

# بررسی روشهای کاهش مصرف انرژی در یخچال - فریزرهای خانگی

علی حیدری منفرد<sup>\*</sup>، سعید هاتفی پور<sup>\*\*</sup> و عباسعلی آهانگر<sup>\*\*\*</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۱۳۷۵/۲/۳۰ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۷۵/۱۱/۲۸)

چکیده - در ربع قرن گذشته فعالیتهای پژوهشی قابل توجهی در رابطه با کاهش مصرف انرژی در سیستمهای برودتی و بالاخص در خصوص طراحی و ساخت مناسب یخچال - فریزرهای خانگی انجام شده است. اهمیت موضوع به دلیل استفاده از مبرد فرئون R-12 در یخچال - فریزرها و نقش آن در آلاینش محیط زیست از جمله تخریب لایه ازن و همچنین گرمایش زمین و به علاوه مصرف زیاد انرژی توسط این وسایل بوده است. طرح قوانین بین المللی در ارتباط با جایگزینی مبردهای آلاینده لایه ازن، مانند پروتکل مونترال، و همچنین آیین نامه اجرایی هیئت محترم دولت جمهوری اسلامی در خصوص اجرای طرح کاهش مصرف انرژی وسایل انرژی بر از جمله مواردی بوده که باعث انجام تحقیقات جامعی در رابطه با طراحی بهینه یخچال - فریزرهای خانگی شده است. در این مقاله به اقدامات پژوهشی انجام یافته در ارتباط با مدلسازی تحلیلی و آزمونهای تجربی انجام یافته برای تعیین روشهای طراحی یخچال - فریزرهای خانگی کم مصرف در ایران می پردازیم. با استفاده از مدل عددی ایجاد شده، نتایج حاصل از انجام تحلیل پارامتریک اجزای تشکیل دهنده یک یخچال - فریزر نمونه تولیدات داخلی در کاهش میزان مصرف برق و افزایش بازدهی ارائه شده است. همچنین تاثیر جایگزینی مبرد R-12 با مبرد جایگزین R-134a روی مصرف برق و عملکرد یخچال - فریزر انتخاب شده مورد بررسی قرار گرفته است.

## Study on Reduction of Energy Consumption of Household

### Refrigerator-Freezers in IRAN

A. Heydari , S. Hatefi-Pour and A.A. Ahangar

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology

**ABSTRACT-** *In the last quarter of the century, a substantial amount of research work has been conducted on optimization of energy consumption by refrigeration systems and on proper design and construction of*

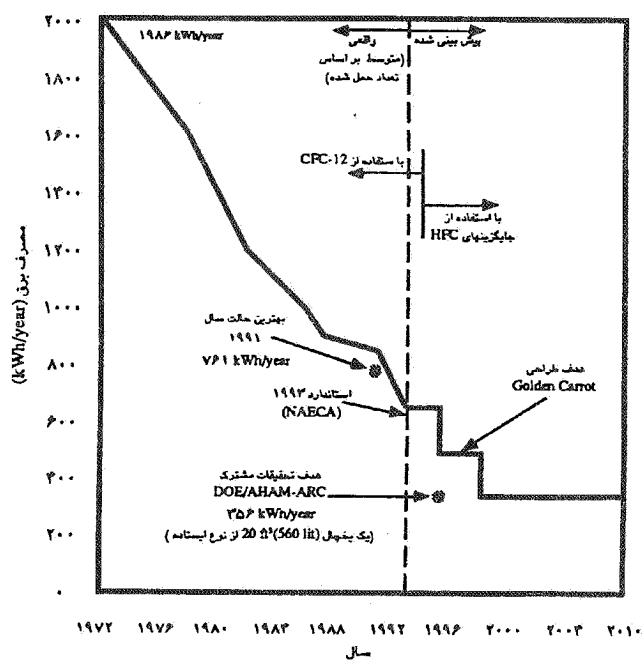
\* استادیار      \*\* دانشجوی کارشناسی ارشد      \*\*\* دانشجوی کارشناسی ارشد

household refrigerator-freezers. The importance of such energy optimization schemes stems from the environmental impacts of Freon (R-12) used as the working refrigerant in household refrigerator - freezers as well as the enormous energy consumed by such appliances. International regulations for the replacement of Ozone-depleting refrigerants, such as the Montreal Protocol, as well as the Iranian regulations regarding reduced energy consumption of energy consuming products have motivated research on the optimum design of household refrigerator-freezers. In this paper, research works aimed at analytical modelling and also the experimental works conducted to determine design methods of energy efficient refrigerator-freezers in Iran will be presented. Using the numerical method developed for this purpose, a parametric analysis of the components of a refrigerator-freezer manufactured in Iran will be presented and the reduced energy consumption by the selected appliance and its increased efficiency will be discussed. The influence of replacing R-12 with its substitute refrigerant (R-134a) on the energy consumption and efficiency of the typical refrigerator is also presented.

۱- مقدمه

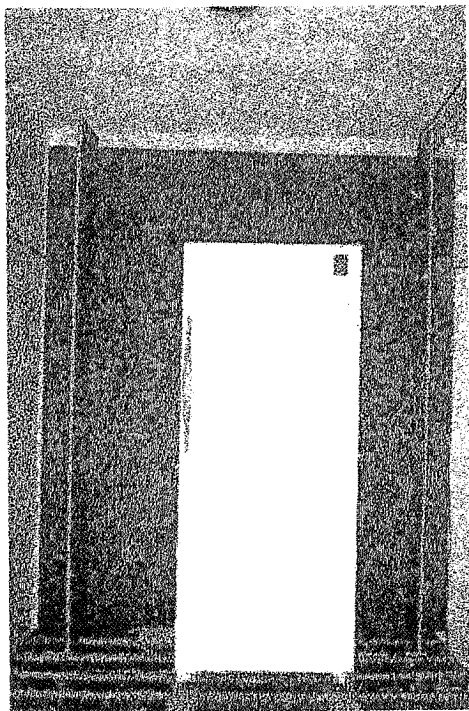
کاهش میزان مصرف انرژی در یخچال-فریزرهای خانگی از اوایل دهه ۷۰ میلادی در کشورهای صنعتی شروع شده است. براساس گزارشهای موجود [۱] میزان مصرف انرژی برای یک یخچال فریزر مبنا (۱۸ft<sup>3</sup>) از ۲۰۰۰ kWh/year در سال ۱۹۷۲ به حدود ۵۰۰ kWh/year در سال ۱۹۹۵ و حدود ۳۵۰ kWh/year در سال ۱۹۹۸ خواهد رسید. شکل (۱) روند کاهش مصرف انرژی را برای یک یخچال-فریزر خانگی در کشورهای صنعتی نشان می‌دهد.

