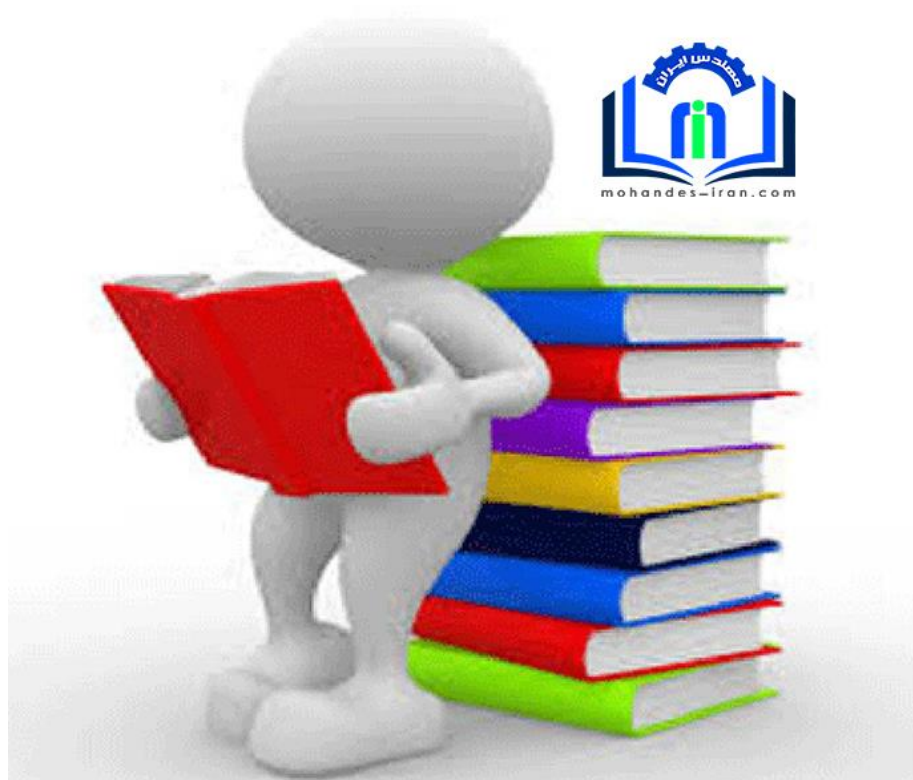


سایت مهندس ایران ارائه دهنده
کتاب، جزوات، مقالات و... رشته های
مختلف مهندسی

به سایت ما سر بزنید

[www,mohandes-iran.com](http://www.mohandes-iran.com)



معرفی سیستم تهویه مطبوع VRF و بررسی توجیه اقتصادی این سیستم در شرایط ایران

حامد رضایی عزیز آبادی

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
h.rezaie@mail.kntu.ac.ir

مسعود ضیابشر حق

دانشیار دانشکده مهندسی مکانیکی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
mzia@kntu.ac.ir

زهرا عباسی

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
abbasi_mecheng@yahoo.com

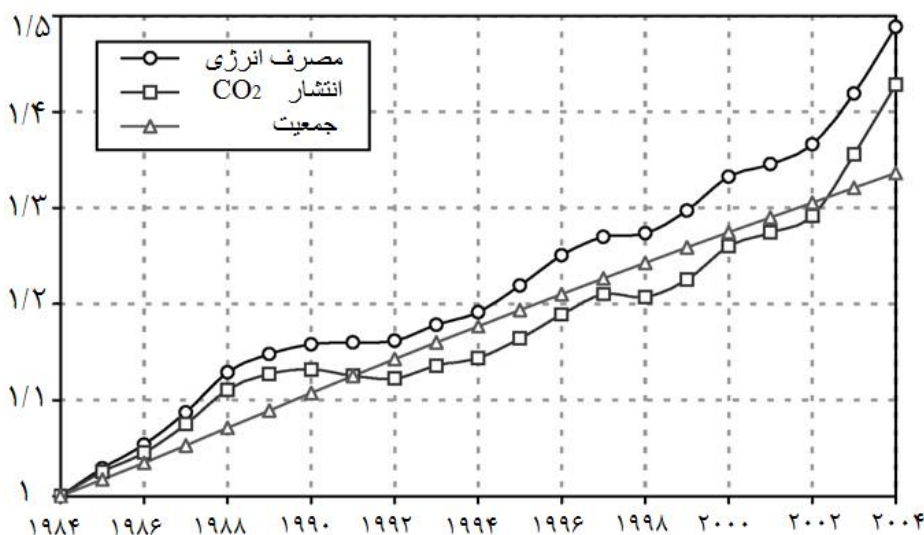
چکیده

رشد روز افزون مصرف انرژی در دنیا باعث افزایش نگرانی‌هایی در زمینه انرژی و مشکلات زیست محیطی شده است. مصرف انرژی در ساختمان‌ها به عنوان عمده‌ترین بخش مصرف، سهم ۴۰ درصدی از مصرف کل انرژی دنیا را به خود اختصاص داده است و به شدت نیاز به بهره بردن از تجهیزات و سیستم‌های جدید در جهت کاهش مصرف انرژی را در خود حس می‌کند. سیستم VRF با توجه به قابلیت‌ها و بازدهی بسیار مناسب به عنوان یک راه‌کار کاهش مصرف انرژی در بخش ساختمان مطرح می‌باشد. تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده که علاوه بر بازدهی جنبه‌های اقتصادی استفاده از VRF در ساختمان‌ها را نیز بررسی کرده‌اند. هر چند عمده تحقیقات انجام شده در کنار بازدهی بالا اقتصادی بودن سیستم VRF را اثبات کرده و نشان داده‌اند که می‌توان به طور محسوس هزینه‌های جاری را در مقایسه با سیستم‌های دیگر کاهش داد اما با توجه به متفاوت بودن تعرفه‌های انرژی در ایران، برای بررسی توجیه اقتصادی سیستم VRF با در نظر گرفتن شرایط و تعرفه‌های انرژی محلی، این تحقیق انجام شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهند که استفاده از سیستم VRF در مقایسه با چیلرهای هواخنک و آب خنک به ترتیب ۲۸٪ و ۵۲٪ کاهش هزینه‌های جاری را در پی خواهد داشت.

واژگان کلیدی: سیستم VRF، تهویه مطبوع، توجیه اقتصادی، ساختمان، مصرف انرژی

مقدمه

رشد روز افزون مصرف انرژی در دنیا باعث افزایش نگرانی‌هایی در زمینه تامین انرژی، اتمام منابع انرژی، افزایش آلاینده‌ها و خطرات زیست محیطی شام تخریب لایه اوزون، افزایش گرمایش زمین، تغییرات آب و هوایی و ... شده است. آژانس بین المللی انرژی^۱ (IEA) اطلاعاتی را درباره رشد مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها در بازه ۲۰ ساله ۱۹۸۴ تا ۲۰۰۴ جمع‌آوری کرده که به نگرانی‌ها دامن زد است (Agency, 2007). در طول این بازه بیست ساله، مصرف انرژی ۴۹٪ و انتشار کربن‌دی‌اکسید ۴۳٪ افزایش داشته، در واقع مصرف انرژی و انتشار کربن‌دی‌اکسید سالانه به ترتیب ۲٪ و ۱/۸٪ رشد داشته است (Agency, 2007). در شکل ۱ رشد مصرف انرژی، انتشار کربن‌دی‌اکسید و رشد جمعیت در بازه ۱۹۸۴ تا ۲۰۰۴ به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ دیده شده است مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها رشد چشم‌گیری در دهه‌های گذشته داشته و با توجه به پیش‌بینی‌ها این رشد نه تنها متوقف نشده بلکه با توجه به تغییرات ایجاد شده در شرایط زندگی و روند توسعه تکنولوژی‌های جدید باید انتظار استمرار در افزایش مصرف انرژی را داشت.



