلاك الشهري للطاقة في المستشفى خلال العام كامل 2015 وبين الشكل ان أقصى حمل كهربائي تم تسجيله في شهر مايو بقيمة 430.345 ميغاوات. ساعة بينما تم تسجيل أقل استهلاك في شهر يونيو، 229.718 ميغاوات. ساعة الذي صادف شهر رمضان وفيه تم تقليص ساعات العمل من 8 ساعات إلى 6 ساعات. بلغ إجمالي استهلاك الطاقة السنوي 4061.8 ميغاوات. ساعة. نلاحظ ان استهلاك الحمل في شهر مارس، ابريل، مايو، أغسطس تجاوز 350 ميغاوات. ساعة نظرا تشغيل اجهزة التكييف نتيجة ارتفاع درجة الحرارة خلال هذه الأشهر.



شكل (2): الاستهلاك اليومي للطاقة الكهربائية للمستشفى 2016/10/25



شكل (3): الاستهلاك الشهري للطاقة الكهربائية للمستشفى لعام 2015

ولعرفة مؤشر الطاقة للمستشفى تم تطبيق المعادلة رقم 1 وقد بلغ الاستهلاك السنوي للمستشفى من واقع السجلات مقدار 4061.8442 ميغاوات. ساعة في السنة ويوضح الناتج ان مؤشر الطاقة هو 207 كيلوواط ساعة / م²، وعند مقارنة هذه القيمة بالقيم التي تم عرضها بالجدول (1) نلاحظ انه ليس هناك فرق واضح بينها وبين الدول المختلفة. بتطبيق المعادلة 2 لحساب معدل الاستهلاك السنوي للإضاءة ونسبة اشغال 65% فقد بلغ اجمالي استهلاك وحدات الإضاءة مقدار 300.64 ميغاوات. ساعة حيث تم احتساب استهلاك غرف المرضى فقط في المستشفى.

2.4 حساب ترشيد استهلاك الطاقة باستخدام الإضاءة وإعادة ضبط ثرموستات أجهزة التكييف

بعد تطبيق المعادلة 3 والمعادلة 4 لحساب مقدار ترشيد الطاقة السنوي باستخدام أجهزة اضاءة عالية الكفاءة فقد لوحظ ان مقدار الترشيد بلغ 150.32 ميغاوات. ساعة بينما يوضح جدول (10) معدل ترشيد استهلاك الطاقة السنوي لأجهزة التكييف من خلال تطبيق المعادلة 5 والجدول (7) حيث يتراوح معدل ترشيد الطاقة من 172.34 ميغاوات. ساعة عند رفع درجة حرارة ثرموستات أجهزة التكييف درجة واحدة إلى 689.72 ميغاوات. ساعة عندما رفع درجة حرارة الضبط الى الحد الأعلى لدرجة حرارة الراحة البشري 26 درجة مئوية.

جدول (10): المعدل السنوي ترشيد استهلاك الطاقة لأجهزة التكييف نتيجة ضبط درجة حرارة الثرموستات

مقدار الترشيد في استهلاك الطاقة عند رفع درجة الحرارة				قدرة المكيف
23°C	24°C	25°C	26°C	
10.82	8.12	5.41	2.71	1.50
31.98	23.99	15.99	8.00	2.00
96.04	72.03	48.02	24.01	2.50
37.44	28.08	18.72	9.36	4.00
2.93	2.19	1.46	0.73	5.00
5.46	4.10	2.73	1.37	7.00
9.36	7.02	4.68	2.34	8.00
81.12	60.84	40.56	20.28	26.0

جدول (10): يتبع

مقدار الترشيد في استهلاك الطاقة عند رفع درجة الحرارة				قدرة المكيف
23°C	24°C	25°C	26°C	
17.55	13.16	8.78	4.39	30.0
27.30	20.48	13.65	6.83	35.0
32.76	24.57	16.38	8.19	42.0
161.46	121.10	80.73	40.37	138.0
175.50	131.63	87.75	43.88	150.0
689.72	517.29	344.86	172.43	الاجمالي

3.4 استخدام محركات عالية الكفاءة مع تخفيض نسبة التحميل

تم استخدام المعادلة 6 والجدول (8) لحساب ترشيد الطاقة وتقليل الاستهلاك السنوي باستخدام محركات عالية الكفاءة مع نسبة تحمل 50%، 75% و 100% من القدرة الاسمية لها. تظهر النتائج المعروضة في الجدول (11) مقدار ترشيد الطاقة السنوي حيث بلغ مقدار الترشيد 53.2 ميغاوات ساعة و70.5 ميغاوات ساعة و95.8 ميغاوات عند نسبة تحميل 50%، 75% و 100% على التوالي. يمكن ملاحظة ان كمية الترشيد تزداد كلما زاد تحميل المحرك ولذا يفضل تشغيل المحركات عند الاحمال الاسمية لها.