تعداد یخچال-فریزرهای موجود در کشور در سال ۱۳۷۵ در حدود ۱۹ میلیون بوده [۲] و هر یخچال به طور متوسط در سال ۵۷۱ kWh/year مصرف انرژی [۳] دارد. از طرفی با توجه به اینکه در کشور ما کاهش میزان مصرف انرژی یخچال-فریزر به صورت قانون در آمده است [۴]، در این مقاله سعی شده تا به ارائه روشهایی برای کاهش مصرف انرژی در یخچال-فریزرهای خانگی پرداخته شود. با توجه به هزینه‌های هنگفت تولید برق باید روشهایی را جستجو کرد که بتوان میزان مصرف برق این وسیله را صرف خانگی را کاهش داد. از طرفی با توجه به اهمیت حفاظت از لایه ازن و اثر تخریبی مبردهای CFC روی لایه ازن و همچنین با توجه به اینکه کشور ما از جمله امضا کنندگان پروتکل مونترال است، بررسی اثر جایگزینی مبرد R-134a به جای مبرد فرئون R-12 بر روی مصرف انرژی یخچال فریزرها حائز اهمیت است. برای نیل به اهداف فوق، تحقیقات به صورت تجربی - تحلیلی برای یک یخچال ۱۲ft<sup>3</sup> تولید داخل کشور که به عنوان مدل نمونه انتخاب شده انجام پذیرفت. نتایج حاصل از مدل عددی با داده‌های حاصل از آزمون استاندارد یخچال در حالت مبنا مقایسه و منطبق شد، سپس تأثیر اجرای طرحهای مختلف و همچنین استفاده از مبرد جایگزین مورد ارزیابی قرار گرفت. به دنبال، هر یک از این قسمتها به تفصیل آمده است.



شکل ۱- تاریخچه مصرف انرژی برای یخچال-فریزر خانگی [۱]

## ۲- بخش تجربی



شکل ۲- سکوی آزمون استاندارد مصرف انرژی یخچال - فریزر

ترموکوپلها به داخل استوانه‌هایی از جنس مس به قطر  $1/5\text{cm}$  و به طول  $1/5\text{cm}$ ، به گونه ای که در استاندارد (ISO-8187) آمده اندازه گیری شد. استفاده از استوانه‌های مسی برای به حداقل رساندن تغییرات گذرای دما در شرایط اندازه گیری دمای هواست. در اتاق نیز ترموکوپلهایی به ترتیب زیر نصب شدند تا از رسیدن به حالت پایدار دمایی اطمینان حاصل شود

۱- یک ترموکوپل در وسط هر ضلع.

۲- دو ترموکوپل در فواصل  $1/5\text{m}$  و  $0/75\text{m}$  از زمین و  $0/8\text{m}$  و  $1\text{m}$  از دیواره‌ها.

۳- چهار ترموکوپل در محور عمودی به فواصل  $1/5\text{m}$  و  $0/75\text{m}$  و  $0/5\text{m}$  و  $0/5\text{m}$  از زمین و یک ترموکوپل به فاصله  $5\text{cm}$  از سقف.

### ۲-۲- سیستم داده برداری

سیمهای ترموکوپل توسط سیمهای رابط مسی به سیستم داده برداری متصل شدند. سیستم داده برداری شامل یک دستگاه تعدد انتخاب (مالتی پلکسر) و آمپلی فایر به همراه کارت تبدیل آنالوگ به دیجیتال است که در داخل یک کامپیوتر PC-486 نصب شده است.

کلیه آزمایشها در آزمایشگاه تحقیقاتی سیستمهای حرارتی و برودتی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف انجام شد. این آزمایشگاه مجهز به اتاق و سکوی آزمون براساس استاندارد (ISO-8187) و سیستم داده برداری و دیگر امکانات آزمایشگاهی است. شکل (۲) اتاق آزمون استاندارد به همراه سکوی آزمون را نشان می‌دهد. اتاق آزمون برای ایجاد و کنترل شرایط محیطی آزمون یخچال-فریزر، از جمله دمای محیط، رطوبت نسبی و نحوه و میزان گردش هوا ساخته شد. به لحاظ اینکه در زمان انجام آزمون استاندارد یخچال-فریزر باید حداقل گردش هوا در اطراف بدنه، کندانسور و کمپرسور یخچال وجود داشته باشد، اتاق به صورت تو در تو ساخته شد، به گونه ای که اتاقکی از جنس نئوپان و به ابعاد  $2/6\text{m} \times 3/2\text{m} \times 4\text{m}$  در داخل اتاق بزرگتری که دارای دیواره از نوع اکوستیک و دارای ابعاد  $3\text{m} \times 3/5\text{m} \times 4/3\text{m}$  است قرار داده شده است. سیستم گرمایش و سرمایش که کنترل کننده دمای داخل اتاقک آزمون است به گونه ای قرار گرفته که هوای گرم یا سرد ایجاد شده در محفظه خالی بین دو اتاق جریان داشته، و لذا انتقال گرما از طریق هدایت و جابه‌جایی آزاد به داخل اتاقک آزمون منتقل می‌شود. همچنین به کمک چهار عدد فن واقع در سقف اتاقک آزمون که به دیمری که در خارج اتاق نصب شده متصل است، در صورت لزوم می‌توان هوای گرم و یا سرد جاری بین اتاق خارجی و اتاقک آزمون داخلی را جابه‌جا کرد. دستگاه تولید رطوبت به گونه ای نصب شده که رطوبت نسبی مورد نیاز را برای ایجاد شرایط محیطی مختلف در داخل اتاقک ایجاد کند.

