

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه سیستم‌های انرژی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بررسی و امکان سنجی یک سیستم آبگرمکن خورشیدی با قابلیت

تولید برق به وسیله‌ی ترموالکتریک

دانشجو:

میلاذ حسن نیا دون

اساتید راهنما:

دکتر علی عباس نژاد

دکتر علی معظمی گودرزی

بهمن ۹۱



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

بسمه تعالی

فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای میلاد حسن نیا دون رشته مهندسی سیستم‌های انرژی تحت عنوان بررسی و امکان سنجی یک سیستم آبگرمکن خورشیدی با قابلیت تولید برق به وسیله‌ی ترموالکتریک که در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۳۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

<input type="checkbox"/> قبول (با درجه : بسیار خوب امتیاز ۱۸/۵)	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input type="checkbox"/> مردود
---	------------------------------------	--------------------------------

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد	دکتر علی عباس نژاد دکتر علی معظمی گودرزی	۱- استاد راهنما
			۲- استاد مشاور
		دکتر محمود نوروزی	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر علی جباری	۴- استاد ممتحن
	استادیار	دکتر محمود چهارطاقی	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده :



تقدیم به

مادر دلسوز و مهربانم

که هم مادر بود و هم پدر...

و

برادر عزیز و گرانقدرم

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. اینک که در سایه پرتو الطاف و عنایات خداوند سبحان، موفق به انجام پایان نامه کارشناسی ارشد شده‌ام، اینجانب بر خود می‌بالم که در محضر اساتید محترم دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود حضور داشته و از آنان بهره علمی برده‌ام.

از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از صمیم قلب:

از اساتید با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر علی عباس‌نژاد و دکتر علی معظمی گودرزی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین از زحمات دوستان و همکاران عزیزم، مهندس هومن بهساز و اشکان رسولی که در انجام این پروژه مرا یاری نمودند و مهندس مهدی فلاحتی که امکانات آزمایشگاهی و کارگاهی را در اختیار بنده قرار داده‌اند، قدردانی می‌نمایم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

میلااد حسن نیا

بهمن ۹۱

چکیده

طرح معرفی شده در این نوشتار، یک سیستم آبگرمکن خورشیدی است که قابلیت تولید برق را داراست. در این طرح برای تولید الکتریسیته از مدول‌های ترموالکتریک و همچنین، از لنزهای فرزنل جهت تمرکز نور خورشید بر انباره جاذب گرما، استفاده می‌شود.

به منظور ارزیابی قابلیت تبدیل انرژی خورشید به گرمای مفید و الکتریسیته، یک نمونه آزمایشگاهی با استفاده از یک مدول ترموالکتریک و یک لنز فرزنل از نوع متداول در بازار، طراحی و ساخته شد. نتایج حاصل از آزمایشات نشان می‌دهد که در شدت تابشی حدود 705 وات بر متر مربع به میزان $1/0.8$ وات توان در مدول ترموالکتریک تولید می‌شود. همچنین در همین شدت تابش، دمای آب ورودی (آب سرد) حدود $3/94$ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است.

برای بهینه‌سازی طرح بر پایه نتایج بدست آمده، پیشنهاد شده است که با هدف بهره‌گیری حداکثری از قابلیت‌های تجهیزات به کار رفته، از آرایه‌ای متشکل از 6 لنز فرزنل جهت گردآوری انرژی خورشیدی و انتقال آن به روغن معدنی (به عنوان سیال حامل گرما) و سپس به مدول ترموالکتریک، استفاده شود.

کلمات کلیدی: لنز فرزنل، ترموالکتریک، آبگرمکن خورشیدی، توان الکتریکی

فهرست مطالب

- ۱- فصل اول: مقدمه، ضرورت و اهداف تحقیق ۱
- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- اهداف تحقیق ۳
- ۳-۱- ساختار پایان نامه ۴
- ۲- فصل دوم: آشنایی با ترموالکتریک و کاربردهای آن ۵
- ۱-۲- مقدمه ۶
- ۲-۲- اثر ترموالکتریک ۷
- ۱-۲-۲- اثر سی بی ۸
- ۲-۲-۱- نفوذ حامل های بار ۱۲
- ۲-۲-۲- نیروی اصطکاکی فونون ۱۳
- ۲-۲-۲- اثر پلتیر ۱۳
- ۲-۲-۳- اثر تامسون ۱۵
- ۲-۲-۳-۱- روابط تامسون ۱۶
- ۳-۲- کاربرد ترموالکتریک ۱۷
- ۱-۳-۲- اثر سرمایشی ۱۷
- ۲-۳-۲- تولید توان ۱۸
- ۴-۲- اصول کار سیستم ترموالکتریک ۱۹
- ۵-۲- مقایسه فن آوری های مختلف سرمایشی ۲۰

- ۲۰-۶-۲- مزایای سیستم ترموالکتریک ۲۰
- ۲۱-۷-۲- ضریب شایستگی ۲۱
- ۲۲-۸-۲- بازده ۲۲
- ۲۳-۹-۲- منظور از گرما-توان چیست؟ ۲۳
- ۲۴-۱-۹-۲- ساختار فیزیکی ۲۴
- ۲۴-۲-۹-۲- علامت گرما-توان ۲۴
- ۲۵-۳-۹-۲- اندازه‌گیری گرما-توان ۲۵
- ۲۶-۱۰-۲- ترموالکتریک از نوع تولید توان ۲۶
- ۲۷-۱۱-۲- نمونه طرح‌های کاربردی ۲۷
- ۲۷-۱-۱۱-۲- مولد ترموالکتریکی خودرو (ATEG) ۲۷
- ۲۹-۱-۱-۱۱-۲- اصول عملکرد ۲۹
- ۳۰-۲-۱-۱۱-۲- بازده ۳۰
- ۳۱-۳-۱-۱۱-۲- فواید ۳۱
- ۳۱-۴-۱-۱۱-۲- معایب ۳۱
- ۳۳-۲-۱۱-۲- ژنراتور ترموالکتریکی رادیواکتیو ۳۳
- ۳۳-۱-۲-۱۱-۲- طراحی یک ژنراتور ترموالکتریکی رادیواکتیو ۳۳
- ۳۴-۳-۱۱-۲- تولید برق به‌وسیله‌ی ترموالکتریک از کلکتورهای خورشیدی سقفی ۳۴
- ۳۷-۳- فصل سوم: لنز فرزنل ۳۷
- ۳۸-۱-۳- مقدمه ۳۸

- ۳-۲- روند تغییرات شکل هندسی لنز فرزنل ۳۹
- ۳-۲-۱- نحوه‌ی عملکرد ۳۹
- ۳-۳- نسل جدید لنزهای فرزنل ۴۶
- ۳-۳-۱- انواع لنز فرزنل ۴۸
- ۳-۳-۲- کاربرد لنز فرزنل ۵۱
- ۳-۳-۳- مزایای لنزفرزنل ۵۱
- ۴-۳- مطالعات کاربردی در زمینه‌ی استفاده از لنز فرزنل جهت متمرکز کردن نور خورشید ۵۲
- ۴-۳-۱- پیش‌گفتار ۵۲
- ۴-۳-۲- سیستم‌های تصویری ۵۳
- ۴-۳-۱-۲- ساخت لنز فرزنل از نوع تصویری ۵۴
- ۴-۳-۲-۲- متمرکزکننده‌های فتوولتائیک ۵۵
- ۴-۳-۲-۳- بهره‌برداری حرارتی و تولید توان از نور خورشید ۵۷
- ۴-۳-۲-۴- لامپ خورشیدی ۶۲
- ۴-۳-۳- سیستم‌های غیر تصویری ۶۳
- ۴-۳-۱-۳- سیستم‌های متمرکزکننده‌ی خطی ۶۴
- ۴-۳-۲-۳- سیستم‌های متمرکزکننده‌ی نقطه‌ای ۶۴
- ۴- فصل چهارم: تشریح سیستم آزمایشگاهی ۶۶
- ۴-۱- مقدمه ۶۷
- ۴-۲- مشخصات فنی مدول ترموالکتریک مورد استفاده در پروژه ۶۹

- ۳-۴- بررسی پتانسیل تولید برق با استفاده از یک لنز فرزنل ۷۴
- ۴-۴- طراحی مفهومی یک سیستم آبگرمکن خورشیدی با قابلیت تولید برق ۷۴
- ۵-۴- طراحی مدل آزمایشگاهی سیستم مورد مطالعه ۷۶
- ۱-۵-۴- طرح مفهومی ۷۶
- ۲-۵-۴- اجزای اصلی تشکیل دهنده ی طرح ۷۷
- ۱-۲-۵-۴- مبدل ترموالکتریک ۷۷
- ۲-۲-۵-۴- سازه مکانیکی دستگاه ۸۱
- ۳-۵-۴- روش آزمایش ۸۴
- ۶-۴- دستگاه‌های اندازه‌گیری ۸۷
- ۱-۶-۴- دماسنج غیر تماسی مادون قرمز ۸۷
- ۲-۶-۴- دماسنج ترموکوپلی ۸۸
- ۳-۶-۴- ولت‌متر دیجیتال ۸۹
- ۴-۶-۴- تابش‌سنج خورشیدی ۹۰
- ۵- فصل پنجم: تحلیل نتایج آزمایشگاهی ۹۲
- ۱-۵- مقدمه ۹۳
- ۲-۵- نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده ۹۳
- ۳-۵- بررسی قابلیت تولید توان الکتریکی ۹۹
- ۴-۵- بررسی قابلیت تولید آب گرم ۱۰۹
- ۵-۵- بهینه‌سازی طرح پیشنهادی ۱۱۶