جدول (11): المعدل السنوي لترشيد استهلاك الطاقة للمحركات عالية الكفاءة مع تخفيض نسبة حمل المحرك

ترشيد استهلاك الطاقة لنسبة تخفيض حمل المحرك (MWh)			قدرة المحرك (kW)
100%	75%	50%	
0.94	0.95	0.62	0.75
1.41	1.11	0.89	1.00
3.84	2.36	1.22	1.12
1.61	1.84	1.88	1.50
13.50	13.41	9.31	2.00
3.22	3.30	3.87	2.20
1.32	1.21	0.82	2.50
5.50	4.37	2.87	2.80
2.55	1.81	1.15	3.00
4.11	2.59	2.90	3.24
1.76	1.02	1.52	3.70
6.42	3.28	3.77	4.00
0.75	0.45	0.26	5.00
4.33	2.14	1.60	5.60
5.70	3.08	2.46	5.70
7.30	7.49	4.05	7.46
1.96	1.48	1.32	8.70
12.34	5.67	4.21	12.0
17.25	12.96	8.51	14.92

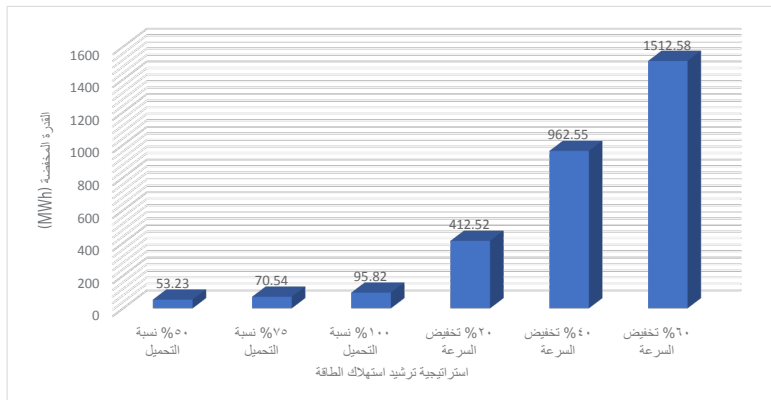
4.4 استخدام محركات ذو سرعة متغيرة

تم حساب ترشيد الطاقة وتخفيض الاستهلاك باستخدام محركات ذو سرعة متغيرة بتطبيق المعادلة 7 والجدول (9). يوضح الجدول (12) النتائج الناتجة عن الحسابات وقد لوحظ أن إجمالي ترشيد استهلاك

الطاقة السنوي كان 412.5 ميغاوات. ساعة، 962.6 ميغاوات. ساعة، 1513 ميغاوات. ساعة عند تقليل السرعة بنسبة 20%، 40%، و60% على التوالي. من الواضح أن ترشيد الطاقة يزداد مع زيادة تخفيض السرعة، كما يوضح الشكل (4) مقارنة ترشيد استهلاك الطاقة بين استراتيجية استخدام محركات ذو سرعة متغيرة واستراتيجية استخدام محركات عالية الكفاءة في هذه الدراسة. من الواضح أن هناك اختلاف كبير في توفير الطاقة لمحركات ذو سرعة متغيرة مقارنة باستخدام محركات عالية الكفاءة مما يشير إلى أن استراتيجية استخدام محركات ذو سرعة متغيرة أكثر قيمة من الناحية الاقتصادية.