### ۲-۱ اندازه گیری دما

اندازه گیری دما، شامل دمای مبرد در سیکل تبرید یخچال-فریزر، دمای داخل کابینت، دمای هوای مجاور و همچنین دمای محیط آزمون توسط ترموکوپلهایی از نوع T (مس) - کنستانتین انجام شد. ترموکوپلهای اندازه گیری دمای سطح با استفاده از چسب آلومینومی به محلهایی که دمای سطح اندازه گیری می‌شوند (پوسته کمپرسور، کندانسور، اوپراتور، لوله‌های کپی و مکش، بدنه یخچال ...) چسبانده می‌شوند. دمای هوا نیز با اتصال

جدول ۱- مقایسه نتایج آزمون استاندارد و مدل عددی بر روی یخچال نمونه (مبرد R-12)

دمای محیط ۳۲°C و رطوبت نسبی ۷۵٪			دمای محیط ۲۵°C و رطوبت نسبی ۴۵٪		
نتایج تحلیلی	نتایج تجربی		نتایج تحلیلی	نتایج تجربی	
۵°C	۵°C	دمای داخل یخچال	۵°C	۵°C	دمای داخل یخچال
۵۵/۹°C	۵۰/۰°C	دمای کندانسور	۴۸/۱°C	۴۲/۶°C	دمای کندانسور
-۲۱/۷°C	-۲۰/۲°C	دمای اوپراتور	-۲۳/۱°C	-۱۹/۲°C	دمای اوپراتور
۲/۱۲kWh/dau	۲/۱۳kWh/day	مصرف برق	۰/۹۵kWh/day	۰/۹۷kWh/day	مصرف برق

شرایط عملی استفاده از این وسیله است. کلیه آزمایشها در شرایط آزمون استاندارد ملی که شرایط آزمون استاندارد (ISO-8187) است انجام شدند. برای شبیه سازی شرایط مختلط سوق الجیشی در ایران کلیه آزمونها در شرایط استاندارد دمای ۲۵°C و رطوبت نسبی ۴۵٪ و همچنین دمای ۳۲°C و رطوبت نسبی ۷۵٪ انجام شدند. در اولین مرحله ایجاد مدل مینا، نشت گرما از کابینت به صورت تجربی تعیین شد. برای این منظور با ایجاد منبع گرمایی در داخل یخچال خاموش، دمای داخل آن را ثابت نگه داشتیم. دمای خارج یخچال نیز ثابت بود. به کمک واتمتر مصرف انرژی الکتریکی منبع گرمایی که تقریباً تمام آن به گرما تبدیل شده بود اندازه گیری شد. با تقسیم مقدار توان مصرفی توسط لامپ بر اختلاف دمای ایجاد شده، مقاومت گرمایی کابینت تعیین شد. در قسمت دوم ایجاد مدل مینا با نصب ترموکوپل در نقاط مختلف سیکل، دما در آن نقاط اندازه گیری شد. همچنین میزان مصرف برق یخچال در شرایط آزمون استاندارد اندازه گیری شد. جدول (۱) نتایج حاصل از انجام آزمایشها بر روی یخچال - فریزر نمونه را در شرایط محیطی ذکر شده نشان می دهد.

### ۳- بخش تحلیلی

شبیه سازی عددی یخچال-فریزر با استفاده از یک کد کامپیوتری که قبلاً برای انجام این کار تهیه شده است انجام شد [۵]. این برنامه که قابلیت مدلسازی عددی انواع یخچال-فریزرهای خانگی را دارد برای بررسی تاثیرات استفاده از مبردهای مختلف، تاثیر شرایط مختلف محیطی و همچنین بررسی تاثیر باز و بسته کردن درب یخچال-فریزر مناسب است. برای اجرای برنامه دو دسته ورودی مورد نیاز است:

سیمهای ترموکوپل از نوع T از طریق سیمهای ارتباطی مسی به سیستم انتخاب و افزایش دهنده داده ها وارد شده، سپس از طریق یک کابل مخصوص ۲۵ سوزنه به برد آنالوگ به دیجیتال که بر روی یکی از نشیمنگاههای داخل کامپیوتر قرار گرفته متصل می شود. عملیات تبدیل سیگنال به گونه قابل نمایش از طریق یک نرم افزار داده برداری که بر روی کامپیوتر PC-486 نصب شده انجام می شود (۳).

### ۲-۳- اندازه گیری مصرف برق

میزان برق مصرف شده توسط یخچال به صورت وات و همچنین کیلو وات ساعت، با استفاده از یک واتمتر و یک کنتور اندازه گیری شد. برق شهر ابتدا به کانالهای ورودی واتمتر و کنتور وارد شده و توسط سیمهای ارتباطی از طریق ترمینال خروجی به یخچال در حال آزمون متصل شدند. به این صورت برای هر یک از آزمونهای انجام شده برق مصرفی به صورت وات، ولت، آمپر و کیلو وات ساعت ثبت شدند.

### ۲-۴- سکوی تست استاندارد براساس استاندارد

(ISO-8187)

کلیه آزمونهای یخچال-فریزر باید در حالی که یخچال بر روی یک سکوی آزمون قرار گرفته انجام شود. سکوی آزمون و یخچال-فریزر در داخل اتاقک آزمون که رطوبت و دمای داخل آن ثابت نگه داشته می شوند قرار دارند. سکوی آزمون از چوب نئوپان به گونه ای که در شکل (۲) نشان داده شده ساخته شده است. هدف از انجام آزمونها بر روی سکوی آزمون، شبیه سازی شرایط پایای یخچال-فریزر در منازل مسکونی به همراه گردش هوایی مناسب با

ورود گرما به داخل کابینت است. نرخ انتقال گرما از محیط اطراف و از طریق واشر به داخل کابینت یخچال-فریزر به صورت ورودی به برنامه داده می شود.