۶- فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۲۰

۶-۱- نتیجه‌گیری ۱۲۱

۶-۲- پیشنهادات ۱۲۲

مراجع ۱۲۴

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: نمای داخلی یک ترموالکتریک ۶
- شکل ۲-۲: دو اثر متفاوت در ترموالکتریک ۷
- شکل ۳-۲: مدار الکتریکی ۸
- شکل ۴-۲: اثر سی‌یک ۱۰
- شکل ۵-۲: اثر سی‌یک و جهت جریان ۱۱
- شکل ۶-۲: نمایش یک فوتون ۱۳
- شکل ۷-۲: اثر پلتیر در نقاط اتصال ۱۴
- شکل ۸-۲: اثر پلتیر در یک مدار الکتریکی ۱۵
- شکل ۹-۲: مکانیزم حرکت حامل‌های بار در هنگام اتصال به منبع قدرت ۱۸
- شکل ۱۰-۲: یک نمونه ترموالکتریک سرمایه‌ی ۱۸
- شکل ۱۱-۲: عملکرد یک ترموالکتریک در حالت تولید توان ۱۹
- شکل ۱۲-۲: نمودار ضریب شایستگی ترموالکتریک با مواد مختلف ۲۲
- شکل ۱۳-۲: نمونه‌ای از طرح ATEG در خودرو ۲۸
- شکل ۱۴-۲: شماتیک یک سیستم ATEG ۲۹
- شکل ۱۵-۲: طرح یک سیستم Exhaust-based ATEG ۳۰
- شکل ۱۶-۲: یک RTG با مولدهای ترموالکتریک ۳۳
- شکل ۱۷-۲: طرح شماتیک یک TE-RSC برای تهویه مطبوع ۳۵
- شکل ۱۸-۲: تجهیزات آزمایشگاهی ۳۶
- شکل ۱-۳: نمونه‌ی اولیه یک لنز فرزنل ۳۸
- شکل ۲-۳: نحوه‌ی عملکرد لنز فرزنل ۴۰
- شکل ۳-۳: نمونه‌ای از یک لنز فرزنل از رده اول ۴۱

- شکل ۳-۴: یک لنز فرزنل از رده دوم ۴۲
- شکل ۳-۵: نمونه‌ای از لنز فرزنل از رده سوم ۴۲
- شکل ۳-۶: یک لنز فرزنل از رده چهارم ۴۳
- شکل ۳-۷: یک لنز فرزنل از رده پنجم ۴۴
- شکل ۳-۸: نمونه‌ای از یک لنز فرزنل از رده ششم ۴۴
- شکل ۳-۹: نمودار ضریب تابش در فلزات ۴۵
- شکل ۳-۱۰: نمودار ضریب تابش در غیرفلزات ۴۶
- شکل ۳-۱۱: روش ساخت لنز فرزنل ۴۷
- شکل ۳-۱۲: نمونه‌ای از لنز فرزنل نسل جدید ۴۸
- شکل ۳-۱۳: طرح یک لنز فرزنل با فاصله کانونی مثبت که به عنوان یک کلکتور عمل می‌کند ۴۸
- شکل ۳-۱۴: طرح یک لنز فرزنل با فاصله کانونی مثبت که به عنوان یک کلیماتور عمل می‌کند ۴۹
- شکل ۳-۱۵: طرح یک لنز فرزنل با فاصله کانونی منفی که به عنوان یک جداساز نوری عمل می‌کند ۴۹
- شکل ۳-۱۶: نمونه‌ی صنعتی آرایه‌ی لنز فرزنل ۵۰
- شکل ۳-۱۷: لنز فرزنل از نوع استوانه‌ای ۵۰
- شکل ۳-۱۸: لنز فرزنل دایره‌ای ۵۱
- شکل ۳-۱۹: لنز قدیمی و لنز فرزنل ۵۳
- شکل ۳-۲۰: سیستم متمرکزکننده‌ی نقطه‌ای دو محوره ۵۶
- شکل ۳-۲۱: چهار لنز فرزنل از نوع کشیده ۵۷
- شکل ۳-۲۲: یک دستگاه تولید توان با استفاده از لنز فرزنل متمرکزکننده‌ی نقطه‌ای ۵۸
- شکل ۳-۲۳: شماتیک یک لنز فرزنل خطی ۶۰
- شکل ۳-۲۴: شماتیک یک سیستم CLFR ۶۱
- شکل ۳-۲۵: یک سیستم روشنایی خورشیدی با لنز فرزنل ۶۲
- شکل ۳-۲۶: یک ایستگاه فضایی با متمرکزکننده‌های فتوولتائیک ۶۵

- شکل ۴-۱: نمونه ای از طرح‌های اجرا شده برای تولید الکتریسیته و آب گرم با استفاده از نور خورشید ۶۷
- شکل ۴-۲: طرح نمادین از یک سلول از مولد ترموالکتریک ۶۸
- شکل ۴-۳: طرح شماتیک ترموالکتریک مورد آزمایش ۷۱
- شکل ۴-۴: ترموالکتریک مورد آزمایش ۷۲
- شکل ۴-۵: نمودار تغییرات ولتاژ ترموالکتریک مدار باز بر حسب دمای اتصال گرم ۷۳
- شکل ۴-۶: رفتار تغییرات توان ماکزیمم ترموالکتریک بر حسب دمای اتصال گرم ۷۳
- شکل ۴-۷: نمایش نمادین از طرح پیشنهادی برای تولید الکتریسیته و آب گرم از خورشید ۷۵
- شکل ۴-۸: نمونه‌ای از مبدل گرمایی مایع به مایع مجهز به مدول ترموالکتریک ۷۵
- شکل ۴-۹: طرح نمادین از سیستم مورد آزمایش ۷۷
- شکل ۴-۱۰: یک قوطی آلومینیومی ۷۸
- شکل ۴-۱۱: یک قوطی آلومینیومی با ورقه‌های فولادی و سرشیرها ۷۸
- شکل ۴-۱۲: انباره مورد آزمایش ۷۹
- شکل ۴-۱۳: نمونه ساخته شده مولد ترموالکتریک ۷۹
- شکل ۴-۱۴: نمونه مونتاژ شده از مبدل ترموالکتریک در حباب شیشه ای ۸۰
- شکل ۴-۱۵: وضعیت قرارگیری مجموعه مبدل ترموالکتریک بر روی پایه شاسی ۸۱
- شکل ۴-۱۶: شماتیک قاب نگه دارنده‌ی لنز فرزنل ۸۲
- شکل ۴-۱۷: شماتیک پایه نگهدارنده‌ی لنز فرزنل ۸۲
- شکل ۴-۱۸: طرح نمادین مکانیزم نگهدارنده‌ی لنز فرزنل ۸۳
- شکل ۴-۱۹: سازه مکانیکی نگهدارنده اجزاء سیستم مورد آزمایش ۸۴
- شکل ۴-۲۰: یک سیستم خورشیدی مورد آزمایش با قابلیت تولید برق و آب گرم ۸۶
- شکل ۴-۲۱: دماسنج لیزری استفاده شده برای اندازه گیری دمای سطح گرماگیر مبدل ۸۸
- شکل ۴-۲۲: دماسنج ترموکوپلی استفاده شده در اندازه‌گیری دمای آب ۸۹
- شکل ۴-۲۳: آوومتر استفاده شده در اندازه‌گیری ولتاژ ۹۰

- شکل ۴-۲۴: تابش سنج استفاده شده در اندازه گیری شدت تابش خورشید ۹۱
- شکل ۵-۱: نمودار تابش خورشید بر سطح لنز در طول روز دوم شهریور ۹۷
- شکل ۵-۲: نمودار تابش خورشید بر سطح لنز در طول روز پنجم شهریور ۹۷
- شکل ۵-۳: نمودار تابش خورشید بر سطح لنز در طول روز دهم شهریور ۹۸
- شکل ۵-۴: تغییرات دمای اتصال گرم و سرد ترموالکتریک بر حسب شدت تابش در روز دوم شهریور ۱۰۲
- شکل ۵-۵: تغییرات ولتاژ و جریان در حالت ماکزیمم توان بر حسب شدت تابش در روز دوم شهریور ۱۰۲
- شکل ۵-۶: توان ترموالکتریک ماکزیمم بر حسب شدت تابش رسیده به لنز در روز دوم شهریور ۱۰۳
- شکل ۵-۷: دمای اتصال گرم و سرد ترموالکتریک بر حسب تابش در روز پنجم شهریور ۱۰۴
- شکل ۵-۸: تغییرات ولتاژ مدار باز و جریان در حالت ماکزیمم توان در روز پنجم شهریور ۱۰۴
- شکل ۵-۹: توان ماکزیمم ترموالکتریک بر حسب شدت تابش در روز پنجم شهریور ۱۰۵
- شکل ۵-۱۰: دمای اتصال گرم و سرد ترموالکتریک بر حسب تابش در روز دهم شهریور ۱۰۵
- شکل ۵-۱۱: تغییرات ولتاژ مدار باز و جریان در حالت ماکزیمم توان در روز دهم شهریور ۱۰۶
- شکل ۵-۱۲: توان ترموالکتریک ماکزیمم بر حسب شدت تابش در روز دهم شهریور ۱۰۶
- شکل ۵-۱۳: نمودار ماکزیمم توان الکتریکی تولیدی در طول روز دوم شهریور ۱۰۷
- شکل ۵-۱۴: نمودار ماکزیمم توان الکتریکی تولیدی در طول روز پنجم شهریور ۱۰۸
- شکل ۵-۱۵: نمودار ماکزیمم توان الکتریکی تولیدی در طول روز دهم شهریور ۱۰۸
- شکل ۵-۱۶: نمودار دمای آب خروجی بر حسب شدت تابش دریافتی لنز در طول روز دوم شهریور ۱۱۲
- شکل ۵-۱۷: نمودار دمای آب خروجی بر حسب شدت تابش دریافتی لنز در طول روز پنجم شهریور ۱۱۳
- شکل ۵-۱۸: نمودار دمای آب خروجی بر حسب شدت تابش دریافتی لنز در طول روز دهم شهریور ۱۱۳
- شکل ۵-۱۹: نمودار توان گرمایی جذب شده در آب در روز دوم شهریور ۱۱۴
- شکل ۵-۲۰: نمودار توان گرمایی جذب شده در آب در روز پنجم شهریور ۱۱۵
- شکل ۵-۲۱: نمودار توان گرمایی جذب شده در آب در روز دهم شهریور ۱۱۵
- شکل ۵-۲۲: استفاده از روش ترموسیفون جهت برقرای جریان روغن ۱۱۷