جدول (12): المعدل السنوي لترشيد استهلاك الطاقة للمحركات متغيرة السرعة

قدرة المحرك (kW)	ترشيد استهلاك الطاقة لنسبة تخفيض حمل المحرك (MWh)		
	20%	40%	60%
0.75	08.12	05.16	02.22
1.00	12.33	07.84	03.36
1.12	20.39	12.98	05.56
1.50	45.23	28.79	12.33
2.00	139.9	89.03	38.15
2.20	58.50	37.23	15.95
2.50	15.17	09.66	04.14
2.80	67.45	42.92	18.40
3.00	32.66	20.79	8.91
3.24	66.49	42.32	18.14
3.70	35.65	22.69	09.72
4.00	89.37	56.87	24.37
5.00	12.52	07.97	03.41
5.60	87.87	55.92	23.96
5.70	116.9	74.45	31.91
7.46	126.5	80.50	34.50
8.70	43.56	27.72	11.88
12.0	246.3	156.7	67.17
14.92	287.54	182.98	78.42



شكل (4): مقارنة بين استراتيجية المحركات عالية الكفاءة والمحركات متغيرة السرعة

5.4 تخفيض الانبعاثات في المستشفى

باستخدام المعادلة 8 لحساب مقدار الخفض في الانبعاثات الغازية نتيجة ترشيد استهلاك الطاقة باستخدام الاستراتيجيات المطبقة في هذه الدراسة فقد لوحظ ان كمية الانبعاثات من غازات الميثان وأكسيد النيتروز صغيرة جد مقارنة بثاني أكسيد الكربون، فقد وجد ان انخفاض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 35.6 طن سنويا باستخدام اضاءة عالية الكفاءة ومقدار 491.39 طن سنويا عند رفع درجة حرارة الضبط الى الحد الأعلى لدرجة حرارة الراحة البشري 26 درجة مئوية. كما يوضح الجدول (13) مقدار تخفيض الانبعاثات الغازية باستخدام محركات عالية الكفاءة مع تخفيض نسبة التحميل 50 %، 75 %، 100 %، فقد وجد أنه يمكن تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 37.922 طن، 50.258 طن، 68.267 طن على التوالي.

جدول (13): المعدل السنوي لانخفاض الغازات الدفينة نتيجة استخدام المحركات عالية الكفاءة كيلوجرام

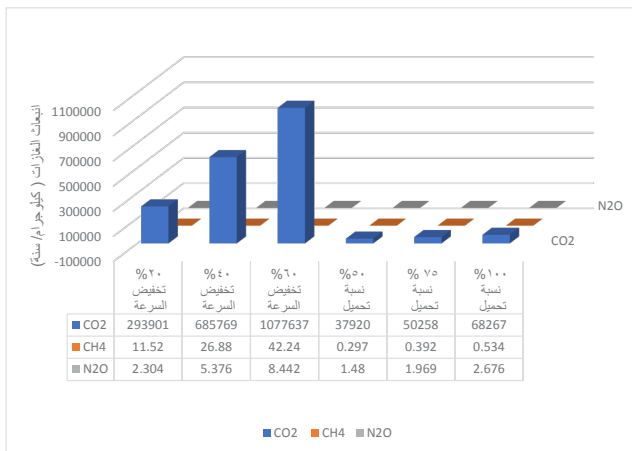
Emission reduction (kg) for 100% Load			Emission reduction (kg) for 75% Load			Emission reduction (kg) for 50% Load			قدرة المحرك (kW)
CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	
669.95	0.026	0.005	674.87	0.026	0.005	441.9	0.02	0.003	0.75
1006.4	0.039	0.008	789.46	0.031	0.006	636.4	0.02	0.005	1
2734.7	0.107	0.021	1681.7	0.066	0.013	872.3	0.03	0.007	1.12
1149.9	0.045	0.009	1313.5	0.051	0.010	1338	0.05	0.010	1.5
9621.4	0.377	0.075	9552.2	0.374	0.075	6634	0.26	0.052	2
2294.8	0.090	0.018	2354.4	0.092	0.018	2754	0.11	0.022	2.2
937.95	0.037	0.007	859.04	0.034	0.007	584.4	0.02	0.005	2.5
3917.2	0.154	0.031	3116.3	0.122	0.024	2044	0.08	0.016	2.8
1816.9	0.071	0.014	1292.1	0.051	0.010	816.9	0.03	0.006	3
2931.2	0.115	0.023	1848.5	0.072	0.014	2068	0.08	0.016	3.5
1253.3	0.049	0.010	729.75	0.029	0.006	1080	0.04	0.008	3.7
4573.3	0.179	0.036	2338.5	0.092	0.018	2686	0.11	0.021	4
536.73	0.021	0.004	321.80	0.013	0.003	184.9	0.01	0.001	5
3082.3	0.121	0.024	1526.1	0.060	0.012	1140	0.04	0.009	5.595
4063.6	0.159	0.032	2193.4	0.086	0.017	1753	0.07	0.014	5.7
5199.1	0.204	0.041	5334.4	0.209	0.042	2885	0.11	0.023	7.46
1397.8	0.055	0.011	1056.3	0.041	0.008	942	0.04	0.007	8.7
8788.8	0.345	0.069	4043.1	0.158	0.032	2998	0.12	0.024	11.2
12292	0.482	0.096	9233.1	0.362	0.072	6065	0.24	0.048	14.92
68267.33	2.676	0.534	50258.52	1.969	0.392	37923.8	1.48	0.297	الاجمالي