#### ۳-۲- ورودیهای مربوط به سیکل

۳-۲-۱- سیکل تبرید: نرم افزار مدلسازی قادر است انواع سیکلهای تبرید اعم از سیکل استاندارد با یک کمپرسور و یک اواپراتور، سیکل لورنتز، سیکل با دو حلقه تبرید و سیکل با دو اواپراتور را مورد ارزیابی قرار دهد.

در خصوص یخچال بررسی شده، از سیکل استاندارد به همراه یک کمپرسور و یک اواپراتور استفاده می شود.

۳-۲-۲- نوع مبرد: این برنامه قادر به مدلسازی استفاده از ۳۸ نوع مبرد خالص و همچنین مخلوط مبردها در سیکل تبرید یخچال-فریزر است. مبرد یخچال بررسی شده گاز فرئون R-12 است.

۳-۲-۳- نوع اواپراتور: اطلاعات دقیق اواپراتور از قبیل نوع و ابعاد فیزیکی مورد نیاز نرم افزار است. یخچال نمونه بررسی شده دارای اواپراتور رول باند از نوع جابه جایی آزاد است.

۳-۲-۴- نوع کندانسور: اطلاعات کندانسور از قبیل نوع و ابعاد نیز برای مدلسازی مورد نیاز است. این یخچال از کندانسور نوع لوله و مفتول که از طریق جابه جایی آزاد با محیط انتقال گرما دارد استفاده می کند.

۳-۲-۵- نوع کمپرسور: مدلسازی کمپرسور از سه طریق:

(۱) استفاده از منحنی عملکرد

(۲) استفاده از روش بازدهی گرمایی و ظرفیت تبرید، و

(۳) استفاده از روش بازده گرمایی انجام پذیر است.

مدلسازی یخچال نمونه با استفاده از منحنی عملکرد انجام پذیرفت. جدول (۲) داده های مربوط به منحنی عملکرد کمپرسور استفاده کننده از مبرد R-12 و همچنین کمپرسور نوع R-134a را که توسط تولید کننده این نوع کمپرسورها تهیه شده است را نشان می دهد. اطلاعات داده شده در جدول زیر شامل میزان مصرف برق (برحسب وات) و حجم تبرید (برحسب Kcal/hr) در ماتریسی از



شکل ۳- اتاق آزمون استاندارد به همراه سیستم داده پردازی

#### ۳-۱- ورودیهای مربوط به کابینت

در ابتدای اجرای برنامه، داده های مربوط به ابعاد، اندازه ها، جنس و ... بدنه را باید به قرار زیر وارد کرد:

۳-۱-۱- نوع کابینت و ابعاد: این نرم افزار قادر به مدلسازی انواع یخچال-فریزرهای ایستاده، فریزر پایین، پهلو به پهلو، فریزر صندوقی، فریزرهای ایستاده و یخچال تک درب است. یخچال نمونه مورد بررسی از نوع تک درب با دیفراسست دستی است. اطلاعات کابینت شامل ابعاد، نوع و ضخامت عایقها ... در این مرحله وارد برنامه می شود.

۳-۱-۲- دماها: اختلاف دمای موجود بین کابینت و هوای اطراف باعث نشست گرما از محیط به داخل یخچال می شود. دمای داخل کابینت، محیط اطراف و هوای اطراف کمپرسور برای تعیین میزان نفوذ گرما به داخل کابینت به صورت ورودی به برنامه داده می شود.

۳-۱-۳- تلاف گرما از واشر دور درب: واشر دور درب یکی از منافذ

جدول ۲- عملکرد کالریمتریک کمپرسورهای نوع R-12 و R-134a

R-134a				R-12					
$T_{\text{evap}}$	$T_{\text{cond}}$	$T_{\text{evap}}$	$T_{\text{cond}}$	$T_{\text{evap}}$	$T_{\text{cond}}$	$T_{\text{evap}}$	$T_{\text{cond}}$	$T_{\text{evap}}$	$T_{\text{cond}}$
$-34/4^{\circ}\text{C}$	$-23/3^{\circ}\text{C}$	$-12/4^{\circ}\text{C}$		$-30^{\circ}\text{C}$	$-25^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}$	$-15^{\circ}\text{C}$	$-10^{\circ}\text{C}$	
۶۴*	۱۲۳	۲۲۵	$43/5^{\circ}\text{C}$	۹۸	۱۲۶	۱۵۷	۱۹۱	۲۲۹	$35^{\circ}\text{C}$
(۱۰۲)**	(۱۲۸)	(۱۶۵)		(۱۰۷)	(۱۱۸)	(۱۳۱)	(۱۴۴)	(۱۵۹)	
۵۹	۱۱۷	۲۱۹	$48/9^{\circ}\text{C}$	۸۹	۱۱۵	۱۴۶	۱۸۱	۲۱۹	$45^{\circ}\text{C}$
(۱۰۱)	(۱۳۰)	(۱۶۸)		(۱۱۱)	(۱۲۴)	(۱۳۹)	(۱۵۵)	(۱۷۲)	
۵۵	۱۱۳	۲۰۹	$54/4^{\circ}\text{C}$	۷۹	۱۰۶	۱۳۷	۱۷۱	۲۱۱	$55^{\circ}\text{C}$
(۱۰۰)	(۱۳۲)	(۱۷۱)		(۱۰۹)	(۱۲۵)	(۱۴۲)	(۱۶۰)	(۱۷۹)	

\* توان مصرفی (وات)

\*\* حجم برودتی (کیلو کالری/ساعت)

انتخابهای طراحی شامل تغییراتی هستند که از طریق کاهش انتقال گرما به کابینت، کاهش مقدار مصرف برق یا بهبود بخشیدن به سیستم تبرید باعث افزایش بازدهی سیستم یخچال-فریزر می‌شوند. در زیر شرح مختصری از چند انتخاب طراحی و تاثیر اجرای آن در مصرف برق آمده است:

### ۳-۱- افزایش ضخامت عایق

از آنجایی که بیشترین اتلاف گرمایی کابینت از طریق بدنه و درب آن است، افزایش ضخامت عایق بدنه و درب یک طرح انتخابی مناسب برای کاهش مصرف برق است. تاثیر افزایش ضخامت عایق بدنه و درب یخچال نمونه از مقادیر:  $4/\text{vcm}$  عایق سقف،  $4/6\text{cm}$  عایق دیواره،  $5\text{cm}$  عایق پشت،  $3/\text{vcm}$  عایق کف و  $3/8\text{cm}$  عایق درب در کلیه وجوه به ترتیب به میزان  $2\text{cm}$ ،  $4\text{cm}$  و  $6\text{cm}$  در شکل (۴) نمایش داده شده است. افزایش  $6\text{cm}$  عایق فوم بدنه و درب یخچال نمونه باعث  $43\%$  کاهش مصرف برق برای یخچال با مبرد R-12 و یا R-134a در دمای محیط  $25^{\circ}\text{C}$  و  $32^{\circ}\text{C}$  نسبت به حالت مبنا می‌شود.

### ۳-۲- استفاده از کمپرسورهای با بازده بالا

در طی دهه گذشته بازده کمپرسورهای تولیدی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. عملکرد یک کمپرسور از طریق ضریب نسبت بازده انرژی مشخص می‌شود. شکل (۵) تاثیر استفاده از

دمای اواپراتور و کندانسور و در شرایط آزمون استاندارد کمپرسور یخچالهای خانگی برای مبرد R-12 و R-134a داده شده است. لازم به ذکر است که تغییر مبرد از R-12 به R-134a به دلیل ناچیز بودن تاثیر ضریب انتقال گرمای جابجایی اجباری این دو سیال در مبدلهای گرمایی، صرفاً در عملکرد کمپرسور نمایان می‌شود.

شبیه سازی یخچال مورد بررسی ابتدا با مدل سازی کابینت و سپس سیکل تبرید انجام می‌شود. اجرای نرم افزار مدل سازی پس از وارد کردن داده‌های مورد نیاز انجام شد. جدول (۳) داده‌های ورودی مورد نیاز برای مدل سازی کابینت و سیکل تبرید یخچال نمونه را نشان می‌دهد.

جدول (۱) مقایسه نتایج حاصل از اجرای برنامه مدل سازی را با داده‌های تجربی در شرایط محیطی دمای  $25^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی  $45\%$  و همچنین دمای  $32^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی  $75\%$  نشان می‌دهد. مقایسه نتایج به دست آمده از انجام آزمونهای تجربی با نتایج حاصل از اجرای نرم افزار مدل سازی خطایی کمتر از  $3\%$  را در مصرف برق نشان می‌دهد.

### ۳-۳- طرحهای انتخابی

پس از حصول اطمینان از دقت مدل عددی در شبیه سازی مدل مبنا، به اعمال بعضی انتخابهای طراحی روی مدل مبنا می‌پردازیم.

جدول ۳- اطلاعات ورودی کابینت و سیکل تبرید یخچال نمونه برای مدلسازی

اطلاعات کابینت	اطلاعات سیکل
ارتفاع کابینت: ۱۵۰ cm	نوع مبرد: R-12
عرض کابینت: ۶۲/۵۰ cm	نوع اواپراتور: رول باند
عمق کابینت: ۶۳/۵۰ cm	سطح اواپراتور: $۰/۷۰ m^2$
عرض و اشتر دور درب: ۱/۹۰ cm	طول لوله اواپراتور: ۳/۰۰ m
ضخامت لبه درب: ۳/۹۰ cm	قطر خارجی لوله اواپراتور: ۵/۰۰ mm
ضخامت ورق بیرونی: ۰/۷۰ cm	ضخامت صفحه اواپراتور: ۰/۷۱ mm
ضریب هدایتی ورق بیرونی: ۴۱ W/m-C	نوع کندانسور: لوله و مفتول
ضخامت ورق داخلی: ۰/۷۰ mm	سطح کندانسور: $۰/۸۰ m^2$
ضریب هدایتی ورق داخلی: ۴۱ W/m-C	طول لوله کندانسور: ۱۲/۲۲ m
حجم داخلی یخچال: ۳۴۲ lit	عرض ردیف لوله‌ها: ۵۶/۰۰ cm
ضخامت عایق سقف: ۴/۷۰ cm	قطر خارجی لوله کندانسور: ۶/۳۰ mm
ضخامت عایق جانبی: ۴/۶۰ cm	ضخامت لوله کندانسور: ۰/۷۰ mm
ضخامت عایق پشت: ۵/۰۰ cm	تعداد مفتولها: ۱۰۲ عدد
ضخامت عایق کف: ۳/۷۰ cm	قطر مفتولها: ۱/۵۰ mm
ضخامت عایق درب: ۳/۸۰ cm	طول مفتولها: ۷۸/۵۰ cm
مقاومت گرمایی عایق کابینت: $۰/۵۳۳ m^2-C/W-cm$	نوع کمپرسور: رفت و برگشتی
مقاومت گرمایی عایق درب: $۰/۴۰۰ m^2-C/W-cm$	مدلسازی کمپرسور: منحنی عملکرد - جدول (۲)
نشت گرمایی و اشتر دور درب: ۶/۵۰ W/m-100C	ضریب تأثیر لوله موئین: ۰/۰۱

افزایش سطح گرمایی اواپراتور تا ۶/۹٪ مصرف برق یخچال با مبرد R-12 و یا R-134a را نسبت به حالت مبنا کاهش می‌دهد.