شکل ۵-۲۳: استفاده از پمپ جهت برقرای جریان روغن ۱۱۸

شکل ۵-۲۴: نمونه‌ای از یک پمپ سیرکولاسیون ۱۱۸

فهرست جداول

- جدول ۳-۱: مرتبه بندی لنزهای فرزنل ۴۰
- جدول ۴-۱: مشخصات فنی ترموالکتریک "TEP1-12656-0.6" ۷۲
- جدول ۵-۱: داده‌های مربوط به روز دوم شهریور ۹۵
- جدول ۵-۲: داده‌های مربوط به روز پنجم شهریور ۹۵
- جدول ۵-۳: داده‌های ثبت شده در روز دهم شهریور ۹۶
- جدول ۵-۴: داده‌های مبین رفتار ترموالکتریک سیستم در روز دوم شهریور ۱۰۰
- جدول ۵-۵: داده‌های مبین رفتار ترموالکتریک سیستم در روز پنجم شهریور ۱۰۰
- جدول ۵-۶: داده‌های مبین رفتار ترموالکتریک سیستم در روز دهم شهریور ۱۰۱
- جدول ۵-۷: داده‌های مربوط به تولید آب گرم در روز دوم شهریور ۱۱۰
- جدول ۵-۸: داده‌های مربوط به تولید آب گرم در روز پنجم شهریور ۱۱۱
- جدول ۵-۹: داده‌های مربوط به تولید آب گرم در روز دهم شهریور ۱۱۱

۱- فصل اول

مقدمه، ضرورت

و اهداف تحقيق

امروزه عوامل بسیاری از جمله گسترش فزاینده‌ی نیاز به انرژی، محدودیت‌های منابع فسیلی، فاجعه‌ی آلودگی زیست‌محیطی ناشی از سوختن مواد فسیلی (گرم شدن هوا و اثر گلخانه‌ای، شرایط نامساعد جوی از قبیل سیل، طوفان، خشکی‌های وسیع) لزوم تعادل در پخش گازهای آلاینده و بسیاری از دیگر عوامل، سبب رویکرد علم به انرژی‌های تجدیدپذیر طبیعی شده است.

منابع انرژی فسیلی، البته به دو دلیل محرز هرگز جواب‌گوی بشر برای ادامه بقا، تکامل و توسعه نخواهد بود. نخستین دلیل، محدودیت و مرغوبیت انرژی‌های فسیلی است. نباید فراموش کرد که سوخت‌های فسیلی از نوع انرژی شیمیایی متمرکز هستند و به یقین، کاربردهایی بهتر و به صرفه‌تر از احتراق دارند. دومین مسأله، بروز مشکلات زیست‌محیطی و در پی آن تغییرات نامطلوب اقلیمی و پدیده‌ی گرم‌شدن زمین است. حفظ سلامت اتمسفر، خاک و منابع آبی از مهمترین پیش شرط‌های توسعه اقتصادی پایدار است و در نبود آنها، حیات نوع بشر زیر سؤال خواهد بود. رویارویی با این حقایق، در مجموع، استفاده از منابع جدید انرژی را به جای منابع فسیلی امری الزامی ساخته است. سیستم‌های جدید انرژی در آینده باید متکی به تغییرات ساختاری و بنیادی باشند که در آن منابع انرژی بدون کربن مورد استفاده قرار گیرند. در حال حاضر، پنج گونه انرژی تجدیدپذیر، مشتمل بر انرژی خورشیدی، بادی، زمین- گرمایی، فناوری هیدروژن و زیست توده و جذر و مد (امواج دریا) منطقی‌ترین و پاک‌ترین منابع در دسترس شناخته شده‌اند. این منابع انرژی با توجه به سادگی فناوری در مقابل فناوری پیچیده و پرهزینه هسته‌ای و همچنین به دلیل میرا بودن از عوارضی چون زباله‌های اتمی، گزینه‌های نخست جوامعی هستند که ضرورت روی‌آوری به انرژی‌های تجدیدپذیر را درک کرده و سعی دارند تا وظیفه خود را در قبال حفظ زمین ادا کنند [1]. در کشور ما مصرف انرژی‌های فسیلی رو به افزایش است. عواملی همچون ازدیاد جمعیت، افزایش وسایل نقلیه، افزایش واحدهای مسکونی، تاسیس کارخانه‌هایی که مواد اولیه و منبع

انرژی مصرفی آن‌ها سوخت‌های فسیلی است و همچنین استفاده کردن از دانش و تکنولوژی قدیمی در تولید مواد صنعتی، باعث گردیده تا مصرف سوخت‌های فسیلی دائم در حال افزایش باشد.

همانطور که می‌دانیم کشور ایران در کمربند خورشیدی^۱ قرار دارد که در بیشتر مکان‌ها و مناطق آن بیشتر از ۳۰۰ روز آفتاب وجود دارد. بنابراین در کشورهایی نظیر کشور ما که میزان متوسط تابش خورشیدی در آن به ۲۰۰۰ کیلووات بر متر مربع در سال می‌رسد و در بسیاری از نقاط آن تعداد ساعات آفتابی از ۲۸۰۰ ساعت در سال تجاوز می‌کند و در برخی از نقاط به ۳۲۰۰ ساعت نیز می‌رسد، استفاده از انرژی خورشیدی نه فقط ضروری، بلکه اجتناب ناپذیر است. از طرفی به دلیل افزایش تقاضای انرژی در سطح جهانی و به کارگیری سیستم‌ها و وسایل تولید توان که جزو منابع پاک و کم هزینه هستند، در دو دهه‌ی اخیر استفاده از ترموالکتریک بسیار وسیع و گسترده شده است. ترموالکتریک‌ها وسایلی هستند که به صورت مطمئن، باعث تبدیل انرژی حرارتی به الکتریکی می‌شوند، اندازه‌ی کوچک و وزن سبکی دارند، هیچ‌گونه سروصدا و ارتعاشی نداشته و فاقد قطعات متحرک مکانیکی می‌باشند. ترموالکتریک‌ها به‌عنوان تکنولوژی سبز شناخته شده و جزو منابع انعطاف‌پذیر (از نظر گستردگی کاربرد) می‌باشند.

۱-۲- اهداف تحقیق

هدف این پایان‌نامه، بررسی تجربی یک سیستم آبگرمکن خورشیدی می‌باشد که قابلیت تولید برق به‌وسیله‌ی مدول‌های ترموالکتریک را داراست. در این طرح به جای استفاده از کلکتورهای متداول خورشیدی از لنزهای فرزنل استفاده شده است. لنز فرزنل رفتاری شبیه به عدسی با مشخصات اپتیکی مشخص دارد. دلیل استفاده از این لنزها، سبکی آنها نسبت به لنزهای شیشه‌ای متداول و همچنین ارزان‌تر بودن آنهاست.

^۱Sunbelt

۱-۳- ساختار پایان نامه

محورهای اصلی پایان نامه در فصولی که در ذیل بیان می گردد، تشریح شده است:

فصل دوم: آشنایی با ترموالکتریک و کاربردهای آن؛ در این فصل با مروری بر ادبیات موضوع، به معرفی

اثرات ترموالکتریک که شامل اثر سی-بک، اثر پلتیر و اثر تامسون می باشد، پرداخته می شود.

فصل سوم: لنز فرزنل؛ در این فصل روند توسعه تدریجی در ساختار و شکل ظاهری لنزهای فرزنل مورد

مطالعه قرار گرفته است. در ادامه تحقیقاتی در مورد به کارگیری لنزهای فرزنل در سیستم های فتوولتائیک

شده است. این فصل به همراه فصل دوم شالوده ی طرح موضوع این پایان نامه را پی ریزی می کنند.

فصل چهارم: تشریح سیستم آزمایشگاهی؛ در این فصل به توصیف وسایل اندازه گیری به کار برده شده

در تمامی آزمایشات پرداخته و اطلاعاتی در مورد نحوه ی ساخت اجزای سیستم آزمایشگاهی و روش

آزمایشات، آورده شده است.

فصل پنجم: تحلیل نتایج آزمایشگاهی؛ این فصل شامل داده های ثبت شده در آزمایشات می باشد.

تحلیل نتایج نیز با استفاده از جداول و نمودارهای حاصله صورت گرفته است.

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات؛ در انتهای این تحقیق با جمع بندی مطالب و نتایج، راهکارهایی

جهت بهبود کیفی طرح پایان نامه پیشنهاد می گردد.

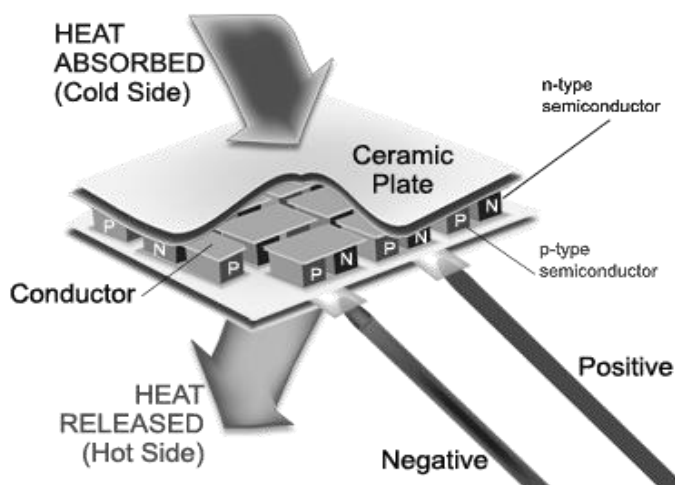
۲- فصل دوم

آشنایی با ترموالکترونیک و کاربردهای آن

۱-۲- مقدمه

اوایل قرن نوزدهم سی‌بک^۱ فهمید که اگر در محل اتصال دو هادی غیر مشابه اختلاف دما ایجاد نماید، جریان الکتریکی جاری می‌شود. از طرفی دیگر، پلتیر^۲ ثابت کرد که جریان عبوری از میان دو هادی غیر مشابه، باعث می‌شود که گرما یا منتشر شود و یا در محل اتصال جذب شود و با استفاده از همین دو اثر وسایل جالبی ساخته شد.