يوضح الجدول (14) أيضا مقدار تخفيض الانبعاثات الغازية باستخدام محركات عالية الكفاءة مع تخفيض نسبة تحميلها حيث بلغ مقدار تخفيض انبعاث ثاني أكسيد الكربون السنوي بمقدار 293.9 طناً و 685.8 طناً و 1077.6 طناً باستخدام محركات متغيرة السرعة بنسبة 20 %، 40 %، 60 % على التوالي.

جدول (14): المعدل السنوي لانخفاض الغازات الدفيئة نتيجة استخدام المحركات متغيرة السرعة كيلوجرام

60% of speed reduction			40% of speed reduction			20% of speed reduction			قدرة المحرك (kW)
CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	
5786.72	0.227	0.045	3682.46	0.144	0.029	1578.20	0.062	0.012	0.75
8783.63	0.344	0.069	5589.58	0.219	0.044	2395.54	0.094	0.019	1.0
14530.0	0.570	0.114	9246.39	0.362	0.072	3962.74	0.155	0.031	1.12
32230.9	1.263	0.253	20510.6	0.804	0.161	8790.26	0.345	0.069	1.5
99679.5	3.907	0.781	63432.4	2.486	0.497	27185.3	1.066	0.213	2.0
41682.4	1.634	0.327	26525.2	1.040	0.208	11367.9	0.446	0.089	2.2
10811.0	0.424	0.085	6879.76	0.270	0.054	2948.47	0.116	0.023	2.5
48056.1	1.884	0.377	30581.1	1.199	0.240	13106.2	0.514	0.103	2.8
23271.0	0.912	0.182	14808.8	0.580	0.116	6346.63	0.249	0.050	3.0
47375.8	1.857	0.371	30148.2	1.182	0.236	12920.7	0.506	0.101	3.5
25401.1	0.996	0.199	16164.3	0.634	0.127	6927.56	0.272	0.054	3.7
63673.5	2.496	0.499	40519.5	1.588	0.318	17365.5	0.681	0.136	4.0
8918.43	0.350	0.070	5675.36	0.222	0.044	2432.30	0.095	0.019	5.0
62605.6	2.454	0.491	39840	1.562	0.312	17074.3	0.669	0.134	5.6
83346.2	3.267	0.653	53038.5	2.079	0.416	22730.8	0.891	0.178	5.70
90127.3	3.533	0.707	57353.8	2.248	0.450	24580.2	0.963	0.193	7.46
31036.1	1.217	0.243	19750.3	0.774	0.155	8464.40	0.332	0.066	8.70
175466	6.878	1.376	111660	4.377	0.875	47854.3	1.876	0.375	11.2
204856	8.030	1.606	130363	5.110	1.022	55869.9	2.190	0.438	14.92
1077637	42.24	8.442	685769	26.880	5.376	293901	11.52	2.304	الاجمالي

يوضح الشكل (5) مسبقاً مقارنة الانبعاثات الغازية بين استراتيجية استخدام محركات ذو سرعة متغيرة واستراتيجية استخدام محركات عالية الكفاءة في هذه الدراسة. من الواضح أن هناك اختلاف كبير في تخفيض الانبعاثات الغازية بين استراتيجية المحركات ذو سرعة متغيرة مقارنة باستخدام محركات عالية الكفاءة، من الواضح أن المحركات ذو سرعة متغيرة تساهم بشكل فعال في تقليل الانبعاثات.