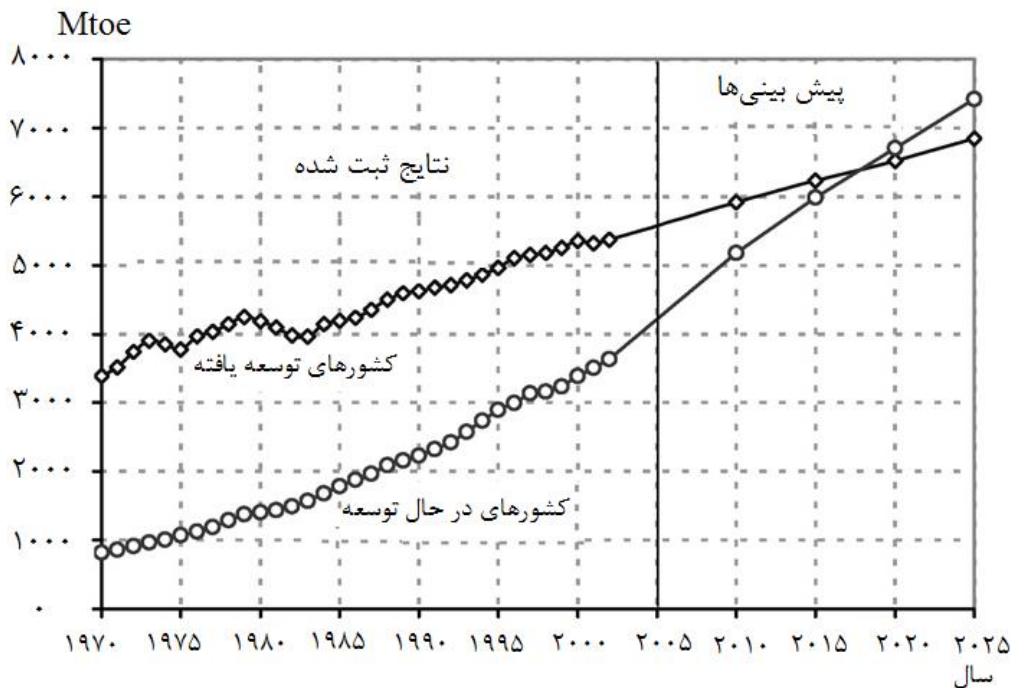
شکل ۱. نرخ رشد مصرف انرژی، افزایش جمعیت و انتشار کربن‌دی‌اکسید ۱۹۸۴ تا ۲۰۰۴ (Agency, 2007)

برای داشتن درک بهتر نسبت تغییرات ایجاد شده در شرایط زندگی و تاثیر آن بر روند مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها می‌توان به نمودار مصرف انرژی به صورت ناحیه‌بندی شده برای کشورهای در حال توسعه^۲ شامل کشورهای جنوب شرق آسیا، خاورمیانه، آمریکای جنوبی و آفریقا در مقایسه با کشورهای توسعه یافته مانند آمریکای شمالی، اروپای غربی، ژاپن، استرالیا و نیوزلند که در شکل ۲ آورده شده است (Agency, 2007)، رجوع کرد. در کشورهای توسعه یافته نرخ رشد مصرف انرژی به صورت سالانه رقمی برابر ۱/۱٪ می‌باشد در حالی که در کشورهای در حال توسعه این رقم برابر ۳/۲٪ بوده و پیش‌بینی می‌شود که در سال‌های پیش رو میزان سرانه مصرف انرژی در کشورهای در حال توسعه از کشورهای توسعه یافته پیشی بگیرد (Agency, 2007).

¹ International Energy Agency

² emerging economies

با توجه به مطالب گفته شده می‌توان فهمید که در آینده‌ای نزدیک مشکلات انرژی و زیست محیطی در کشورهای در حال توسعه به شدتی جدی شده و ضرورت بهینه‌سازی در مصرف انرژی در این کشورها به شدت حس خواهد شد.



شکل ۲. مصرف انرژی در کشورهای در حال توسعه و توسعه یافته بر حسب Mtoe^۳ (Agency, 2007)

مصرف انرژی در ساختمان‌ها و لزوم بهینه‌سازی

مصرف انرژی را می‌توان به طور کلی به سه بخش اصلی صنایع، حمل و نقل و صنعت ساختمان تقسیم کرد. رشد جمعیت، افزایش سرویس و امکانات، افزایش زمان سپری شده در ساختمان‌ها و افزایش سطح رفاهی باعث رشد چشم‌گیر مصرف انرژی در ساختمان‌ها شده است. همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود علاوه بر افزایش کلی مصرف انرژی در سال‌های اخیر، سهم مصرف انرژی در ساختمان‌ها و صنایع وابسته نسبت به دو بخش دیگر رشد سریع‌تری داشته است.

جدول ۱. مقایسه مصرف کلی انرژی در دنیا سال ۱۹۷۳ و ۲۰۰۴ به تفکیک (Barten, 2005)

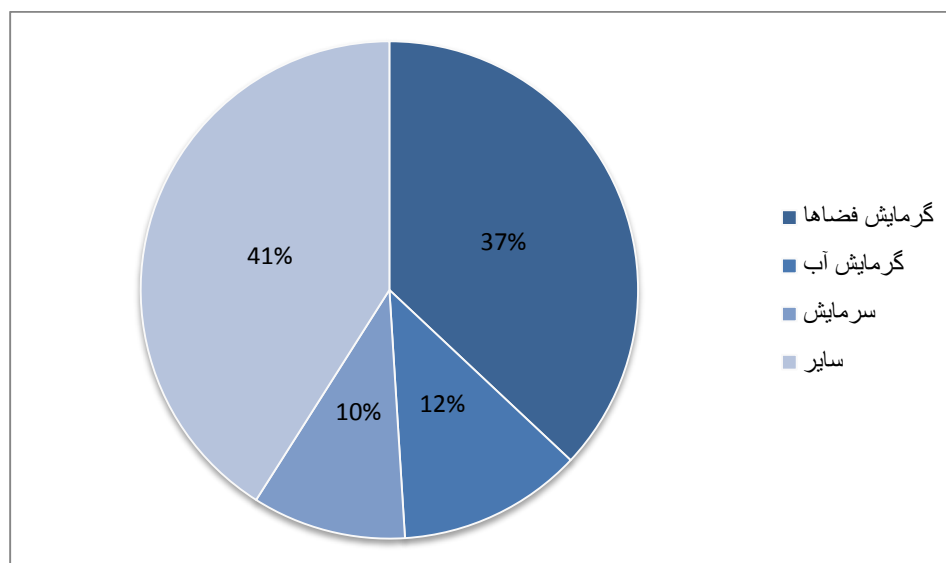
مصرف انرژی در سه بخش اصلی	سال ۱۹۷۳	سال ۲۰۰۴	نسبت رشد
صنعت	۳۹	۳۰	۰/۷۶
حمل و نقل	۲۵	۲۸	۱/۱۴
ساختمان و صنایع وابسته	۳۶	۴۲	۱/۱۶