سیستم ترموالکتریک در سال ۱۸۳۴ بر اساس اثر پلتیر پایه گذاری شده و یکی از سه اثر ترموالکتریک می‌باشد. دو اثر دیگر به نام‌های اثر سی‌بک و اثر تامسون^۳ شناخته می‌شوند که با فرمول ساده‌ای به هم ارتباط داده می‌شوند. اثر پلتیر روی نقطه اتصال بحث می‌کند و دو اثر دیگر در یک نیمه هادی بررسی می‌شوند. طرح شماتیک یک ترموالکتریک در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۲: نمای داخلی یک ترموالکتریک [1]

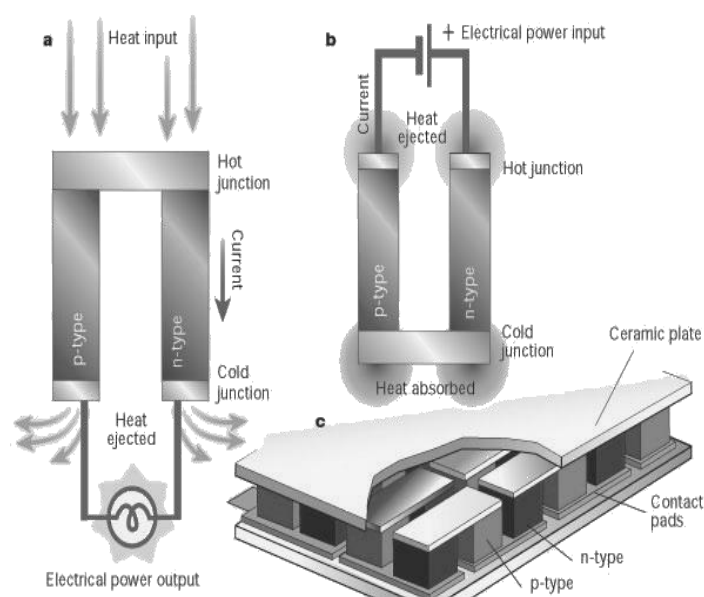
^۱ Seebeck

^۲ Peltier

^۳ Thomson

۲-۲- اثر ترموالکتریک

اثر ترموالکتریک به معنی تبدیل مستقیم اختلاف دما به ولتاژ الکتریکی و بالعکس می‌باشد. یعنی وقتی یک اختلاف دما در یک طرف ایجاد شود، ولتاژ الکتریکی تولید خواهد شد. به طور معکوس وقتی یک ولتاژ به دو سر آن اعمال می‌شود، یک اختلاف دما ایجاد می‌کند. در مقیاس اتمی یک گرادیان دمایی موجب شارژ حامل‌های بار شده و باعث نفوذ آن از سمت گرم به سمت سرد می‌شود؛ درست همانند گازهای کلاسیک^۱ که وقتی گرم می‌شوند منبسط شده و لذا یک جریان گرمایی در آنها ایجاد می‌شود. اثرات ترموالکتریک در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲: دو اثر متفاوت در ترموالکتریک [2]

این اثر می‌تواند برای تولید برق و اندازه‌گیری دما به کار رود. به دلیل اینکه گرمایش و سرمایش به طور مستقیم توسط پلاریته‌ی ولتاژ اعمال شده تعیین می‌شود، ترموالکتریک می‌تواند به عنوان یک

^۱ Classical gas

کنترل کننده‌ی دما، کارکرد موثری داشته باشد.

اثر ترموالکتریک خود شامل سه اثر می‌باشد.

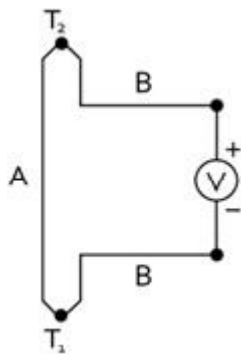
الف) اثر سی‌بک

ب) اثر پلتیر

ج) اثر تامسون

وقتی از یک ماده‌ای که مقاومت الکتریکی دارد، ولتاژی عبور کند، گرمایی تولید می‌شود که به آن گرمای ژول^۱ گوئیم. سه اثر بالا همگی از نظر ترمودینامیکی بازگشت‌پذیر هستند ولی گرمای ژول بازگشت‌ناپذیر [3].

۲-۲-۱- اثر سی‌بک



شکل ۲-۳: مدار الکتریکی [4]

اثر سی‌بک، تبدیل مستقیم اختلاف دما به ولتاژ می‌باشد که توسط فیزیکدان آلمانی به‌نام توماس یوهان سی‌بک^۲ در سال ۱۸۲۱ کشف شد. او کشف کرد که هرگاه یک مسیر بسته به‌وسیله‌ی دو ماده که

^۱ Joule heating

^۲ Thomas Johann Seebeck

در دو نقطه به هم وصل می‌شوند، ایجاد می‌شود و در صورتی که اختلاف دما بین محل اتصال وجود داشته باشد، عقربه‌ی جهت‌یاب منحرف خواهد شد و این به خاطر عکس‌العمل فلز به اختلاف دما می‌باشد که یک حلقه‌ی جریان و یک میدان مغناطیسی را ایجاد می‌کند. سی‌بک تشخیص نداد که با یک مدار الکتریکی مواجه است لذا آن را پدیده‌ی سی‌بک نامید. فیزیکدان دانمارکی هانس کریستین اوستد^۱ این اشتباه را تصحیح کرد و اصطلاح ترموالکتریسیت^۲ را ابداع کرد. ولتاژی که به وسیله‌ی این اثر ایجاد می‌شود حدود چند میکروولت بر کلونین است. به عنوان مثال ترکیبی از مس و کنستانتان^۳ در دمای اتاق ضریب سی‌بکی معادل ۴۱ میکروولت بر کلونین را دارد [5].

ولتاژ V از رابطه‌ی ۱-۲ بدست می‌آید:

$$\int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT \quad (1-2)$$

که S_B و S_A به ترتیب ضرایب سی‌بک مواد A و B می‌باشند که تابعی از دما هستند. و T_1 و T_2 دمای دو اتصال می‌باشد. مدار الکتریکی سی‌بک در شکل ۲-۳ ملاحظه می‌شود.

ضریب سی‌بک تابع غیرخطی از دما می‌باشد و به دمای مطلق رسانا، ماده، و ساختار مولکولی آن بستگی دارد. اگر ضریب سی‌بک به طور مداوم ثابت باشد، برای اختلاف دمای اندازه‌گیری شده فرمول بالا به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

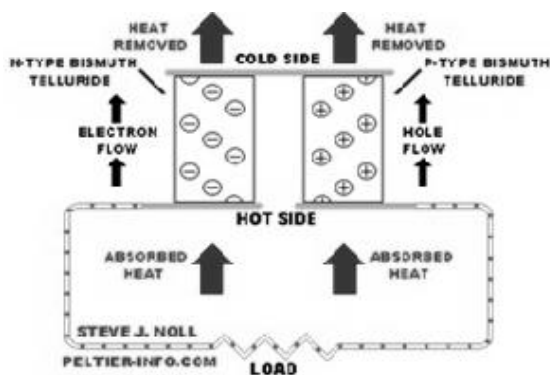
^۱ Hans Christian Orsted

^۲ Thermoelectricity

^۳ Copper-constantan

$$V = (S_B - S_A) \cdot (T_2 - T_1) \quad (2-2)$$

اثر سی‌بک در ترموکوپل‌ها برای اندازه‌گیری اختلاف دما به کار می‌رود. ضریب سی‌بک (که با S نمایش داده می‌شود) در واقع شدت ولتاژ ترموالکتریکی القا شده در پاسخ به اختلاف دمای اعمال شده به ماده است. واحد S ، V/K است که $\mu V/K$ بیشتر رایج می‌باشد [6]. شماتیک این اثر در شکل ۲-۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۴: اثر سی‌بک [7]

علامت S به وسیله‌ی حامل‌های جریان الکتریکی تعیین می‌شود طوری که مقدار هر کدام بیشتر باشد علامت S همان است. اگر اختلاف دما بین دو سمت ماده کم باشد S به طور تقریبی به صورت زیر است:

$$S = -\frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (3-2)$$

که ΔV ولتاژ ترموالکتریکی موجود بین دو سمت ترموالکتریک می‌باشد.

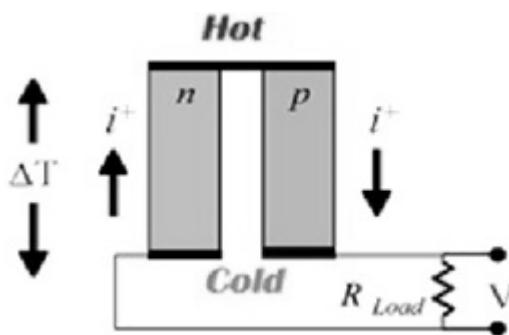
اگر بخواهیم برحسب میدان الکتریکی و گرادیان دمایی بنویسیم، معادله‌ی بالا به صورت زیر نوشته می‌-

شود:

$$S = \frac{E}{\Delta T} \quad (4-2)$$

این دو معادله تقریبی هستند؛ صورت کسر معادله اول بهتر است تفاضل پتانسیل الکتریکی بر $-e$ باشد نه پتانسیل الکتریکی و همچنین معادله‌ی دوم بهتر است گرادیان پتانسیل الکتروشیمیایی تقسیم بر e باشد (به جای میدان الکتریکی). هرچند پتانسیل شیمیایی بر حسب دما اغلب نسبتاً ثابت است. بنابراین به کار بردن پتانسیل الکتریکی تنها، در این موارد یک تقریب بسیار خوبی است [5]. علامت منفی در معادله‌ی اول به این علت است که در میدان الکتریکی حامل‌ها از سمت ولتاژ بالا به سمت

ولتاژ پایین در حرکت هستند ولی در گرادیان دمایی از نقاط دما پایین به سمت نقاط دما بالا می‌روند. حامل‌های بار تمایل به پاسخ یک گرادیان دمایی به وسیله‌ی حرکت در جهت مخالف دارند؛ به عبارتی حرکت از سمت گرم به سمت سرد. این حامل‌ها تمایل دارند که به یک میدان مغناطیسی به وسیله‌ی روش‌های مختلفی پاسخ دهند که به بار آنها بستگی دارد. همانطور که در شکل ۲-۵ ملاحظه می‌شود، بارهای مثبت تمایل به حرکت در همان جهات میدان را دارند در حالی که بارهای منفی در خلاف جهت حرکت می‌کنند. وقتی که موازنه حاصل شد این دو تمایل لغو می‌شود.