شكل (5): مقارنة الانبعاثات الغازية بين استراتيجية المحركات عالية الكفاءة والمحركات متغيرة السرعة

6.4 الدراسة الاقتصادية لاستراتيجيات ترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية في المستشفى

وفقا للبيانات التي تم جمعها من سجلات مراقبة تشغيل المولدات واستهلاك الوقود وجد ان متوسط الاستهلاك الشهري للمولدات بلغ 104,343 لتر ومتوسط الاستهلاك السنوي 1,252,116 لتر كما ان متوسط قيمة اللتر الواحد للوقود (الديزل) حاليا هو 0.583 دولار امريكي وبتطبيق المعادلة رقم 9 نجد ان قيمة الوحدة الاستهلاكية للطاقة الكهربائية هي 0.179 دولار والتي تعادل 107.8 ريال يمني على اعتبار ان صرف الدولار الواحد في الوقت الحالي يساوي 600 ريال يمني ونجد ان قيمة الوحدة الاستهلاكية في القطاع الخاص تتراوح ما بين 200-250 ريال يمني ومن خلال تطبيق المعادلة رقم 10 للاستراتيجيات التي تم دراستها في هذا البحث يمكننا حساب مقدار الانخفاض في التكلفة التشغيلية وعلى النحو التالي.

1.6.4 التكلفة الاقتصادية لاستخدام معدات اضاءة عالية الكفاءة وإعادة ضبط الثرموستات لأجهزة التكييف

من خلال تطبيق المعادلة رقم 10 أظهرت النتائج ان مقدار التخفيض السنوي في التكلفة التشغيلية لاستخدام معدات اضاءة عالية الكفاءة في غرف الرقود في المستشفى مبلغ وقدرة 26,907 دولار امريكي وهو يمثل نسبة تخفيض مقداره 3.68 % من كلفة الاستهلاك السنوي للطاقة الكهربائية. كما يوضح الجدول (15) قيمة انخفاض الكلفة التشغيلية لإعادة ضبط أجهزة التكييف عند درجات حرارة مختلفة

جدول (15): انخفاض التكلفة التشغيلية لإعادة ضبط الثرموستات لأجهزة التكييف في المستشفى

26°C	25°C	24°C	23°C	قدرة المكيف
1936.78	1453.48	968.39	485.09	1.5
5724.42	4294.21	2862.21	1432	2
17191.16	12893.37	8595.58	4297.79	2.5
6701.76	5026.32	3350.88	1675.44	4
524.47	392.01	261.34	130.67	5
977.34	733.9	488.67	245.23	7
1675.44	1256.58	837.72	418.86	8
14520.48	10890.36	7260.24	3630.12	26
3141.45	2355.64	1571.62	785.81	30
4886.7	3665.92	2443.35	1222.57	35
5864.04	4398.03	2932.02	1466.01	42
28901.34	21676.9	14450.67	7226.23	138
31414.5	23561.77	15707.25	7854.52	150
123459.9	92598.49	61729.94	30870.34	الاجمالي

حيث تراوح مقدار التخفيض في الكلفة التشغيلية لإعادة ضبط جهاز الثرموستات مقدار 30,870.34، 61,729.94، 92,598.49، 123,459.9 دولار امريكي لدرجات الحرارة 26،25،24،23 درجة مئوية على التوالي ونسبة تخفيض تتراوح بين 4.2 %، 8.45 %، 12.67 %، 16.9 % من التكلفة التشغيلية الكلية للمستشفى. يتضح ان نسبة التخفيض لهذه الاستراتيجية أفضل من استراتيجية استخدام أجهزة اضاءة عالية الكفاءة ولا تتطلب استحداث أجهزة بديلة او جديدة بقدر ما تحتاج الى توعية لنزلاء المستشفى والموظفين والعاملين فيه وغالبا في المؤسسات العالمية يتم عقد دورات تدريبية للعاملين بأهمية ترشيد استهلاك الطاقة وكيفية تطبيقها.

2.6.4 التكلفة الاقتصادية لاستخدام محركات عالية الكفاءة ومحركات متغيرة السرعة

يوضح الجدول (16) مقدار تخفيض التكلفة التشغيلية لاستخدام محركات عالية الكفاءة مع نسبة تحميل 50 %، 75 %، 100 % واستراتيجية استخدام محركات متغيرة السرعة بنسبة تخفيض مقدارها