در کنار این آمار اختصاص سهم ۴۰٪ مصرف کل انرژی و ۳۶٪ انتشار کل کربن دی‌اکسید به ساختمان‌ها و صنایع وابسته در اروپا در اواخر دهه گذشته بیانگر رشد کاملاً محسوس انرژی در این بخش می‌باشد (Recast, 2010). هر چند که بخش ساختمان

³ million tons of oil equivalent

معادل با ۱۱،۶۳۰،۰۰۰ مگاوات ساعت

مهم‌ترین مصرف کننده انرژی و عامل اصلی انتشار آلاینده ها می‌باشد اما متأسفانه توجهات بیش‌تری به صنعت و حمل و نقل معطوف شده است. در واقع در آمریکا صنعت ساختمان سهم ۴۴٫۶۷٪ از کل انتشارات کربن دی‌اکسید در آمریکا را در سال ۲۰۱۲ داشته است در حالی که حمل و نقل دارای سهم ۳۴٫۳٪ بوده و صنعت هم سهمی معادل ۲۱٫۱٪ داشته است (http://architecture2030.org, 2013). همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، در بخش ساختمان‌ها ۵۹٪ کل انرژی مصرفی به بخش گرمایش/سرمایش (تهویه مطبوع) اختصاص داشته، لذا با توجه به سهم قابل توجه انرژی مصرفی در ساختمان‌ها و اهمیت سرمایش/گرمایش در این بخش موضوع این تحقیق به بررسی یکی از سیستم‌های جدید معرفی شده در این قسمت است.



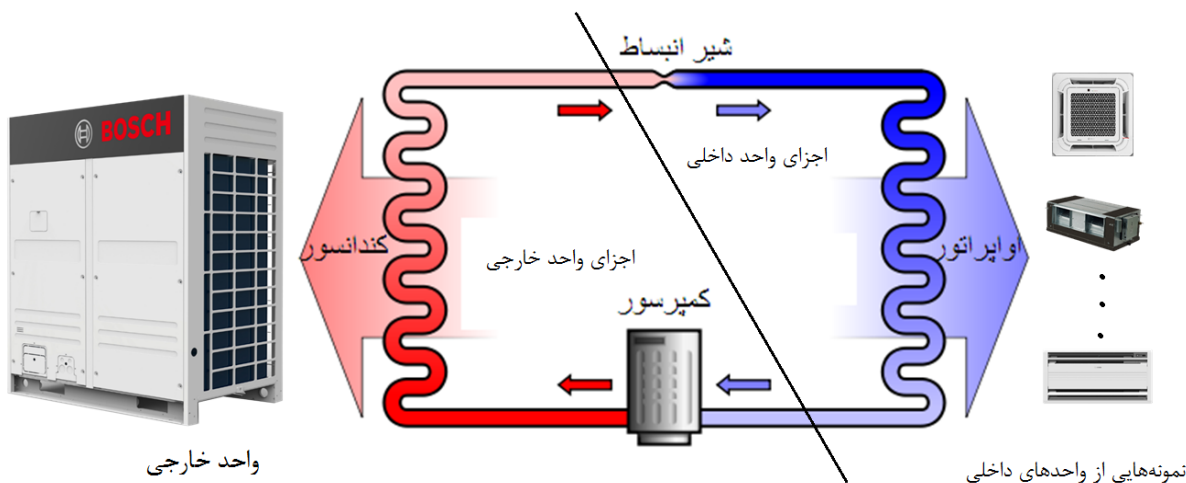
شکل ۳: مصرف انرژی در بخش‌های مختلف ساختمان‌ها در انتهای سال ۲۰۱۰ (Park, 2013)

عمده انرژی تولیدی از منابع تجدیدناپذیر و محدود مانند سوخت‌های فسیلی شامل نفت، گاز و زغال سنگ (با سهم ۹۰٪ از کل انرژی تولیدی در دنیا) می‌باشد که به شدت بر محیط زیست تاثیر منفی و تخریبی دارند (Inyang & Frimpong, 2007). سوخت‌های فسیلی مسئول تولید ۳۵/۵ میلیارد تن کربن دی‌اکسید در سال هستند. با جمعیتی بالغ بر ۷ میلیارد، تقریباً سرانه تولید کربن دی‌اکسید برای هر شخص ۵/۱ تن در سال است. بر اساس تخمین‌های همین مجموعه هزینه صرفه‌جویی 10^{15} Btu انرژی از طریق بهینه کردن ساختمان‌ها ۴۲/۱ میلیارد دلار بوده در صورتی که هزینه تولید همین مقدار انرژی از طریق نیروگاه زغال سنگ ۱۰۴/۵ میلیون دلار و نیروگاه هسته ای ۱۴۱/۳ میلیارد دلار آمریکا می‌باشد (http://architecture2030.org, 2013). بنابراین لزوم بهینه‌سازی در صنعت ساختمان و بالتبع آن بخش تهویه مطبوع به عنوان یکی از بخش‌های اصلی بیش از پیش به چشم می‌آید. یکی تجهیزات جدید مطرح شده در بخش تهویه مطبوع ساختمان‌ها سیستم VRF^4 است که با اقبال خوبی روبه‌رو شده و در بازار تهویه مطبوع دنیا جایگاه خوبی پیدا کرده است. در ادامه به معرفی این سیستم پرداخته شده و توجیح فنی اقتصادی آن در مقایسه با سیستم‌های مرسوم چیلری بررسی می‌شود.

معرفی سیستم VRF

⁴ Variable Refrigerant Flow

کلمه VRF مخفف Variable Refrigerant Flow به معنای جریان مبرد متغیر می‌باشد. این سیستم جز جدیدترین محصولات توسعه یافته بر اساس سیکل تبرید تراکمی (Sonntag, Borgnakke, Van Wylen, & Van Wyk, 2003) بوده که تسهیلات و قابلیت‌های فوق العاده‌ای را به عنوان یک سیستم تهویه مطبوع مرکزی در اختیار کاربران قرار می‌دهند. در این سیستم‌ها یک کندانسور (واحد خارجی) به چندین اواپراتور (یونیت داخلی) متصل می‌شود (شکل ۴).



شکل ۴. شماتیکی از سیکل تبرید تراکمی با واحدهای معادل در سیستم VRF ("2017", <http://boschvac.com>). هر واحد داخلی شامل اواپراتور و شیر انبساط بوده و واحد خارجی نیز کندانسور و کمپرسور را شامل می‌شود.

این سیستم‌ها با حذف معایب و محدودیت‌های موجود در سایر محصولات دارای سیکل تبرید تراکمی، ضمن این‌که نیاز به موتورخانه مرکزی در پروژه‌ها را منتفی نموده با توجه به حذف بسیاری از عوامل اتلاف بازدهی مانند اتلاف در مسیر لوله کشی به دلیل انبساط در واحدهای داخلی و حذف واسط انتقال حرارت آب بازدهی بالاتری ارائه می‌دهد. اگرچه مهم‌ترین عیب سیستم VRF هزینه اولیه بالا در مقایسه با سیستم‌های تهویه مطبوع مرسوم است، با توجه به پتانسیل بالای این سیستم برای کاهش مصرف انرژی، زمان بازگشت سرمایه تخمین زده شده برای سیستم VRF در مقایسه با سیستم چیلر آب خنک در یک ساختمان تجاری عمومی می‌تواند حدود ۱/۵ سال باشد (Aynur, 2010).

در کنار جنبه‌های اقتصادی سیستم VRF می‌توان به جنبه‌های فنی زیر نیز اشاره کرد. این ویژگی‌های فنی بالا باعث شده که سیستم VRF به خوبی جای خود را در بازار باز کند. بعضی از مهم‌ترین ویژگی‌هایی که توسط این سیستم‌ها ارائه می‌شود در زیر آورده شده است.