شکل ۲-۵: اثر سی‌بک و جهت جریان [8]

ضریب سی‌بک یک ماده به ندرت به صورت دقیق اندازه‌گیری می‌شود زیرا الکترودهای متصل به ولت-

متر برای اندازه‌گیری ولتاژ الکتریکی بایستی بر روی فلز قرار داده شود تا بتواند ولتاژ ترموالکتریکی القا شده در الکتروود اندازه‌گیری را تعیین کند. لذا مقدار بدست آمده ترکیبی از ضریب سی‌بک ماده‌ی مورد نظر و ماده‌ی الکتروود اندازه‌گیری می‌باشد که به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$S_{AB} = S_B - S_A = \frac{\Delta V_B}{\Delta T} - \frac{\Delta V_A}{\Delta T} \quad (5-2)$$

در ابررساناها^۱ $S=0$ می‌باشد. از ابررساناها برای تعیین ضریب مطلق سی‌بک استفاده می‌شود، چون S آن‌ها همان S کل ترموکوپل می‌باشد. ضریب سی‌بک یک پارامتر مهم در تعیین بازدهی ترموالکتریک می‌باشد. هرچقدر ولتاژ القا شده و ضریب سی‌بک بیشتر باشد، آنگاه بازده نیز بالاتر است.

اثر سی‌بک به وسیله‌ی دو عامل ایجاد می‌شود:

(الف) نفوذ حامل‌های بار^۲

(ب) نیروی اصطکاکی فونون^۳

۲-۱-۱-۲- نفوذ حامل‌های بار

حامل‌های بار در مواد وقتی نفوذ می‌کند که یک سمت آن‌ها در اختلاف دمایی با سمت دیگر باشد. حامل‌های سمت گرم، به دلیل چگالی کمتر حرکت کرده و به سمت سرد ماده می‌روند. اگر آن ماده‌ی رسانا به حالت تعادل ترمودینامیکی برسد، در این روند گرما به طور مساوی در سراسر هادی توزیع می‌شود. در یک سیستم که هر دو سمت آن در درجه حرارت ثابت نگه داشته می‌شود، انتشار حامل‌های بار ثابت است. اگر سرعت انتشار حامل‌های سرد و گرم که در خلاف جهت هم حرکت می‌کنند، برابر باشد، هیچ تغییر خالصی در حامل‌ها وجود ندارد. ترموالکتریک‌های پیشین فلزی بودند اما اخیراً تعدادی از آن‌ها

^۱ Superconductors

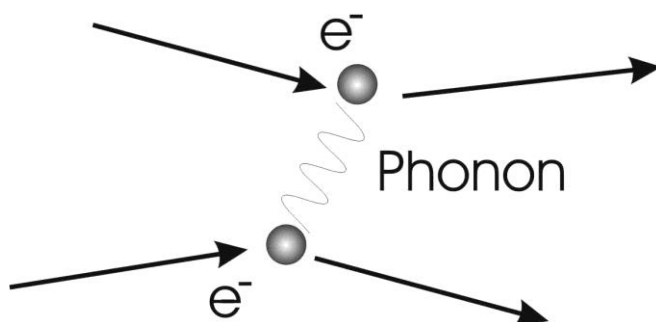
^۲ Charge-carrier diffusion

^۳ Phonon drag

به صورت ترکیب متفاوتی از n-type و p-type المنت‌های نیمه هادی می‌باشند. اتصالات نیمه هادی‌ها بیشتر در وسایل تولید توان رایج است در حالی که اتصالات فلزی بیشتر در اندازه‌گیری دما رایج می‌باشد.

۲-۱-۲-۲- نیروی اصطکاکی فونون

فونون یک کوانتوم انرژی است (مقایسه شود با فوتون)، که در نقش یک شبه‌ذره، حرکت نوسانی اتم‌ها در کریستال را توجیه می‌کند. در فیزیک ماده چگال، فونون نقش بسیار مهمی دارد و بسیاری از خاصیت‌های مواد جامد از جمله رسانایی گرمایی و رسانایی الکتریکی توسط فونون‌ها صورت می‌گیرد. فونون‌ها همیشه در تعادل حرارتی محلی نیستند. آنها برخلاف گرادیان حرارتی حرکت می‌کنند و ممنوم خود را به وسیله‌ی فعل و انفعالاتی که با الکترون‌ها یا سایر حامل‌های بار دارند، از دست داده و باعث به-وجود آمدن تغییراتی در ساختار کریستالی می‌شوند. ابر رساناها در حالت عادی رساناهای خوبی نیستند و این ناشی از این واقعیت است که منشا ابررسانایی و برهم‌کنش الکترون، فونون است. شماتیک فونون در شکل ۶-۲ نشان داده شده است.



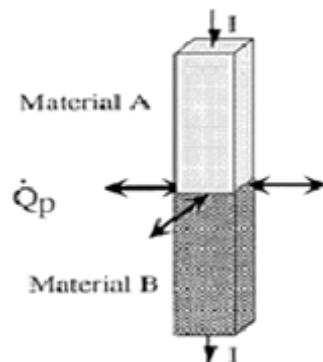
شکل ۶-۲: نمایش یک فونون [4]

۲-۲-۲- اثر پلتیر

اثر پلتیر^۱ وجود گرما در یک اتصال الکتریکی دو ماده‌ی مختلف را نشان می‌دهد. این به افتخار

^۱ Peltier effect

فیزیکدان فرانسوی به نام جان چارلز پلتیر^۱ می‌باشد که در سال ۱۹۳۴ آن را کشف کرد. گرما در یک اتصال تولید و در اتصال دیگر جذب می‌شود. شکل ۷-۲ اثر پلتیر در نقاط اتصال را نشان می‌دهد. معادله‌ی گرمای پلتیر به طبق رابطه‌ی ۶-۲ بدست می‌آید.



شکل ۷-۲: اثر پلتیر در نقاط اتصال [9]

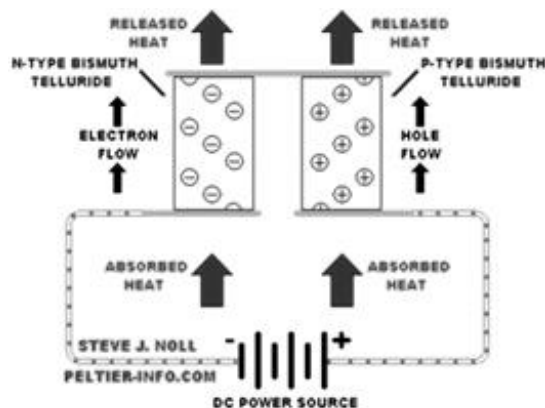
$$Q = \Pi_{AB} I = (\Pi_B - \Pi_A) \cdot I \quad (6-2)$$

Π ضریب پلتیر می‌باشد که با دمای فلز و ترکیبات مختلف تغییر می‌کند. به طور نمونه برای p-type سیلیکون، ضریب پلتیر زیر ۵۵۰ کلوین و برای n-type منفی می‌باشد. در واقع ضریب پلتیر نشان می‌دهد ماده‌ی موجود چه مقدار گرما بر واحد بار حمل می‌کند. در واقع وقتی جریان الکتریکی از نقطه اتصال دو فلز غیر همجنس عبور می‌کند، بسته به جهت جریان، نقطه اتصال آنها گرم شده یا سرد می‌شود و این پدیده کاملاً با پدیده‌ی گرم شدن هادی‌های الکتریکی در اثر عبور جریان از آنها، یعنی پدیده حرارتی ژول (RI^2) تفاوت دارد. طرح شماتیکی از اثر پلتیر در شکل ۸-۲ ملاحظه می‌گردد.

این اثر می‌تواند برای تولید یخچال برقی استفاده شود که اجزای فشرده ندارد و سیالی که در یک

^۱ Jean-Charles Peltier

سیکل عمل کند در آن وجود نخواهد داشت. قسمت‌های متحرک ندارد و در جاهایی که وزن مدنظر است، بیشتر کاربرد داشته ولی بازدهی کمی دارد.



شکل ۲-۸: اثر پلتیر در یک مدار الکتریکی [10]

۲-۲-۳- اثر تامسون

این اثر به وسیله‌ی لرد کلونین در سال ۱۸۵۱ پیش بینی و سپس مشاهده شد. اثر تامسون^۱، گرمایش و سرمایش رسانای حامل بار با گرادیان دما را توصیف می‌کند. هر رسانای حامل بار (به‌جز ابر رساناها) با اختلاف دما، بین دو نقطه، یا گرما را جذب می‌کند یا منتشر خواهد کرد. اگر یک چگالی جریان (J) از یک رسانای همگن عبور کند گرمای تولید شده q بر واحد حجم از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$q = \rho J^2 - \mu J \cdot \left(\frac{dT}{dx}\right) \quad (7-2)$$

که ρ مقاومت ویژه ماده‌ی مورد نظر و $\frac{dT}{dx}$ گرادیان دمایی که در سیم وجود دارد و μ ضریب تامسون می‌باشد. قسمت اول فرمول مربوط به گرمایش ژول می‌باشد که علامت آن تغییر نمی‌کند ولی قسمت دوم به گرمایش تامسون می‌باشد که با J تغییر علامت می‌دهد. در بعضی از فلزات مانند روی و مس، دما به

^۱ Thomson effect

طور مستقیم با پتانسیل الکتریکی تغییر می‌کند. وقتی که حامل‌های بار از سمت گرم به سمت سرد حرکت می‌کنند، گرما تولید می‌شود و این یک اثر تامسون مثبت می‌باشد. به طور معکوس در مواردی مانند نیکل، کبالت، آهن، که در آن‌ها دما به طور معکوس با پتانسیل تغییر می‌کند، وقتی حامل‌های بار از سر گرم به سر سرد می‌روند، جذب گرما اتفاق می‌افتد و اثر تامسون در اینجا منفی می‌باشد. اگر یک هادی همگن حامل جریان الکتریکی در معرض گرادیان دمایی قرار گیرد گرما را جذب یا آزاد (تولید) خواهد کرد و این گرما علاوه بر گرمای حاصل از پدیده ژول و مستقل از آن است و میزان این جذب یا تولید گرما بستگی به خواص فلزی و جهت جریان الکتریکی دارد. اثرات پلتیر و تامسون فقط با جذب یا تولید گرما سرو کار دارند و هیچگونه نیروی ترموالکتریکی تولید نمی‌کنند، زیرا در عمل جریانی که در یک مدار ترموالکتریک جاری می‌شود آنقدر کوچک است که از اثرات پلتیر و تامسون به‌عنوان منابع نیروی محرکه الکتریکی می‌توان صرف‌نظر کرد. از میان سه اثر ترموالکتریکی (سی بی، پلتیر و تامسون) فقط اثر سی بی منبع واقعی نیروی ترموالکتریکی است و در اندازه‌گیری دما توسط ترموکوپل‌ها از آن استفاده می‌شود.