20%، 40%، 60% . حيث بلغ مقدار التخفيض في الاستهلاك السنوي للمحركات عالية الكفاءة مع نسبة تحميل جزئي الى 9,527.86، 12,627.40، 17,151.81 دولار امريكي لنسبة تحميل 50%، 75%، 100% على التوالي وهو ما يمثل نسبة تخفيض اجمالية بمقدار 1.3%، 1.72%، 2.34% وهو ما يؤشر عدم جدوى هذه الاستراتيجية نظرا لان نسبة التخفيض في التكلفة السنوية ضئيلة وهو ما تم الإشارة اليه في المرجع رقم [28]. بينما بلغ مقدار التخفيض السنوي لاستهلاك الطاقة الكهربائية باستخدام محركات متغيرة السرعة الى 73,837.50، 172,291.08، 270,728.55 دولار امريكي بنسبة تخفيض السرعة بمقدار 20%، 40%، 60% على التتابع وهو ما يمثل نسبة تخفيض سنوي بمقدار 10.1%، 23.58%، 37% . كما يوضح الجدول (16) انه كلما زاد مقدار التخفيض في سرعة المحرك كلما زاد مقدار التخفيض في التكلفة التشغيلية لها كما ان مقدار التخفيض في التكلفة التشغيلية للمحركات المتغيرة السرعة ذو القدرات الكبيرة أفضل من المحركات الصغيرة.

جدول (16): انخفاض التكلفة التشغيلية لاستخدام محركات عالية الكفاءة ومحركات متغيرة السرعة

قدرة المحرك (kW)	تقليل التكلفة التشغيلية للمحركات عالية الكفاءة مع نسبة تحميل المحرك (دولار امريكي)			تقليل التكلفة التشغيلية لاستراتيجية محركات متغيرة السرعة (دولار امريكي)		
	50%	75%	100%	20%	40%	60%
0.75	110.98	170.05	168.26	397.38	923.64	1453.48
1.00	159.31	198.69	252.39	601.44	1403.36	2207.07
1.12	218.38	422.44	687.36	995.24	2323.42	3649.81
1.50	336.52	329.36	288.19	2207.07	5153.41	8096.17
2.00	1666.49	2400.39	2416.50	6828.85	15936.37	25042.10
2.20	692.73	590.7	576.38	2855.05	6664.17	10471.50
2.50	146.78	216.59	236.28	741.06	1729.14	2715.43
2.80	513.73	782.23	984.50	3293.60	7682.68	12073.55
3.00	205.85	323.99	456.45	1594.89	3721.41	5846.14
3.24	519.1	463.61	735.69	3247.06	7575.28	11901.71
3.70	272.08	182.58	315.04	1739.88	4061.51	6381.35
4.00	674.83	587.12	1149.18	4362.23	10179.73	15997.23
5.00	46.54	80.55	134.25	0610.39	1426.63	2241.08
5.59	286.4	383.06	775.07	4288.84	10009.68	15728.73
5.70	440.34	551.32	1020.30	5711.89	13326.55	20925.10
7.46	724.95	1340.71	1306.70	6175.50	14409.5	22643.50
8.70	236.28	264.92	0350.84	2126.52	4961.88	7797.24
12.00	753.59	1014.93	2208.86	12023.43	28049.3	44087.70
14.92	1523.29	2319.84	3087.75	14037.18	32753.42	51469.66
الاجمالي	9527.86	12627.40	17151.81	73837.50	172291.08	270728.55

وهو ما يتوافق مع ما تم نشره في المرجع رقم [1] والمرجع رقم [29] ويتضح جليا ان مقدار التخفيض باستخدام محركات متغيرة السرعة اعلى من استخدام محركات عالية الكفاءة مع تخفيض نسبة التحميل الا انها تتطلب استحداث أجهزة تتحكم بالسرعة وهو يمثل إضافة كلفة اقتصادية تتطلب دراسة مدى مقدار التخفيض بالتكلفة التشغيلية السنوية الى مقدار القيمة الإضافية لاستخدام هذه الأجهزة للحكم على مدى فاعليتها.