ظرفیتی گسترده: سیستم‌های VRF با ارائه طیف ظرفیتی گسترده ۷ تا ۲۰۰ کیلووات و با گام‌های مناسب باعث افزایش انعطاف در طراحی شده و قابلیت استفاده شدن در پروژه‌های کوچک تا بزرگ را دارد.

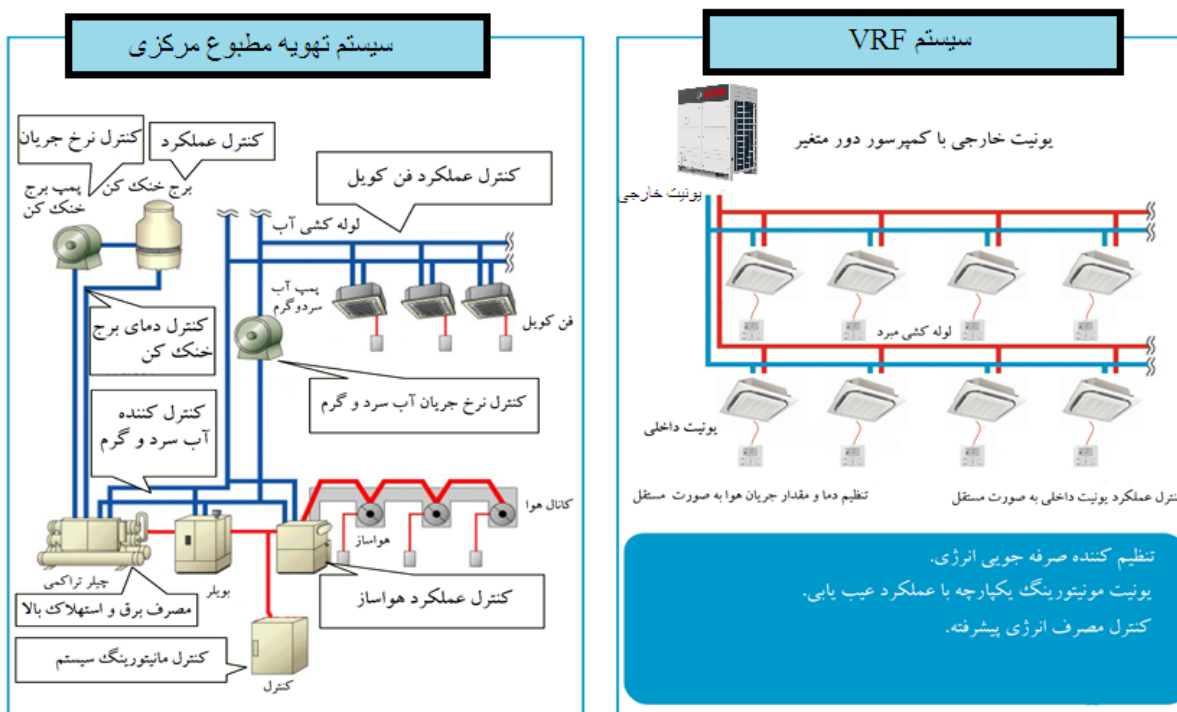
بازدهی بالا: کمپرسور سیستم‌های VRF از نرخ مبرد متغیر بهره می‌برند و توسط یک موتور سرعت متغیر کنترل می‌شوند و این باعث می‌شود که این کمپرسورها با بازدهی بهتری نسبت به کمپرسورهای مرسوم با اندازه مشابه کار کنند. پیچیدگی این کمپرسورها و کنترل آن‌ها به گرانتر شدن این کمپرسورها در مقایسه با کمپرسورهای مرسوم می‌شوند (Thornton & Wagner, 2012).

اجرای منسجم و یک دست: با توجه به سادگی نصب و اجرا، کل کار توسط یک تیم قابل انجام خواهد بود که این علاوه بر تسریع در نصب باعث افزایش کیفیت نصب شده که در نتیجه به قابلیت اطمینان بیشتر و آسایش بالاتر می‌انجامد.

کنترل دقیق دما و آسایش بالاتر: معمولا در سیستم VRF یونیت (واحد) داخلی موجود در هر فضا در هر لحظه به وسیله واحد کنترلی پیشرفته حسگرهای مختلف موجود در آن، دمای فضا را با دمای تعیین شده توسط مصرف کننده‌ها مقایسه و با توجه به دمای مبرد ورودی و خروجی مقدار مبرد مورد نیاز را درخواست می‌نماید. در واقع با توجه به قابلیت‌های کنترلی پیشرفته می‌توان ضمن برنامه‌ریزی به صورت دلخواه و بالا بردن آسایش گامی مهم در کاهش مصرف انرژی نیز برداشت. در ضمن تمام قابلیت‌های کنترلی در دل خود سیستم بوده و برای این کار نیازی به تهیه تجهیزات جداگانه‌ای مانند سیستم‌های مدیریت هوشمند ساختمان (BMS) ندارد.

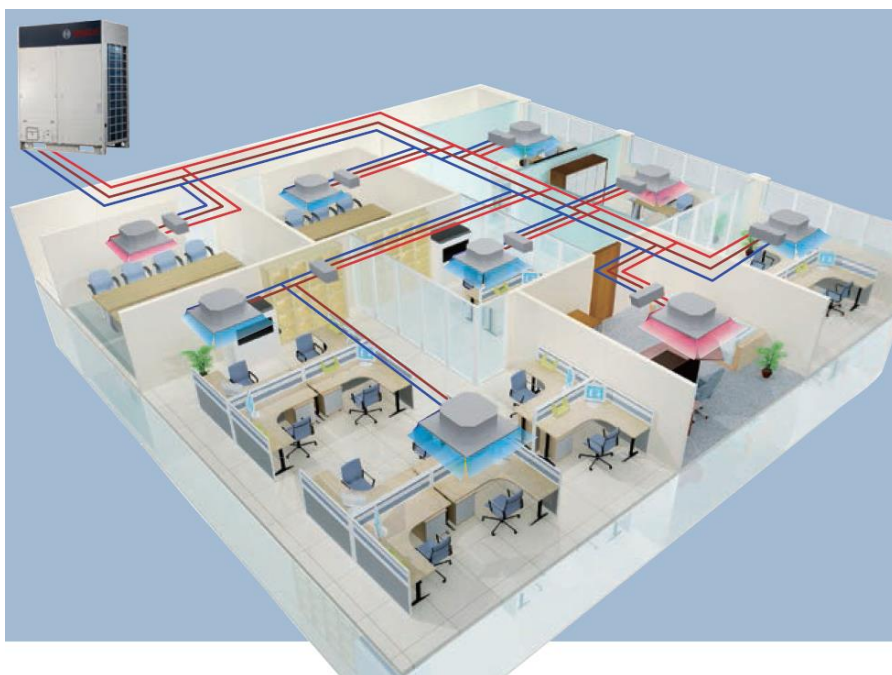
تعداد یونیت‌های داخلی بالا: یونیت‌های خارجی سیستم VRF قابلیت اتصال به تعداد یونیت‌های داخلی بالا تا ۶۴ یونیت را داشته و می‌توانند بار سرمایشی و گرمایشی ۶۴ فضای مختلف را به طور مستقل تامین نمایند.