اگر ضریب تامسون یک ماده در یک بازه دمایی گسترده اندازه‌گیری شود، می‌توان با انتگرال‌گیری از روابط تامسون، برای تعیین مقادیر مطلق ضرایب سی بی و پلتیر استفاده کرد.

سرب معمولاً ضریب تامسون برابر صفر دارد. هر چند غیر صفر هست ولی آنقدر کوچک می‌باشد که قابل صرف‌نظر کردن است. ضمناً ضرایب ترموالکتریک سایر ابررساناها برابر صفر می‌باشد [11].

۲-۳-۱- روابط تامسون

ضریب تامسون در میان ضرایب ترموالکتریک منحصربه‌فرد است زیرا این ضریب، به طور مستقیم به ازای هر فلز قابل اندازه‌گیری می‌باشد. ضرایب سی بی و پلتیر برای جفت مواد قابل اندازه‌گیری هستند.

بنابراین برای یک فلز هیچ روش مستقیمی برای تعیین ضرایب سی‌بک و پلتیر وجود ندارد.

در سال ۱۸۵۴ لرد کلوین روابطی بین این سه ضریب پیدا کرد که براین قضیه دلالت دارد که فقط یکی می‌تواند به صورت منحصر به فرد تعیین شود. رابطه‌ی اول تامسون به صورت زیر می‌باشد:

$$\mu = T \left(\frac{dT}{ds} \right) \quad (۸-۲)$$

که در آن μ ضریب تامسون و T دمای مطلق ماده و S ضریب سی‌بک می‌باشد.

رابطه‌ی دوم کلوین به صورت زیر است:

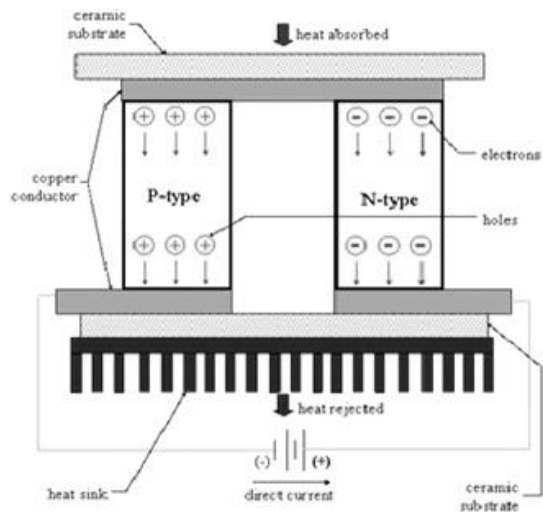
$$\Pi = S \cdot T \quad (۹-۲)$$

Π ضریب پلتیر می‌باشد. رابطه ۹-۲ اثر تامسون را قبل اینکه رسمی شود، پیش‌بینی کرد.

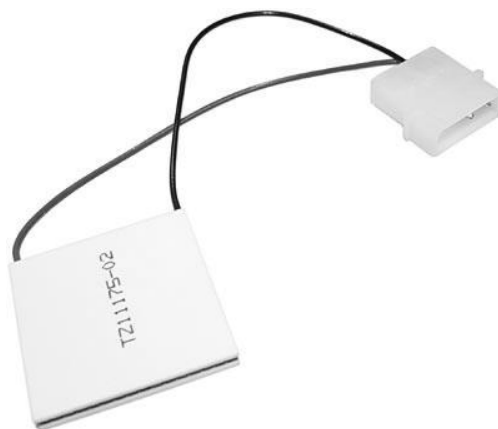
۲-۳- کاربرد ترموالکتریک

۲-۳-۱- اثر سرمایشی

وقتی ولتاژ DC به سیستم ترموالکتریک اعمال می‌شود حامل‌های بار منفی و مثبت در رشته قرص‌ها، انرژی گرمایی را از یک سطح لایه خروجی دریافت و آن را در سطح طرف دیگر آزاد می‌کنند. سطحی که انرژی گرمایی از آن جذب می‌شود سرد شده و سطح مخالف که انرژی گرمایی را دریافت می‌کند، گرم می‌شود. اثر سرمایشی ترموالکتریک در شکل ۹-۲ ملاحظه می‌شود. با استفاده از این روش ساده، "تلمبه گرمایی"، فن آوری ترموالکتریک در کاربردهای گسترده‌ای از قبیل خنک‌کننده‌های دیودی کوچک، یخچال‌های قابل حمل، سردکننده‌های مایع و غیره استفاده می‌شود. شکل ۱۰-۲ یک نمونه صنعتی ترموالکتریک سرمایشی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۹: مکانیزم حرکت حامل‌های بار در هنگام اتصال به منبع قدرت [12]



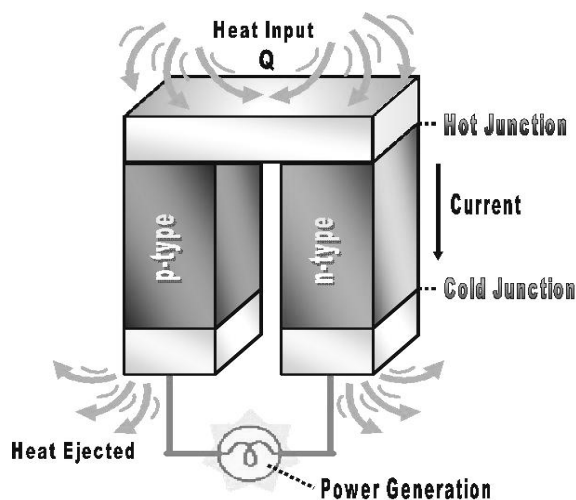
شکل ۲-۱۰: یک نمونه ترموالکتریک سرمایه‌گذاری [4]

۲-۳-۲- تولید توان

وقتی که یک منبع گرما فراهم شده باشد، ترموالکتریک به عنوان یک وسیله‌ی تولید توان^۱ به کار می‌رود. منبع گرمایی باعث تحریک الکترون‌های پایه‌ی n-type شده و آن‌ها را به سمت ناحیه سرد می‌کشاند و باعث ایجاد جریان در مدار می‌شود. بنابراین انرژی حرارتی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. با به کار

^۱ power generation

بردن طرحی که سی‌بک کشف کرد، مولدهای انرژی ترموالکتریک انرژی گرمایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. وقتی که اختلاف دما در اطراف یک وسیله ترموالکتریک تولید می‌شود یک ولتاژ DC دو سر ترمینال آن ایجاد می‌گردد و چنانچه یک بار به‌طور مناسب وصل شود جریان الکتریکی برقرار می‌گردد. کاربردهای این فن آوری شامل تأمین انرژی برای سیستم‌های مخابرات راه دور، دریاوردی و تأسیسات نفتی می‌باشد. نحوه عملکرد ترموالکتریک در حالت تولید توان در شکل ۱۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۲: عملکرد یک ترموالکتریک در حالت تولید توان [13]

۴-۲- اصول کار سیستم ترموالکتریک

یک سیستم ترموالکتریک معمولی از یک رشته قرص نیمه هادی تلوراید- بیسموت تشکیل گردیده است و به گونه‌ای تعبیه شده‌اند که یک نوع از حامل‌های بار (مثبت یا منفی) بخش زیادی از جریان را حمل نماید. زوجهای قرص N-P به گونه‌ای شکل داده شده‌اند که از نظر الکتریکی با هم سری ولی از نظر گرمایی با هم موازی می‌باشند. لایه‌های بیرونی سرامیکی آن‌ها فلزی شده تا بتواند سطح پوششی برای قرص‌ها ایجاد نموده و آن‌ها را از نظر الکتریکی به یکدیگر متصل نماید. به این ترتیب قرص‌ها و لایه‌های

بیرونی یک ساختار لایه‌ای را تشکیل می‌دهند. اندازه هر طرح ترموالکتریکی بین ۰/۲۵ در ۰/۲۵ اینچ مربع تا تقریباً ۲×۲ اینچ مربع تغییر می‌کند. طرح‌های ترموالکتریکی می‌توانند به صورت منفرد یا به صورت گروهی با اتصالات سری، موازی و یا سری - موازی به کار روند.

۲-۵- مقایسه فن آوری‌های مختلف سرمایشی

انتقال گرما توسط حامل‌های بار در یک وسیله ترموالکتریک خیلی شبیه به روشی است که خنک کننده‌های تراکمی، گرما را در یک سیستم مکانیکی انتقال می‌دهند. در سیستم خنک کننده‌ی تراکمی، سیال عامل گرما را از بار گرمایی به تبخیرکننده‌ای که در آن گرما می‌تواند پخش شود، انتقال می‌دهد. از طرف دیگر با استفاده از فن آوری ترموالکتریک، جریان مستقیم گردش، گرما را از بار گرمایی به گرماگیرهایی^۱ که گرما را به محیط بیرون انتقال می‌دهند، حمل می‌کند. هر طرح سیستم ترموالکتریک به تنهایی ظرفیت منحصر به فردی برای انتقال گرما بر حسب وات و یا Btu/h دارد. این ظرفیت می‌تواند تحت تاثیر عوامل بسیاری قرار گیرد. مهمترین متغیرها، دمای محدوده مشخصه‌های الکتریکی و فیزیکی طرح ترموالکتریکی به کار برده شده و بازدهی سیستم پخش گرما هستند. از کاربردهای معمول ترموالکتریک، پمپ بارهای گرمایی در محدوده‌ای از چندین میلی وات تا صدها وات می‌باشد.