5. الخلاصة والتوصيات

تم دراسة استخدام استراتيجيات مختلفة لترشيد استهلاك الطاقة وتقليل الانبعاثات الغازية لمستشفى خاص في اليمن مثل استخدام أجهزة اضاءة عالية الكفاءة، رفع درجة حرارة الترموستات لأجهزة التكييف، تخفيض حمل المحرك ذي الكفاءة العالية واستخدام محركات متغيرة السرعة. تم جمع بيانات استهلاك الطاقة للمستشفى من سجلات محطة الطاقة الرئيسية في المستشفى، يمكن استخلاص الاستنتاجات التالية من هذه الدراسة :

- بلغ استهلاك الطاقة السنوي للمستشفى 4061.8 ميغاوات ساعة، ومؤشر الطاقة 207 كيلووات ساعة / متر مربع
- مقدار ترشيد استهلاك الطاقة السنوي باستخدام أجهزة اضاءة عالية الكفاءة 150.32 ميغاوات. ساعة بينما بلغ معدل ترشيد استهلاك الطاقة السنوي لأجهزة التكييف 689.72 ميغاوات. ساعة عند رفع درجة حرارة ترموستات أجهزة التكييف الى الحد الأعلى لدرجة حرارة الراحة البشري 26 درجة مئوية
- ترشيد الطاقة السنوي باستخدام محركات عالية الكفاءة عند نسبة تحميل 50 %، 75 % و 100 % هو 53.2 ميغاوات ساعة و 70.5 ميغاوات ساعة و 95.8 ميغاوات على التوالي
- ترشيد استهلاك الطاقة السنوي كان 412.5 ميغاوات. ساعة، 962.6 ميغاوات. ساعة، 1513 ميغاوات. ساعة عند تقليل السرعة بنسبة 20%، 40%، و 60% على التوالي
- استراتيجيات محركات السرعة المتغيرة عالية القدرة أكثر قيمة من الناحية الاقتصادية والبيئة مقارنة مع فيما يتعلق بتخفيضات السرعة.
- يلاحظ أيضاً أن كمية كبيرة من الانبعاثات الغازية يمكن تقليلها لسيناريوهات توفير الطاقة المختلفة المطبقة في المستشفى.
- ينصح بتطبيق استراتيجيات ترشيد استهلاك الطاقة على مستوى المؤسسات الرئيسية لتقليل الاستهلاك والانبعاثات الغازية
- بلغت نسبة تخفيض استهلاك الطاقة الكهربائية لاستخدام أجهزة اضاءة عالية الكفاءة 3.68 % ونسبة 16.9 % لإعادة ضبط جهاز الترموستات لأجهزة التكييف 26 درجة مئوية
- بلغت نسبة تخفيض استهلاك الطاقة الكهربائية لاستخدام محركات عالية الكفاءة بنسبة تحميل 100% مقدار 2.34 % بينما بلغت نسبة تخفيض استهلاك الطاقة الكهربائية السنوي 37 % استخدام محركات متغيرة السرعة بنسبة تخفيض السرعة 60 % الا انها تحتاج دراسة مقدار الإضافة الاقتصادية نتيجة استخدام أجهزة تخفيض السرعات

المراجع

- [1] Saidur, R., et al., *An end-use energy analysis in a Malaysian public hospital*. Energy, 2010. 35(12): p. 4780-4785.
- [2] D'Agostino, D., B. Cuniberti, and P. Bertoldi, *Energy consumption and efficiency technology measures in European non-residential buildings*. Energy and Buildings, 2017. 153: p. 72-86.
- [3] B. Yildiz, J.I.B., A.B. Sproul,, *A review and analysis of regression and machine learning models on commercial building electricity load forecasting*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. 73: p. 1104-1122.