طیف کاری گسترده: سیستم‌های VRF معمولا در طیف گسترده‌ای از ۲۰ تا ۴۸ سانتی‌گراد به خوبی کار می‌کنند. حذف فضای موتورخانه و نیاز به تجهیزات کم‌تر: همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، سیستم‌های VRF برخلاف سیستم چیلری عملا به تجهیزات جانبی مانند پمپ‌های سرمایش/گرمایش، پمپ‌های برج خنک‌کننده و لوله‌کشی‌های آب، سختی‌گیر و تجهیزات مشابه نیازی نداشته و به طور مستقل تنها با بهره‌گیری از یونیت‌های خارجی، یونیت‌های داخلی و لوله‌های مسی عمل می‌کند، بنابراین فضای بسیار کم‌تری نسبت به سیستم‌های مشابه نیاز دارد.



شکل ۵. مقایسه اجزای سیستم VRF و سیستم چیلر-فن کویل در یک نگاه ("2017", www.karoandisheh.com)

عیب‌یابی هوشمند: در سیستم VRF در صورت بروز هرگونه مشکل در هر یک از اجزا سیستم به طور خودکار ایراد به وجود آمده را شناسایی کرده و از طریق نمایش کد خطا بر روی نمایشگر کنترل‌های یونیت‌های داخلی یا نمایشگر تعبیه شده روی یونیت خارجی به کاربر اطلاع می‌دهد. بنابراین با حذف مرحله تشخیص زمان عیب‌یابی را بسیار کاهش می‌دهد. قابلیت گرمایش/سرمایش همزمان: در نوع خاصی از سیستم VRF (نوع سه لوله‌ای یا بازیابی حرارت^۵) قابلیت ارائه گرمایش و سرمایش همزمان وجود دارد که در هیچ کدا از سیستم‌های مشابه این قابلیت وجود ندارد. این موضوع می‌تواند در مکان‌های خاصی مانند هتل، بیمارستان، و دیتا سنترها بسیار مفید باشد. در سیستم‌های سه لوله‌ای بازدهی در شرایط خاص تا حدود ۲ برابر قابل افزایش است. برای درک بهتر این نوع خاص می‌توان شکل ۶ را دید. در این سیستم سه لوله‌ای همان‌طور که از اسم آن مشخص است به جای دو خط رفت و برگشت، سه خط لوله داشته و تجهیزاتی جداگانه به عنوان جعبه انتخاب^۶ نیاز دارد.



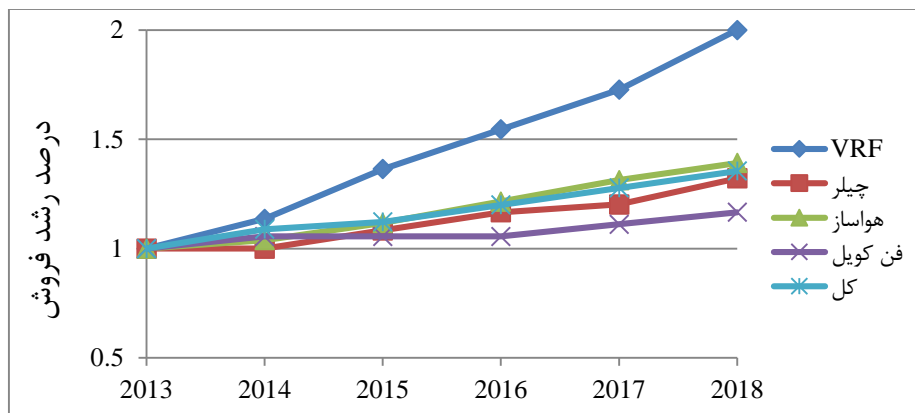
شکل ۶. تصویری از یک مدار سیستم VRF همراه با واحدهای داخلی و خارجی ("2017", <http://boschhvac.com>)

ویژگی‌های زیاد دیگری مانند نگهداری آسان و حذف مصرف آب، افزایش قابلیت اطمینان و طول عمر بالا وجود دارند که آسایش و بازده بالای این سیستم‌ها را تضمین کرده و توجهی بر محبوبیت این سیستم‌ها می‌باشند.

آمار مربوط به روند رشد فروش سیستم‌های مختلف تهویه مطبوع در دنیا از ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸ به خوبی وضعیت سیستم VRF در دنیا و رشد محبوبیت آن را نشان می‌دهد (BSRIA, 2016). به نظر می‌رسد که سیستم‌های VRF با حذف معایب سیستم‌های اسپلیت یونیت و چیلرهای تراکمی گوی سبقت را از رقبای سنتی خود در بازار تهویه مطبوع دنیا ربوده باشند (شکل ۷ و جدول ۲).

⁵ Heat recovery

^۶ برای انتخاب جریان مورد نیاز واحدهای داخلی پائین دست جعبه



شکل ۷. میانگین نرخ رشد فروش سالانه سیستم‌های تهویه مطبوع در دنیا از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸ (BSRIA, 2016)

جدول ۲. حجم بازار VRF در دنیا از ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸ بر اساس تعداد دستگاه (BSRIA, 2016)

سال	تعداد دستگاه
۲۰۱۳	۱,۱۰۰,۰۰۰
۲۰۱۴	۱,۲۵۰,۰۰۰
۲۰۱۵	۱,۵۰۰,۰۰۰
۲۰۱۶	۱,۷۰۰,۰۰۰
۲۰۱۷	۱,۹۰۰,۰۰۰
۲۰۱۸	۲,۲۰۰,۰۰۰

روش تحقیق

مروری بر منابع

با توجه به مزایای بسیار زیادی که سیستم‌های VRF به عنوان تجهیزات سرمایشی/گرمایشی در ساختمان‌ها، تحقیقات بسیاری در زمینه‌های مختلف مرتبط با این سیستم‌ها انجام شده است که در زیر به برخی از این تحقیقات اشاره شده است. مطالعه انجام شده توسط دانگسو و همکارانش (Kim, Cox, Cho, & Im, 2017) نشان داده که سیستم‌های VRF می‌توانند به صرفه‌جویی ۱۵-۴۲٪ در مصرف انرژی بسته به شرایط استفاده دست یابند. در این مقادیر بالای صرفه‌جویی برای مناطق گرم و مقدا پائین آن برای مناطق سرد بدست آمده است (دلیل این امر تفاوت هزینه‌های مربوط به برق و گاز است). در تحقیقی دیگر کاساندر و ارسل به بررسی بازدهی انرژی در ساختمان‌های اداری با اندازه متوسط در شرایط آب و هوایی کانادا پرداخته‌اند. در این تحقیق فهمیده شد که با توجه به شرایط استفاده، سیستم‌های VRF دارای پتانسیل بهبودی در حدود ۲۹٪ می‌باشند. البته نتایج این تحقیق اهمیت طراحی درست را نیز هدف قرار داده و تاثیر مهم آن را بررسی کرده است (Kani-Sanchez & Richman, 2017).

پارک در تزارش خود عملکرد و جنبه‌های اقتصادی سیستم VRF نسبت به سیستم‌های مرسوم در HVAC را با تاکید بر دوره کاری (عمر مفید دستگاه) بررسی کرده است. موردهای مطالعاتی این تحقیق شامل شش ساختمان با کاربری‌های مختلف در ۱۱ ناحیه آب و هوایی مختلف بوده است. در این تحقیق که نتایج آن به برتری سیستم VRF اذعان داشته‌اند برای شبیه‌سازی از نرم افزار EnergyPlus بهره برده شده است (Park, 2013).