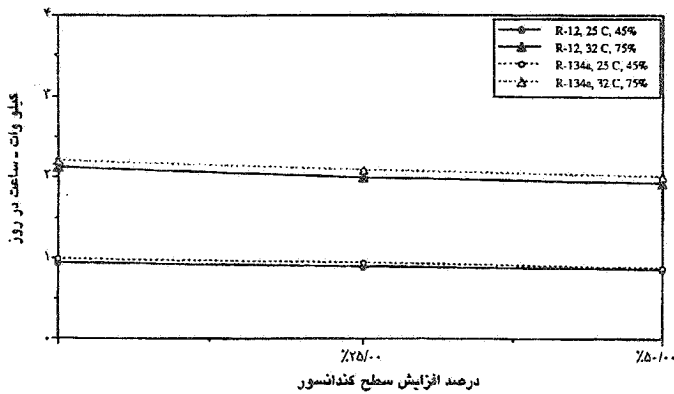
### ۳-۳-۴- افزایش سطح گرمایی کندانسور

افزایش سطح انتقال گرما، عملکرد مبدل‌های گرمایی را بهبود بخشیده و باعث افزایش بازده کلی سیستم تبرید می‌شود. افزایش سطح کندانسور باعث افزایش میزان انتقال گرما به محیط می‌شود. شکل (۷) تأثیر افزایش سطح گرمایی کندانسور را روی مصرف انرژی نشان می‌دهد. در این حالت ۵۰٪ افزایش سطح کندانسور تا ۱۲٪ مصرف برق یخچال با مبرد R-12 و یا R-134a را نسبت به حالت مبنا کاهش می‌دهد.

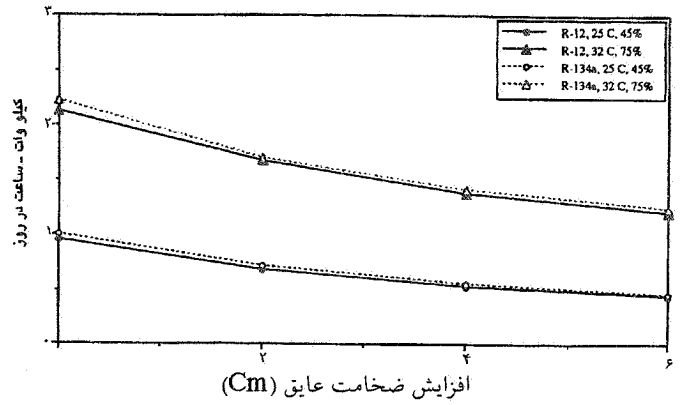
کمپرسورهای با بازده بالاتر در عملکرد سیستم و کاهش مصرف انرژی آن را نشان می‌دهد. ضریب بازده انرژی کمپرسور استفاده شده برابر ۳ است. افزایش EER از ۳ به ۵ باعث ۴۰٪ کاهش مصرف برق برای یخچال با مبرد R-12 و یا R-134a نسبت به حالت مبنا می‌شود.

### ۳-۳-۳- افزایش سطح گرمایی اواپراتور

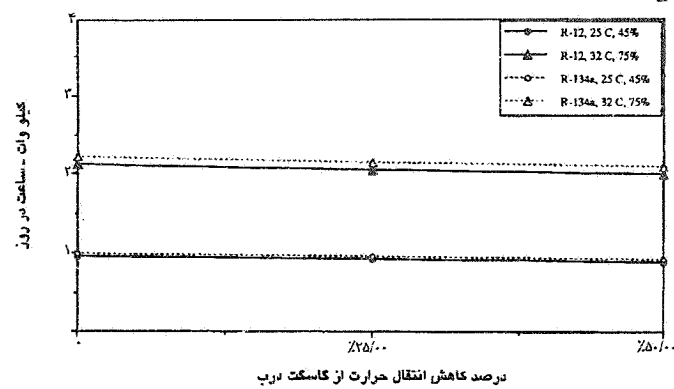
تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که افزایش سطح اواپراتور باعث افزایش بازده گرمایی سیکل تبرید یخچال-فریزر خانگی می‌شود. این افزایش سطح تا حد معینی باعث افزایش بازدهی گرمایی سیکل تبرید می‌شود. شکل (۶) تأثیر افزایش سطح گرمایی اواپراتور را روی مصرف انرژی یخچال نمونه نمایش می‌دهد. ۵۰٪



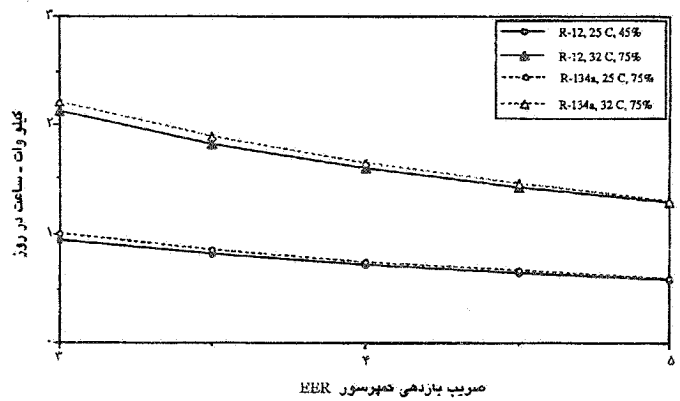
شکل ۷- تاثیر افزایش سطح گرمایی کندانسور روی مصرف برق یخچال نمونه



شکل ۴- تاثیر افزایش ضخامت عایق بدنه و درب روی مصرف انرژی یخچال نمونه

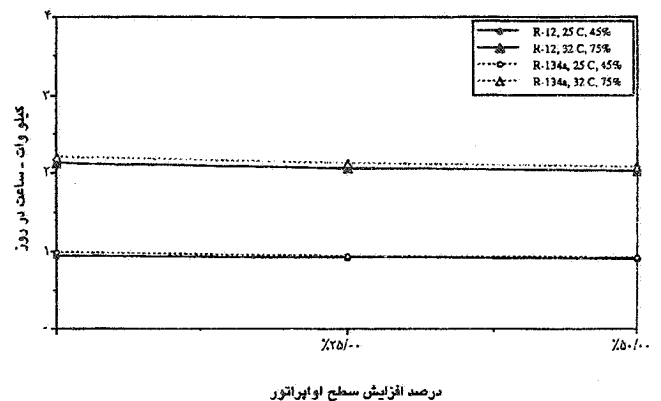


شکل ۸- تاثیر کاهش انتقال گرما از واشر دور درب روی مصرف برق یخچال نمونه



شکل ۵- تاثیر استفاده از کمپرسورهای با بازده بالاتر روی مصرف برق یخچال نمونه

می شود. عایق بندی بهتر یخچال-فریزر با بهبود کیفیت واشر به کار برده شده باعث افزایش بازدهی و کاهش مصرف برق می شود. شکل (۸) تاثیر ۲۵٪ و ۵۰٪ کاهش انتقال گرما از دور درب با استفاده از واشرهای دارای قابلیت آب بندی بهتر را نشان می دهد. بر اساس محاسبات انجام شده کاهش ۵۰٪ انتقال گرما از طریق گاسگت، تا ۸٪ کاهش مصرف برق یخچال با مبرد R-12 و یا R-134a را نسبت به حالت مبنا به همراه دارد.