- [4] Ahmadzadehtalatapeh, M. and Y.H. Yau, *The application of heat pipe heat exchangers to improve the air quality and reduce the energy consumption of the air conditioning system in a hospital ward—A full year model simulation*. Energy and Buildings, 2011. 43(9): p. 2344-2355.
- [5] كتاب الاحصاء السنوي 2000-2014، ا.ا. للاحصاء،، 2000-2014، وزارة التخطيط والتنمية.
- [6] Wang, T., et al., *Building energy efficiency for public hospitals and healthcare facilities in China: Barriers and drivers*. Energy, 2016. 103: p. 588-597.
- [7] Moghimi, S., et al., *Building energy index and end-use energy analysis in large-scale hospitals—case study in Malaysia*. Energy Efficiency, 2014. 7(2): p. 243-256.
- [8] Morgenstern, P., et al., *Benchmarking acute hospitals: Composite electricity targets based on departmental consumption intensities?* Energy and Buildings, 2016. 118: p. 277-290.
- [9] Christiansen, N., et al., *Electricity consumption of medical plug loads in hospital laboratories: Identification, evaluation, prediction and verification*. Energy and Buildings, 2015. 107: p. 392-406.
- [10] Radwan, A.F., et al., *Retrofitting of existing buildings to achieve better energy-efficiency in commercial building case study: Hospital in Egypt*. Alexandria Engineering Journal, 2016. 55(4): p. 3061-3071.
- [11] Hu, S., J. Chen, and Y. Chuah, *Energy cost and consumption in a large acute hospital*. International Journal on Architectural Science, 2004. 5(1): p. 11-19.
- [12] Santamouris, M., et al., *Energy performance and energy conservation in health care buildings in Hellas*. Energy Conversion and Management, 1994. 35(4): p. 293-305.
- [13] الطابوق، م.ه.ك.ا.، ترشيد الطاقة الكهربائية في القطاع المنزلي وأثرها على توفير الطاقة لحافظة النجف الاشرف مجلة جامعة بابل -العلوم الهندسية 2015. 23(4): p. 852-39.
- [14] توفيق، م.ع.أ.ك.م.ش.ا.ب.ش.و.م.، تحسين الأداء الحراري في البيئة الداخلية للمباني السكنية في مصر باستخدام الواجهات الذكية Journal Of Al Azhar University Engineering Sector 2017. 12(44): p. 1225-1241.
- [15] الإطار الاسترشادي العربي لتحسين كفاءة الطاقة الكهربائية وترشيد استهلاكها لدى المستخدم النهائي، 2010، إدارة الطاقة - أمانة المجلس الوزاري للعربي للكهرباء
- [16] Carbonari, A., et al., *Managing energy retrofit of acute hospitals and community clinics through EPC contracting: the MARTE project*. Energy Procedia, 2015. 78: p. 1033-1038.
- [17] Ascione, F., et al., *Rehabilitation of the building envelope of hospitals: Achievable energy savings and microclimatic control on varying the HVAC systems in Mediterranean climates*. Energy and Buildings, 2013. 60: p. 125-138.

- [18] Buonomano, A., et al., *Dynamic energy performance analysis: Case study for energy efficiency retrofits of hospital buildings*. Energy, 2014. 78: p. 555-572.
- [19] Taleb, H.M.J.J.o.B.E., *Enhancing the skin performance of hospital buildings in the UAE*. 2016. 7: p. 300-311.
- [20] Vanhoudt, D., et al., *An aquifer thermal storage system in a Belgian hospital: Long-term experimental evaluation of energy and cost savings*. Energy and Buildings, 2011. 43(12): p. 3657-3665.
- [21] Dezfouli, M., et al., *Feasibility of saving energy by using VSD in HVAC system, a case study of large scale hospital in Malaysia*. WSEAS Transactions on Environment and Development, 2014. 10: p. 15-25.
- [22] Tsoutsos, T., et al., *Design of a solar absorption cooling system in a Greek hospital*. Energy and Buildings, 2010. 42(2): p. 265-272.
- [23] Kim, J.J.J.R., *Conservation and Recycling, Economic analysis on energy saving technologies for complex manufacturing building*. 2017. 123: p. 249-254.
- [24] Gładyszewska-Fiedoruk, K. and D.A. Krawczyk, *The possibilities of energy consumption reduction and a maintenance of indoor air quality in doctor's offices located in north-eastern Poland*. Energy and Buildings, 2014. 85: p. 235-245.
- [25] Nilsson, P.-E. and S. Aronsson, *Energy-efficient lighting in existing non-residential buildings: A comparison of nine buildings in five countries*. Energy, 1993. 18(2): p. 115-122.
- [26] *أستراتيجية الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة - قانون مجلس الوزراء رقم 199 لعام 2009م و.ا. والطاقة، 2009.*
- [27] Mahlia, T.M.I., et al., *Life cycle cost analysis and payback period of lighting retrofit at the University of Malaya*. 2011. 15(2): p. 1125-1132.
- [28] Saidur, R.J.E.p., *Energy consumption, energy savings, and emission analysis in Malaysian office buildings*. 2009. 37(10): p. 4104-4113.
- [29] Habib, M.A., et al., *Energy consumption, energy saving and emission reduction of a garment industrial building in Bangladesh*. Energy, 2016. 112(Supplement C): p. 91-100.
- [30] Garcia, A.G.P., et al., *Energy-efficiency standards for electric motors in Brazilian industry*. Energy Policy, 2007. 35(6): p. 3424-3439.
- [31] Brander, M., et al., *Technical Paper Electricity-specific emission factors for grid electricity*. Ecometrica, Emissionfactors. com, 2011.