آمارانات (Amarnath & Blatt, 2008) در تحقیق خود نشان داد که برای یک سیستم تهویه مطبوع برای ساختمان‌های تجاری عمومی سیستم VRF نسبت به سیستم تهویه مطبوع چیلری حدود ۳۰٪-۴۰٪ ذخیره انرژی در پی دارد. البته باید توجه داشت که هزینه نصب سیستم VRF حدود ۸٪ نسبت به چیلرهای آب خنک و ۱۶٪ نسبت به چیلرهای هوا خنک بالاتر می‌باشد. آمارانات نهایتاً در تحقیق خود به این نتیجه رسید که می‌توان دوره بازگشت ۱/۵ ساله نسبت به سیستم چیلر هواخنک و ۸ ماه نسبت به چیلر آب خنک برای سیستم VRF تخمین زد (Amarnath & Blatt, 2008).

در کنار این تحقیقات می‌توان به تحقیقات زیاد دیگری در زمینه‌های مختلف سیستم VRF از نحوه و شرایط عایق کاری تا تاثیر نصب و پتانسیل بهبود اشاره کرد که خود گواه معتبری بر اهمیت استفاده از سیستم‌های جدید در صنعت تهویه مطبوع می‌باشد (Amarnath & Blatt, 2008; Lin, Lee, Hwang, ; Kwon, Lee, Hwang, Radermacher, & Kim, 2014; Yildiz & Ersöz, 2015; Shi et al., 2017 & Radermacher, 2015). تمام مطالعات انجام شده در دنیا روی سیستم VRF به برتری این سیستم از نظر هزینه‌های جاری و بازدهی تاکید داشته‌اند اما با توجه به متفاوت بودن هزینه‌های حامل‌های انرژی در ایران، در این کار توجه اقتصادی سیستم VRF نسبت به سیستم‌های چیلری با توجه به شرایط محلی و تعرفه حامل‌های انرژی در ایران پرداخته شده است.

مقایسه اقتصادی سیستم VRF با سیستم‌های چیلری

پیش از پرداخت به کار اصلی این تحقیق ذکر مقایسه‌ای از آمارانات (Amarnath & Blatt, 2008) از نظر هزینه‌های کلی برای تهیه و خرید سیستم‌های VRF خالی از لطف نیست. در این تحقیق ضمن رسیدن به پتانسیل ۴۰ درصدی بهبود هزینه‌های جاری توسط VRF در زمینه هزینه‌های اولیه نیز مطالب زیر ارائه شده است. هزینه کلی سیستم VRF حدود ۵٪ تا ۲۰٪ بالاتر از سیستم چیلر-فن کویل با ظرفیت مشابه می‌باشد. هزینه سیستم VRF حدود ۳۰٪ تا ۵۰٪ بالاتر از سیستم‌های داکت اسپلیت با ظرفیت مشابه است. هزینه‌های جاری هزینه‌های مربوط به انرژی مصرفی و نگهداری و هزینه‌های انشعاب برق پروژه (دیماندر) می‌باشد که در زمان بهره‌برداری از سیستم می‌بایست توسط مصرف‌کننده نهائی تأمین گردد. در ادامه با بررسی یک نمونه مطالعاتی^۷ هزینه‌های لازم برای استفاده از VRF در مقایسه با سیستم چیلر تراکمی-فن کویل بررسی می‌گردد.

مشخصات نمونه مطالعاتی و گزینه‌های ممکن

این مطالعه به صورت مقایسه‌ای بین VRF و سیستم چیلری با دو نوع چیلر تراکمی اسکروی هواخنک و چیلر تراکمی اسکرو آب خنک روی یک ساختمان مسکونی (۱۰ واحدی) با زیربنای مفید ۲۵۰۰ مترمربع واقع در شمال تهران در سال ۱۳۹۵ انجام شده است. با توجه به مترای مفید ساختمان و کاربری آن، برای پروژه موجود به ۸۳ تن برودتی نیاز است لذا با توجه به بار برودتی و مطالب ارائه شده در ادامه به مقایسه هزینه انرژی مصرفی در سیستم VRF و چیلرهای تراکمی هوا خنک و آب خنک می‌پردازیم. تعرفه هزینه برق و قدرت (دیماندر)

در سرتاسر این مقاله بهای برق مصرفی از دسته مصارف اشتراکی واحدهای مسکونی بیش از ۳۰ کیلووات در نظر گرفته شده است. بنابراین هزینه برق به ازای هر کیلووات ساعت ۱،۱۱۴ ریال در اوج بار، ۵۵۷ ریال در میان بار و ۲۷۸/۵ ریال در کم‌بار است که در تابستان‌ها با افزایش ۲۰٪ به ترتیب ۱،۳۳۶/۸ ریال در اوج بار، ۶۶۸/۴ ریال در میان بار و ۳۳۴/۲ ریال در کم‌بار می‌باشد.^۸ علاوه بر

^۷ Case Study

^۸ تمام تعرفه‌های مربوط به هزینه آب و برق از گزارشات سازمان‌های مربوطه برای نیمه دوم سال ۱۳۹۵ استخراج شده است.

هزینه مصرف برق، مشترکین می‌بایست مبلغ ثابتی را بابت انشعاب برق (دیماند) هر ماه پرداخت کنند، که هزینه آن برای هر کیلووات ۴۰،۹۲۰ ریال می‌باشد که برای کلیه ماه‌های سال از مشترک دریافت می‌شود.

محاسبه هزینه برق مصرفی یونیت‌های خارجی سیستم VRF با توجه به ظرفیت مورد نیاز پروژه (۸۳ تن تبرید) از دو سیستم VRF برند بوش به صورت ماژولار SDCI54/151-3 و SDCI52/146-3 با ظرفیت سرمایشی مجموع ۸۴ تن تبرید استفاده می‌شود، لذا محاسبات هزینه‌ها نیز بر اساس ویژگی‌های این سیستم‌ها انجام می‌گردد ("2017", <http://boschvac.com>).

تذکر: ساعات کارکرد سیستم برودتی به طور متوسط ۱۲ ساعت کار شبانه روزی با ۱۰۰٪ ظرفیت و یا ۲۴ ساعت کار شبانه روزی با ۵۰٪ ظرفیت در نظر گرفته شده است.

با مراجعه به کاتالوگ دستگاه^۹، مصرف دستگاه‌های ذکر شده در مجموع برابر ۸۷/۲ کیلووات می‌باشد، با در نظر گرفتن ۱۲ ساعت کارکرد دستگاه هزینه برق مصرفی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$87.2 \text{ kw} \times 12 \text{ hour} \times 31 \text{ day} = 42,348 \text{ kw} / \text{ month} \quad (1)$$

در این رابطه و رابطه‌های دیگر علائم و اختصارات به شرح زیر می‌باشند.

ماه-month ساعت-hour دقیقه-min روز-day کیلووات-kw

با در نظر گرفتن ۱۲ ساعت کارکرد دستگاه به صورت ۲ ساعت کم‌بار، ۶ ساعت میان بار و ۴ ساعت اوج بار هزینه برق مصرفی دستگاه به شرح زیر محاسبه می‌شود. هزینه برق مصرفی در ماه برابر ۲۷،۱۰۲،۲۸۳ ریال خواهد بود. هزینه قدرت خریداری شده در یک ماه^{۱۰}:

شرکت برق بهای ۹۰٪ قدرت خریداری شده را از مشترک دریافت می‌دارد. توجه شود که با توجه به دو فصله بودن، سیستم VRF بر خلاف سیستم چیلر هم در زمستان و هم در تابستان از انرژی برق استفاده می‌کند، با در نظر گرفتن ۵ ماه سرمایش و ۵ ماه گرمایش، بایستی هزینه پرداختی برای قدرت در طول سال را بر تعداد ماه‌های استفاده یعنی ۱۰ ماه تقسیم نمود تا هزینه واقعی پرداختی از سوی مشترک در هر ماه برای بهای قدرت مورد نیاز محاسبه شود.

$$\left(\frac{12}{10}\right) \times (87.2 \text{ kw} \times 0.9 \times 40,920) = 3,853,682 \quad (2)$$

بنابراین هزینه کل برق مصرفی سیستم VRF در ماه برابر ۳۰،۹۵۵،۹۶۵ ریال می‌باشد.