شکل ۶- تاثیر افزایش سطح گرمایی اواپراتور روی مصرف برق یخچال نمونه

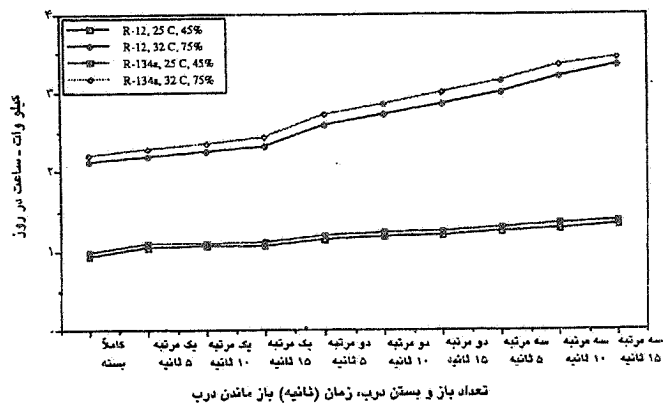
### ۳-۳-۶- تاثیر باز و بسته کردن درب

تاثیر تعداد دفعات باز و بسته کردن به همراه مدت زمان باز و بسته بودن با استفاده از نرم افزار مدل سازی امکان پذیر است. نحوه مدل سازی عددی عملکرد یخچال-فریزر به همراه شرایط باز و بسته کردن درب در مرجع [۶] توضیح داده شده است. همان گونه که در

### ۳-۳-۵- تاثیر کاهش انتقال گرما از واشر دور درب

بخشی از گرمای انتقال یافته به داخل یخچال-فریزر از طریق لبه دور درب و واشر (گاسگت) نصب شده بر روی لبه دور درب انجام



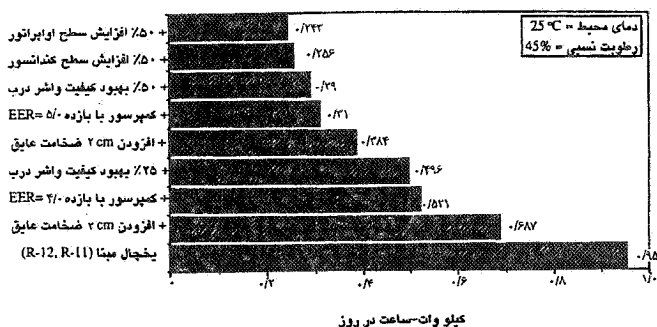


شکل ۹- تاثیر تعداد دفعات باز و بسته کردن درب روی مصرف انرژی یخچال نمونه

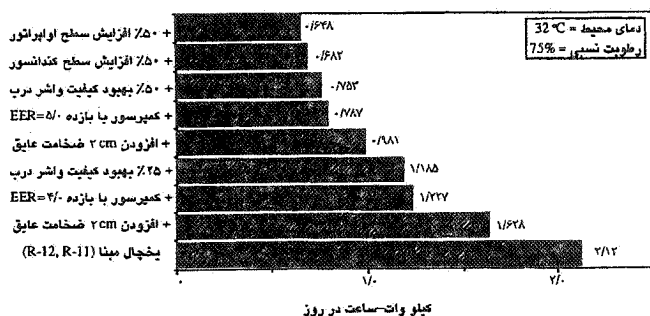
ابتدا ذکر شد، آزمون استاندارد مصرف انرژی در شرایط درب بسته انجام می‌پذیرد. لیکن در عمل، استفاده از یخچالها به همراه باز و بسته شدن درب و در هر زمان همراه با باز نگه داشتن آن برای مدت زمان مشخصی است. شکل (۹) افزایش مصرف برق به دلیل باز و بسته شدن درب در شرایط محیطی دما و رطوبت نسبی  $25^{\circ}\text{C}$  و  $45\%$  و همچنین  $32^{\circ}\text{C}$  و  $75\%$  را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود، باز و بسته کردن درب، بالاخص در دما و رطوبت بالا تاثیر قابل توجهی را در مصرف برق یخچال-فریزر نمونه دارد.

### ۴-۳- اجرای طرحهای انتخابی

نتایج حاصل از اجرای همزمان طرحهای انتخابی در مصرف انرژی در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. این شکلها نتایج حاصل از اجرای ۸ طرح شامل افزایش ضخامت عایق فوم، استفاده از کمپرسور با بازدهی بالاتر، بهبود کیفیت واشر دور درب، افزایش سطح کندانسور و اوپراتور را در دو شرایط محیطی  $25^{\circ}\text{C}$  و  $45\%$  و همچنین  $32^{\circ}\text{C}$  و  $75\%$  را برای یخچال استفاده کننده از مبرد R-12 نشان می‌دهد. همان گونه که در شکلها مشاهده می‌شود تا  $75\%$  کاهش مصرف برق نسبت به حالت مینا امکانپذیر است. این میزان صرفه جویی در مصرف برق یخچال-فریزرهای خانگی در ایران با توجه به اینکه طراحی و تکنولوژی تولیدات داخلی متناسب با دهه ۷۰ میلادی است و شکل (۱) که میزان کاهش



شکل ۱۰- تاثیر اجرای طرحهای انتخابی روی مصرف برق یخچال نمونه (دمای محیط  $25^{\circ}\text{C}$ ، رطوبت نسبی  $45\%$ )



شکل ۱۱- تاثیر اجرای طرحهای انتخابی روی مصرف برق یخچال نمونه (دمای محیط  $32^{\circ}\text{C}$ ، رطوبت نسبی  $75\%$ )

مصرف انرژی از دهه ۷۰ میلادی تاکنون را تا  $80\%$  نشان می‌دهد، توجیه شده است.