۲-۶- مزایای سیستم ترموالکتریک

انتخاب فن آوری سرمایشی به نیازهای خاص هر کاربرد بستگی دارد، اما خنک کننده‌های ترموالکتریک فواید متفاوتی در مقایسه با سایر فن آوری‌ها دارند:

الف) خنک کننده‌های ترموالکتریک هیچ قسمت متحرکی ندارند و بنابراین مراقبت کمتری لازم دارند.

ب) محتوی کلروفلوروئید کربن یا مواد دیگری نیستند که نیاز به پرکردن مداوم داشته باشد.

^۱ Heat Sink

ج) کنترل دما تا جزئی ترین بخش‌های یک درجه به راحتی با سیستم ترموالکتریک ممکن است.

د) خنک کننده‌های ترموالکتریک در محیط‌هایی که خیلی مهم، خیلی حساس یا خیلی

کوچک هستند، جهت سرمایه‌ش استفاده می‌شوند.

و) عملکرد آنها بستگی به محل و موقعیت هندسی ندارند.

۷-۲- ضریب شایستگی

کمیتی است که برای توصیف عملکرد یک وسیله، سیستم، یا روش استفاده می‌شود. در علوم مهندسی

ضریب شایستگی^۱ اغلب، برای مواد یا وسایل خاصی تعریف می‌شود. در تجارت این قبیل اشکال به عنوان

ابزارهای بازاریابی استفاده می‌شود. ضریب شایستگی برای ترموالکتریک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z = \frac{\sigma S^2}{K} \quad (10-2)$$

که σ هدایت الکتریکی، K هدایت گرمایی و S ضریب سی‌بک می‌باشد.

این ضریب با ضرب کردن در دمای متوسط به صورت بی بعد در می‌آید:

$$\bar{T} = (T_1 + T_2) / 2 \quad (11-2)$$

هرچقدر ضریب شایستگی بیشتر باشد بازدهی ترمودینامیکی نیز بیشتر است به ویژه وقتی که دو

ماده‌ای که به هم کوپل می‌شوند، ضرایب مشابه‌ای داشته باشند. بنابراین این ضریب، روشی برای مقایسه

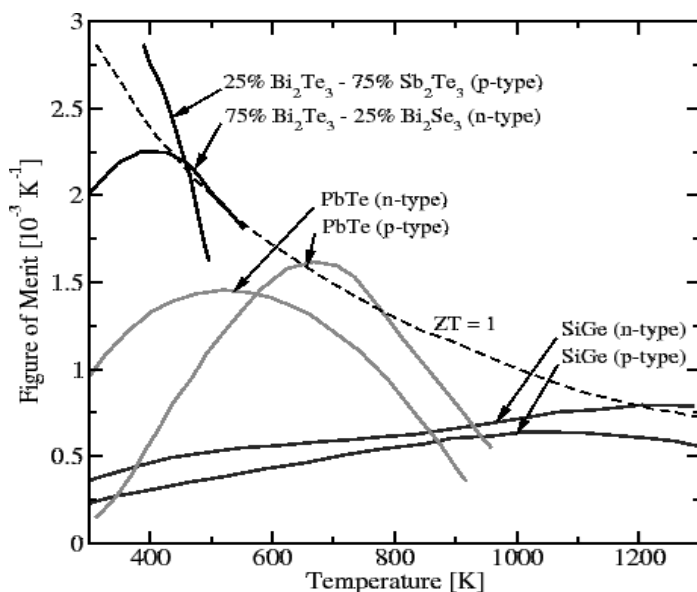
بازدهی پتانسیل وسایلی است که از مواد مختلف استفاده می‌کنند. مقادیر ۱ در ردیف خوب^۲ و مقدار ۳

^۱Figure of merit

^۲ Good

الی ۴ رنج ضروری برای ترموالکتریک می‌باشند تا با بقیه‌ی وسایل مکانیکی رقابت کند. امروز بهترین بازه برای ضریب شایستگی بین ۲ الی ۳ گزارش شده است [14-16]. نمودار ضریب شایستگی ترموالکتریک با مواد مختلف در شکل ۲-۱۲ ملاحظه می‌شود.

امروزه بیشتر تحقیقات در مواد ترموالکتریک بر روی ضرایب سی‌بک و هدایت الکتریکی می‌باشد که هدف بر این است که با استفاده از دستکاری در ساختار نانو مواد ترموالکتریک ضریب سی‌بک را افزایش و هدایت گرمایی را کاهش دهند.



شکل ۲-۱۲: نمودار ضریب شایستگی ترموالکتریک با مواد مختلف [17]

۲-۸- بازده

بازده ترموالکتریک برای برق یعنی η به صورت زیر بدست می‌آید:

η (انرژی حرارتی که در اتصال گرم جذب می‌شود) / (انرژی فراهم شده برای بار) = η

که مقدار بیشینه‌ی آن به صورت زیر است [18]:

$$\eta_{\max} = \left(\frac{\sqrt{1+Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1+Z\bar{T}} + \frac{T_C}{T_H}} \right) \left(\frac{T_H - T_C}{T_H} \right) \quad (12-2)$$

که T_H دمای اتصال گرم و T_C دمای اتصال سرد می‌باشد.

مقدار ضریب شایستگی بی بعد به صورت زیر بدست می‌آید:

$$Z\bar{T} = \frac{(S_p - S_n)^2 \bar{T}}{(\rho_n k_n)^{0.5} + (\rho_p k_p)^{0.5}} \quad (13-2)$$

در معادله ۲-۱۳، ρ مقاومت ویژه الکتریکی و \bar{T} دمای متوسط سطوح گرم و سرد می‌باشد. زیر نویس‌های n و p مربوط به نیمه هادی‌های مواد ترموالکتریک می‌باشد. اگر ترموالکتریک در موتور حرارتی به کار رود بازدهی آن محدود به بازدهی کارنو می‌شود و اگر این وسیله به صورت یخچال‌های ترموالکتریک به کار رود دارای عملکرد ۰/۳ تا ۰/۶ می‌باشند که حدود ۰/۱۶۷ مقادیر سنتی یخچال‌های فشرده ساز بخار می‌باشند [18].

۲-۹- منظور از گرما-توان چیست؟

اصطلاح گرما-توان^۱ یا توان ترموالکتریکی یک ماده، اندازه‌ی شدت ولتاژ ترموالکتریکی القا شده می‌باشد که در پاسخ به اختلاف دمای به وجود آمده در ماده، ایجاد شده است که واحد آن V/K یا $\mu V/K$ می‌باشد [11].

گرما-توان یک نام اشتباه می‌باشد زیرا ولتاژ یا پتانسیل الکتریکی محاسبه می‌شود نه توان الکتریکی. توجه شود که واحد آن متفاوت با واحد توان یعنی وات است.

^۱ Thermopower

۲-۹-۱- ساختار فیزیکی

به طور کلاسیک یک اختلاف دمای اعمال شده می‌تواند باعث تحریک حامل‌های بار در ماده شود. سپس این حامل‌های بار از سمت گرم به سمت سرد نفوذ پیدا می‌کنند. این انتقال حامل‌های بار تحریک شده به سمت سرد، باعث تحریک حفره‌های بی‌حرک در سمت گرم می‌شود و لذا باعث ایجاد ولتاژ ترموالکتریکی خواهد شد. جدایی حامل‌های بار باعث تولید یک میدان مغناطیسی شده که ایجاد حامل‌های بار در سمت سرد را متوقف می‌کند (چون یک تعادل در ماده به وجود می‌آید) و تنها افزایش اختلاف دما می‌تواند باعث از سرگرفتن تولید این حامل‌های بار در سمت سرد شود و بنابراین باعث افزایش ولتاژ می‌شود.

گرما-توان یک ماده، بستگی به دمای محیط و ساختار بلوری آن دارد. به طور نمونه فلزات گرما-توان پایینی دارند. الکترون‌ها و حفره‌ها (منظور حامل‌های بار مثبت) در ولتاژ القا شده شرکت دارند بنابراین حذف شرکت هر کدام از آنها باعث می‌شود ولتاژ القا شده کمتر باشد. علامت گرما-توان به وسیله‌ی حامل‌های بار تعیین می‌شود طوری که سهم هر کدام بیشتر باشد، علامت آن تعیین کننده‌ی علامت گرما-توان است. این مقدار برای ابررساناها برابر صفر است؛ چون حامل‌های بار هیچ آنتروپی حمل نمی‌کنند و از طرفی می‌توان گفت وقتی گرما-توان صفر می‌شود که هیچ ولتاژ محدودی در ابررسانا تولید نشود (به عنوان مثال بر طبق قانون اهم داریم که $V = RI$ و چون مقاومت R در ابررساناها صفر است لذا ولتاژ صفر است)

۲-۹-۲- علامت گرما-توان

علامت گرما-توان طبق رابطه‌ی ۲-۱۴ بدست می‌آید:

$$S = -\frac{V_{left} - V_{right}}{T_{left} - T_{right}} \quad (۱۴-۲)$$

که زیرنویس های left و right دو قسمت انتهایی ماده را نشان می دهد.

اگر S مثبت باشد سمتی که دمای بالاتری دارد، ولتاژ بیشتری داشته و بالعکس. میدان الکتریکی نیز در همان جهت گرادیان دمایی قرار دارد. برای موادی که به طور کل p-type هستند (فقط حامل های بار مثبت دارند)، میدان الکتریکی و گرادیان دما بایستی در یک سمت باشند (ضریب سی بک مثبت). همچنین برای موادی که به طور کل n-type هستند (مانند الکترون ها) یعنی حامل های بار منفی دارند، میدان الکتریکی و گرادیان دمایی بایستی در جهت مخالف هم باشند (ضریب سی بک منفی).

نکته ی مهمی که باید ذکر شود این است که مواد واقعی معمولا هر دو نوع بار را دارا هستند و علامت ضریب سی بک در آن ها به این بستگی دارد که کدام یک غالب تر هستند.

۲-۹-۳- اندازه گیری گرما-توان

در عمل، مقدار واقعی گرما-توان به ندرت اندازه گیری می شود و این به خاطر این است که الکترودهایی که به ولت متر وصل می شوند، بایستی بر روی ماده قرار داده شوند تا گرادیان دمایی یک ولتاژ ترموالکتریکی را القا کند (در یکی از پایه های ابزار اندازه گیری).