محاسبه هزینه برق و آب سیستم چیلر تراکمی آب خنک محاسبات زیر برای یک چیلر تراکمی آب خنک به ظرفیت ۸۳ تن برودتی بوده^{۱۱} که بر اساس جدول مشخصات فنی ارائه شده توسط شرکت سازنده میزان برق مصرفی آن برابر ۵۸/۱ کیلووات است. هزینه برق مصرفی دستگاه به شرح زیر محاسبه می‌شود.

$$58.1 \text{ kw} \times 12 \text{ hour} \times 31 \text{ day} = 21,617 \text{ kw} / \text{ month} \quad (3)$$

^۹ با مراجعه به کاتالوگ شرکت بوش مشاهده می‌شود که دستگاه SDCI54/151-3 از سه ماژول SDCI18/50-3 و دستگاه SDCI52/146-3 از دو ماژول SDCI18/50-3 و یک ماژول SDCI16/45-3 تشکیل شده‌اند. در حالت سرمایش مصرف برق دستگاه SDCI18/50-3 برابر ۱۴/۷۹ کیلووات و مصرف دستگاه SDCI16/45-3 برابر ۱۳/۲۵ می‌باشد.

^{۱۰} علاوه بر هزینه برق مصرفی هزینه‌ای جداگانه نیز بابت اشتراک برق اخذ شده (هزینه دیماند) و با توجه به ظرفیت آن باید پرداخت شود.

^{۱۱} در تمام سیستم‌ها برای اعتبار بیش‌تر از یک برند یکسان استفاده شده است.

با توجه به متغیر بودن شرایط پروژه‌های مختلف و تاثیر بسیار زیاد این مورد در انتخاب پمپ و مصرف آن، در این مقاله از برق مصرفی پمپ‌ها صرف نظر شده است اما مصرف برق فن برج خنک‌کننده متناظر با چیلر ۸۳ تن تبرید (SDC-U125ASSY) (برج ابارا-شینوا) برابر ۳/۷ کیلووات در نظر گرفته شده است ("2017", www.karoandisheh.com).

$$3.7kw \times 12hour \times 31day = 1.376kw / month \quad (4)$$

با در نظر گرفتن ۱۲ ساعت کارکرد دستگاه به صورت ۲ ساعت کم‌بار، ۶ ساعت میان بار و ۴ ساعت اوج بار هزینه برق مصرفی چیلر تراکمی آب خنک و فن برج خنک کن ماهانه معادل ۱۹,۲۰۹,۸۱۶ ریال خواهد بود.

هزینه قدرت (دیماند)

مشترک بهای قدرت مورد نیاز دستگاه را برای کلیه ماه‌های سال می‌پردازد، حال آن که صرفاً در ماه‌های گرم سال (به طور میانگین ۵ ماه) از سیستم خنک‌کننده استفاده می‌نمایند، بنابراین هزینه قدرت پرداختی در طول سال را می‌بایست بر تعداد ماه‌های گرم تقسیم نمود. بنابراین هزینه دیماند به صورت ماهانه برابر ۲,۲۷۵,۹۷۰ ریال خواهد بود.

هزینه آب مصرفی

متوسط مصرف آب تغذیه برج‌های خنک‌کننده ابارا-شینوا (مجموعه آب تبخیری، Blow down و پاشش) در اوج بار ۱/۳٪ آب در گردش آن یعنی ۱/۶۵ متر مکعب در دقیقه می‌باشد. بنابراین بر مبنای تعرفه سازمان آب برای مصارف اشتراکی کاربری مسکونی، برای هر متر مکعب مبلغ ۷,۷۲۲ ریال از مشترکان دریافت می‌شود که در تابستان با افزایش ۲۰ درصدی ۹,۲۶۶ ریال به ازای هر متر مکعب خواهد رسید. بنابراین هزینه مصرفی بر حسب ریال به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$1.65 \left(\frac{m^3}{min} \right) \times 1.3\% \times 60 \text{ min} / \text{hour} \times 24 \text{ hour} / \text{day} \times 31 \text{ day} \times 9.266 = 8,872,454 \quad (5)$$

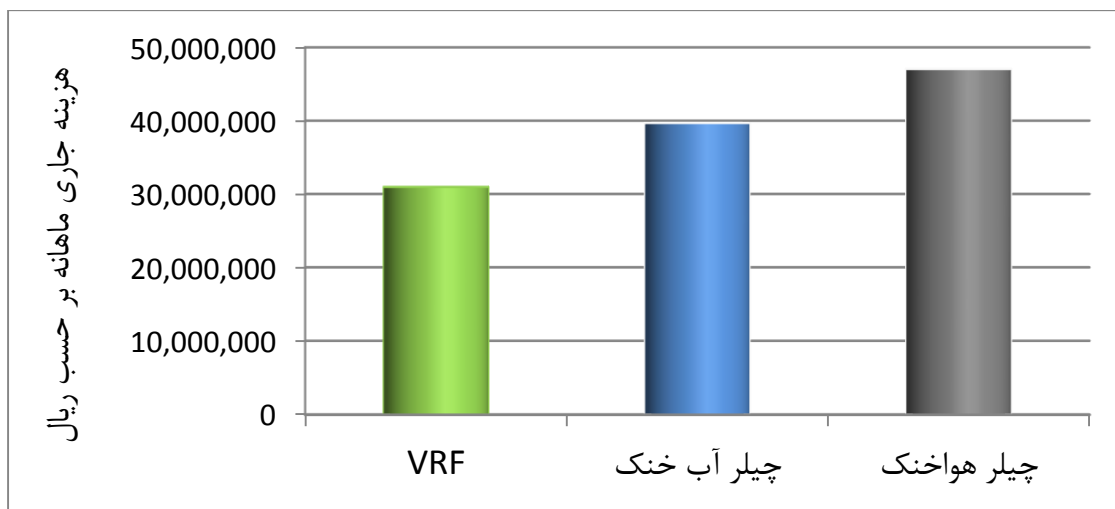
با توجه به مصوبات شرکت آب و فاضلاب، در مصارف غیرخانگی هزینه‌ای برای دفع فاضلاب و هزینه‌ای نیز به عنوان تبصره ۲ ماده واحده قانون ایجاد تسهیلات برای توسعه طرح‌های فاضلاب شبکه‌های آب شهری در نظر گرفته می‌شود (البته این در صورتی است که دفع فاضلاب از طریق شبکه فاضلاب شهری صورت بگیرد). برای هر شهری از سوی شرکت آب و فاضلاب کشور ضریبی جدا در نظر گرفته شده است که باید هزینه آب مصرفی را در آن ضرب کرد تا هزینه نهایی پرداختی حاصل شود. برای شهر تهران ضریبی معادل ۱/۴ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین هزینه نهایی آب مصرفی در یک ماه برابر ۲۲,۳۵۸,۵۸۴ ریال می‌باشد. بنابراین هزینه نهایی برق و آب مصرفی برای چیلر آب خنک برابر ۴۷,۰۳۰,۷۲۹ ریال خواهد بود.