### ۴- نتیجه گیری

نتایج تجربی حاصل از انجام آزمایشها در شرایط استاندارد برای یک یخچال-فریزر خانگی ایرانی ارائه شد. تأثیر انجام تغییرات طراحی به صورت نظری توسط یک نرم افزار کامپیوتری انجام شده است. مقایسه نتایج حاصل از انجام آزمایشها، شامل مقادیر دما و میزان مصرف برق با نتایج حاصل از اجرای نرم افزار، دقت این برنامه در شبیه سازی عددی یخچال-فریزر انتخاب شده را نشان می‌دهد. با توجه به دقت بالایی که از مقایسه مدل مینا با مدل عددی حاصل شده، می‌توان چنین نتیجه گیری کرد که اعمال انتخابهای طراحی روی مدل عددی نیز دارای تاثیر مشابه است. تاثیر اجرای چند انتخاب طراحی بر حالت مینا در این مقاله آورده شده است. با توجه به اینکه توان مورد نیاز برای تأمین برق

یخچال‌ها در ایران با توجه به تعداد و متوسط مصرف انرژی سالانه [۲] و [۳]، در حدود ۱۲۳۸/۵MW می‌باشد، ملاحظه می‌شود که سهم یخچال‌ها از کل مصرف سالانه کشور حدود ۵/۹ درصد و سهم آن از مصرف سالانه بخش خانگی در حدود ۱۷ درصد می‌باشد. با توجه به قیمت تمام شده هر کیلو وات ساعت انرژی برق معادل ۵/۳۴ سنت [۷]، هزینه ارزی سالانه برای تأمین برق این تعداد یخچال در کشور حدود ۵۸۰ میلیون دلار در سال خواهد بود. شایان ذکر است که این هزینه تنها مربوط به هزینه سوخت مصرفی نیروگاهها بوده و جزء هزینه احداث و سرمایه‌گذاری اولیه نمی‌باشد. از سوی دیگر همانگونه که ملاحظه می‌شود اعمال این انتخابهای طراحی مصرف انرژی یخچال نمونه را تا ۷۵٪ کاهش می‌دهد. به طوری که در مورد توان مصرفی قادر به کاهش مقدار ذکر شده تا ۳۰۹/۶MW می‌باشیم. این میزان کاهش مصرف، معادل کاهش هزینه ارزی سالانه برای تأمین برق این تعداد یخچال-فریزر در کشور، از ۵۸۰ میلیون دلار به ۱۴۵ میلیون دلار در سال می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه در سال مطالعه این طرح (سال ۱۳۷۵)

## مراجع

حدود ۹۵۰/۰۰۰ یخچال-فریزر تولید و وارد بازار شده، با توجه به اعمال انتخابهای طراحی فوق‌الذکر، مقدار ۴۰۷ گیگاوات ساعت انرژی تنها به ازای تولید یکسال یخچال-فریزر در کشور کاهش می‌یابد. این مقدار صرفه جویی انرژی ناشی از بهینه‌سازی یخچال-فریزرهای تولیدی در یکسال معادل ۲۱/۷ میلیون دلار خواهد بود. با فرض ثابت ماندن هزینه تولید برق در طول عمر کاری این محصولات (۱۵ سال)، مبلغ ارزی انرژی صرفه جویی شده در پایان این دور حدود ۳۲۵/۳ میلیون دلار برآورد می‌شود (تنها برای تولیدات سال ۱۳۷۵). تولید و اضافه شدن ۹۵۰/۰۰۰ یخچال-فریزر در یکسال به معنای ایجاد یک نیروگاه ۶۲ مگاواتی می‌باشد. اگر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای تولید هر کیلو وات توان الکتریکی با توجه به تکنولوژیهای مختلف تولید برق در کشور به طور متوسط ۱۰۰۰ دلار باشد، برای ایجاد چنین نیروگاهی ناشی از اضافه شدن تولید ۹۵۰/۰۰۰ یخچال-فریزر به شبکه سراسری، بایستی هر ساله حدود ۶۲ میلیون دلار تنها برای این بخش سرمایه‌گذاری شود.

1. Vinyard, Sand, and Bohman, "Evaluation of Design Options for Improving the Energy Efficiency of an Environmentally Safe Domestic Refrigerator-Freezer," *ASHRAE Transactions*, CH-95-24-2, 1995.
2. "The Islamic Republic of Iran Country Program, Conversion of Domestic Refrigerator Production Facilities to Phase Out CFC-11 and CFC-12," *UNIDO*, United Nations, 1993.
3. حیدری، ع.، "تدوین استاندارد مصرف انرژی در تولید یخچال، یخچال-فریزر و فریزر خانگی در ایران"، گزارش پژوهشی معاونت انرژی، وزارت نیرو، ۱۳۷۵.
4. آیین‌نامه اجرایی ردیف ۱ بند "و" تبصره (۱۹) قانون برنامه دوم توسعه اقتصادی اجتماعی فرهنگی جمهوری اسلامی ایران.
5. Abramson, D.S., Turiel, I., and Heydari, A., "Analysis of Refrigerator-Freezer Design Energy Efficiency by Computer Modeling: A DOE Perspective," *ASHRAE Transactions*, Vol. 96 part 1, 1990.
6. بافکار، ر. و حیدری، ع.؛ "شبیه‌سازی کامپیوتری یخچال فریزر خانگی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف، تابستان ۱۳۷۴.
7. هاتفی پور، س. و حیدری، ع. "بهینه‌سازی تعیین الگو و کاهش مصرف انرژی در تولیدات یخچال-فریزرهای خانگی در جمهوری اسلامی ایران" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، فروردین ۱۳۷۶.