محاسبه هزینه برق چیلر تراکمی هوا خنک

محاسبات زیر بر اساس چیلر تراکمی هوا خنک با ظرفیت ۸۳ تن تبرید انجام شده است^{۱۲}. برای انطباق کامل چیلر با ظرفیت مورد نیاز بین دو مدل ASWH-250 C3B با تبرید ۷۲/۲ و ASWH-320 C3B با تبرید ۹۰/۷ که به ترتیب دارای مصرف ۷۹/۴ و ۹۹/۳ می‌باشند، میان‌یابی شده است (در سیستم‌های VRF به دلیل انعطاف بالا این مشکل وجود ندارد اما در سیستم چیلر فن کویل این مشکلات وجود دارد چرا که انعطاف آن به اندازه سیستم‌های VRF نبوده و در بسیاری از پروژه‌ها برای پاسخگویی به نیاز سرمایه‌گذار/گرمایش پروژه به ناچار ظرفیت‌های بیش‌تری انتخاب می‌شود). با این تفاسیر مصرف دقیق چیلر هوا خنک برای ظرفیت مذکور برابر ۹۰/۲ کیلووات می‌شود. مشابه با شرایط مطرح شده در محاسبات قبلی هزینه نهایی برق مصرفی برای چیلر تراکمی هوا خنک به صورت ماهانه برابر ۳۹,۶۷۷,۹۲۹ ریال محاسبه می‌شود.

^{۱۲} برای اعتبار بخشیدن به محاسبات این دستگاه هم مشابه سیستم VRF و سیستم چیلر تراکمی هواخنک از برند پوش انتخاب شده است.

با توجه به مقادیر محاسبه شده و مقایسه آن‌ها (شکل ۸) می‌توان دید که سیستم VRF به طور محسوسی نسبت به سیستم‌های دیگر مورد بحث، برتری دارد. هزینه‌های سیستم چیلر تراکمی آب خنک حدود ۵۲٪ و سیستم چیلر تراکمی هوا خنک حدود ۲۸٪ بیش‌تر از VRF است.



شکل ۸. مقایسه هزینه جاری ماهانه در سیستم VRF و مقایسه آن با چیلر هواخنک و آب خنک

توجه: هزینه‌های سیستم VRF بدون در نظر گرفتن اینورتر و کارکرد دستگاه در بارهای جزئی و همچنین قابلیت‌های برنامه ریزی که می‌تواند بسیار در صرفه‌جویی انرژی مفید باشد، در نظر گرفته شده است. بدیهی است که در صورت لحاظ نمودن عوامل فوق، صرفه‌جویی در مصرف انرژی در سیستم VRF نسبت به چیلرهای تراکمی افزایش خواهد یافت.

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به بحرانی انرژی و مسایل زیست محیطی باید به دنبال روش‌هایی برای کاهش مصرف انرژی پیدا کرد. اهمیت ساختمان‌ها به عنوان مصرف کننده عمده انرژی در دنیا با سهم ۴۰ درصدی از انرژی کل مصرفی بر کسی پوشیده نیست. در این تحقیق به بررسی توجیه اقتصادی یکی از راه‌حل‌های جدید برای سرمایه‌گذاری/گرمایش در ساختمان‌ها که حدود ۶۰٪ سهم انرژی مصرفی در ساختمان‌ها را به خود اختصاص داده پرداخته شده است. مقایسه اقتصادی سیستم VRF با چیلرهای تراکمی آب خنک و هوا خنک با توجه به تعرفه‌های انرژی در ایران برای نمونه مطالعاتی واقع در تهران با زیربنای ۲۵۰۰ متر انجام شده و همانند مطالعات دیگر که به صورت تئوری و تجربی در زمینه‌های مختلف سیستم VRF انجام شده‌اند، برتری سیستم VRF نسبت به رقبای مرسوم خود از نظر فنی، بازدهی و توجیه اقتصادی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این تحقیق سیستم‌های VRF نسبت به رقبای خود، قابلیت کاهش هزینه‌های جاری تا ۵۲٪ نسبت به چیلر تراکمی آب خنک و ۲۸٪ نسبت به چیلر تراکمی هواخنک را دارد.

با توجه به مطالب گفته شده به نظر می‌رسد که استفاده از سیستم VRF در سرمایه‌گذاری به جای سیستم‌های مرسوم باعث بهره بردن از پتانسیل بهبود بالای این سیستم بوده و می‌تواند تاثیر زیادی در کاهش مصرف انرژی در مهم‌ترین مصرف کننده‌های انرژی داشته باشد. در کنار مزایای اقتصادی، وجود قابلیت‌های و امکانات فراوان و فراهم آوردن آسایش بیش‌تر باعث شده سیستم VRF را بتوان سیستم سرمایه‌گذاری برای نسل جدید نام نهاد و انتظار داشت که محبوبیت آن به طور روز افزون افزایش یابد.

- Agency, I. E. (2007). *Key world energy statistics*: International Energy Agency.
- Amarnath, A., & Blatt, M. (2008). Variable refrigerant flow: where, why, and how. *Engineered systems*, 25(2), 54-60.
- Aynur, T. N. (2010). Variable refrigerant flow systems: A review. *Energy and Buildings*, 42(7), 1106-1112.
- Barten, H. (2005). International Energy Agency.
- BSRIA. (2016). Global Air Conditioning Market Study cools in 2015. <https://www.bsria.co.uk/>.
- <http://architecture2030.org>, A. a. (2013). Architecture 2030, "Problem: The Building Sector.
- <http://boschhvac.com>. (2017).
- Inyang, H. I., & Frimpong, S. (2007). Utility of energy technology development in environmentally sustainable development: American Society of Civil Engineers.
- Kani-Sanchez, C., & Richman, R. (2017). Incorporating variable refrigerant flow (VRF) heat pump systems in whole building energy simulation—Detailed case study using measured data. *Journal of Building Engineering*, 12, 314-324.
- Kim, D., Cox, S. J., Cho, H., & Im, P. (2017). Evaluation of energy savings potential of variable refrigerant flow (VRF) from variable air volume (VAV) in the US climate locations. *Energy Reports*, 3, 85-93.
- Kwon, L., Lee, H., Hwang, Y., Radermacher, R., & Kim, B. (2014). Experimental investigation of multifunctional VRF system in heating and shoulder seasons. *Applied Thermal Engineering*, 66(1), 355-364.
- Lin, X., Lee, H., Hwang, Y., & Radermacher, R. (2015). A review of recent development in variable refrigerant flow systems. *Science and Technology for the Built Environment*, 21(7), 917-933.
- Park, J. (2013). *Comparative analysis of the VRF system and conventional HVAC systems, focused on life-cycle cost*. Georgia Institute of Technology.
- Recast, E. (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Official Journal of the European Union*, 18(06), 2010.
- Shi, S., Li, G., Chen, H., Liu, J., Hu, Y., Xing, L., & Hu, W. (2017). Refrigerant charge fault diagnosis in the VRF system using Bayesian artificial neural network combined with ReliefF filter. *Applied Thermal Engineering*, 112, 698-706.
- Sonntag, R. E., Borgnakke, C., Van Wylen, G. J., & Van Wyk, S. (2003). *Fundamentals of thermodynamics*: Wiley New York.
- Thornton, B., & Wagner, A. (2012). Variable refrigerant flow systems. *Pacific Northwest National Laboratory*, 1.
- www.karoandisheh.com. (2017).
- Yildiz, A., & Ersöz, M. A. (2015). Determination of the economical optimum insulation thickness for VRF (variable refrigerant flow) systems. *Energy*, 89, 835-844.