بنابراین این مقدار اندازه گیری شده، یک ترکیبی از گرما-توان ماده ی مورد نظر و ماده ی الکترودها اندازه گیری می باشد. این آرایش دوتا ماده معمولا به ترموکوپل معروف است. مقدار اندازه گیری شده از هر ماده به صورت زیر نوشته می شود:

$$S_{AB} = S_B - S_A = \frac{\Delta V_B}{\Delta T} - \frac{\Delta V_A}{\Delta T} \quad (۱۵-۲)$$

همان طوری که ذکر شد ابرسانها گرما-توان برابر صفر دارند، اگر از این مواد در ترموکوپل استفاده شود، می توان مقدار مطلق گرما-توان ماده ی موردنظر را بدست آورد.

۲-۱۰- ترموالکتریک از نوع تولید توان

ترموالکتریک های از نوع تولید توان، وسایلی هستند که به طور مستقیم، اختلاف دما را (با استفاده از اثر سی-بک) به جریان الکتریکی تبدیل می کنند. این مواد برای شروع نیاز به یک منبع قدرت دارند. به عنوان مثال برخی از فضاپیماها توسط یک ترموالکتریک رادیو اکتیو، توان مورد نیاز خود را تولید می کنند. به طوری که از اختلاف دما بین مواد رادیو اکتیو صفحه ی گرم و فضای خالی اطراف فضاپیما بهره می برند. بعضی محققین امیدوارند کاربرد این تراشه وسیع تر شود. بازده ای که به وسیله ی مواد ترموالکتریک بدست می آید بستگی به خواص مواد دارد و هرچقدر ولتاژ ترموالکتریکی القا شده برای یک گرادیان دمایی داده شده، بالا باشد، بازده نیز بالاتر است. مشکل اساسی در ترموالکتریک ها مقاومت بیرونی بالاست. بنابراین توان در طی عبور از این همه مقاومت تلف می شود. به همین دلیل برای رسیدن به ولتاژ بیرونی مشخص، به ضریب سی-بک بالایی نیاز داریم. همانطور که می دانیم ضریب سی-بک مواد رابطه ی معکوس با چگالی حامل های بار دارد. بنابراین نارساها تمایل به داشتن ضریب سی-بک بالایی دارند درحالی که فلزات به علت رسانندگی مقادیر پایینی دارند.

۲-۱۱- نمونه طرح‌های کاربردی

۲-۱۱-۱- مولد ترموالکتریکی خودرو^۱ (ATEG)

اگرچه ضریب سی‌بک در سال ۱۸۲۱ کشف شد، استفاده از ترموالکتریک تولید توان^۲ به طور عمده، تا نیمه‌ی دوم قرن ۲۱، محدود به ارتش امریکا و برنامه‌های فضایی آن بود. این محدودیت به دلیل بازدهی کم مواد ترموالکتریک در آن زمان بود.

در سال ۱۹۶۳ نخستین مولد (دینام) ترموالکتریکی خودروساخته شد و به وسیله‌ی نیلد^۳ گزارش شد. در سال ۱۹۸۸، بیرخولز^۴، نتایج کارش را بر روی پورشه^۵ منتشر کرد [19].

این تحقیق، نتایج یک مولد ترموالکتریکی اگزوزی^۶ را توصیف می‌کرد که در سمت گرم مبدل حرارتی از فولاد سخت و در سمت سرد مبدل حرارتی از آلومینیوم استفاده می‌شد. این مولد می‌توانست ده‌ها وات توان در سیستم اگزوز یک پورشه تولید کند [20]. نمونه‌ای از طرح مولد ترموالکتریکی در شکل ۲-۱۳ مشاهده می‌شود.

در اوایل ۱۹۹۰، شرکت Hi-Z یک مولد ترموالکتریکی خودرو را طراحی کرده است که از یک کامیون دیزلی ۱ کیلووات برق تولید نموده است. سپس یک شرکت مسئول، طرح‌های دیگری از یک کامیون دیزلی، مانند خودروهای نظامی را به بازار عرضه کرد. در اواخر سال ۱۹۹۰، نیسان موتور، نتایجی را منتشر کرد که در آن از سیلیسیوم-ژرمانیوم به عنوان ماده‌ی ترموالکتریک استفاده شده بود.

^۱ Automotive thermoelectric generation

^۲ Thermoelectric power generation

^۳ Neild.al

^۴ Birkholz

^۵ Porsche

^۶ Exhaust-based ATEG



شکل ۲-۱۳: نمونه‌ای از طرح ATEG در خودرو [21]

مولد ترموالکتریکی خودرو یک وسیله‌ای است که با استفاده از اثر سی‌بک، انرژی حرارتی تلف شده در یک موتور حرارتی احتراق داخلی را به جریان الکتریکی تبدیل می‌کند. یک نوع مولد ترموالکتریکی خودرو شامل چهار المنت اصلی می‌باشد که عبارتند از: سمت گرم مبدل حرارتی^۱، سمت سرد مبدل حرارتی^۲، مواد ترموالکتریک، و یک سیستم مونتاژ متراکم^۳. بر حسب سمت گرم مبدل می‌تواند به دو دسته تقسیم شود: یکی به صورت اگزوزی^۴ و دیگری به صورت سرمایشی^۵. مورد اول اتلاف حرارتی از اگزوز موتورهای احتراق داخلی را به جریان الکتریکی و دومی، انرژی حرارتی تلف شده سیال خنک کننده موتور را به الکتریسیته تبدیل می‌کند. طرح شماتیک یک مولد ترموالکتریک در شکل ۲-۱۴ ملاحظه می‌شود.

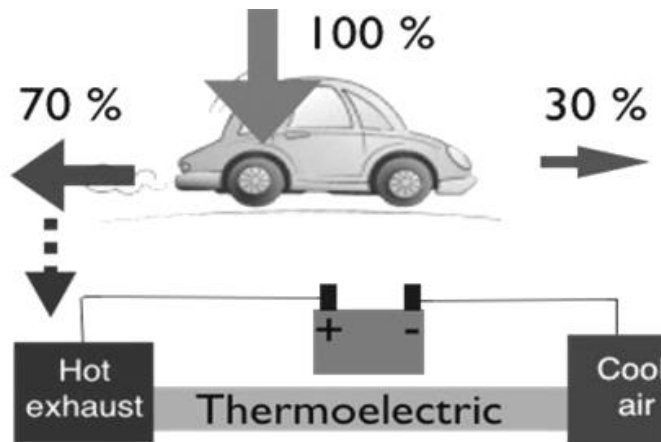
^۱ Hot side Heat exchanger

^۲ Cold side Heat exchanger

^۳ Compression assembly system

^۴ Exhaust-based

^۵ Coolant-based



شکل ۲-۱۴: شماتیک یک سیستم ATEG [21]

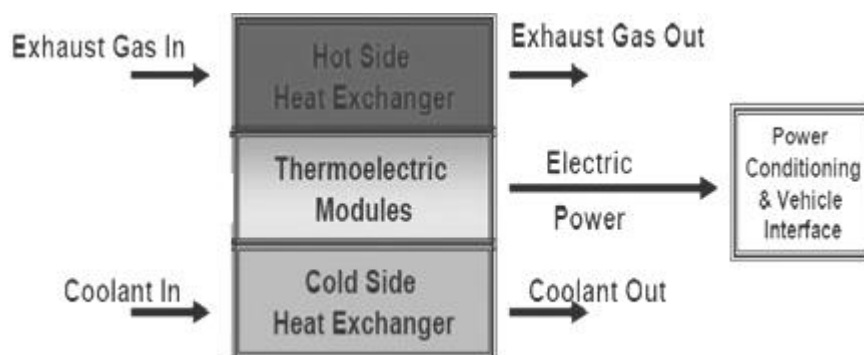
۲-۱۱-۱-۱- اصول عملکرد

در دینام ترموالکتریکی خودرو، مواد سازندهی ترموالکتریک بین سمت گرم و سرد مبدل‌های حرارتی دارند. مواد ترموالکتریک از نیمه هادی‌های n-type و p-type ساخته شده‌اند در حالی که مبدل‌های حرارتی از صفحات فلزی با رسانندگی گرمایی بالا می‌باشند [22].

اختلاف دمایی که بین دو سطح مبدل‌های ترموالکتریک وجود دارد با استفاده از اثر سی‌بک، جریان الکتریسیته تولید می‌کنند. وقتی که گازهای خروجی از موتور از یک دینام ترموالکتریکی اگزوزی عبور می‌کنند، حامل‌های بار نیمه هادی‌ها در داخل آن از سمت گرم به سمت سرد مبدل نفوذ خواهند کرد. نتیجه‌ی این حرکت بارها یک پتانسیل الکتروستاتیکی می‌باشد، تازمانی که انتقال حرارت باعث ایجاد یک جریان شود [23].

با توجه به اینکه دمای گازهای خروجی ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد (۱۳۰۰ درجه فارنهایت) می‌باشد، اختلاف دما بین گازهای خروجی در سمت گرم و ماده‌ی موجود در سمت گرم چند صد درجه است [24]. این اختلاف دما قادر به تولید ۵۰۰-۷۰۰ وات توان الکتریکی می‌باشد [25]. هدف سیستم مونتاژ متراکم،

کاهش مقاومت تماسی حرارتی بین مدول‌های ترموالکتریک و سطح مبدل حرارتی می‌باشد. در دینام ترموالکتریکی خودرو از نوع سرمایشی، سمت سرد مبدل حرارتی از ماده سردساز خودرو به عنوان یک سیال خنک‌کننده استفاده کرده، در حالی که در نوع آگزوزی، در سمت سرد مبدل حرارتی از هوای محیط استفاده می‌کند. شکل ۲-۱۵ طرح یک مولد ترموالکتریکی از نوع آگزوزی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۵: طرح یک سیستم Exhaust-based ATEG [21]

۲-۱۱-۱-۲- بازده

به‌طور معمول بازدهی دینام ترموالکتریکی خودرو حدود ۵ درصد می‌باشد. هرچند پیشرفت‌ها در زمینه‌ی تکنیک‌های صفحات فتوولتائیک نواری^۱ و چاه کوانتومی^۲ می‌تواند در آینده بازده را به ۱۵ درصد افزایش دهد [26].

بازدهی یک دینام ترموالکتریکی خودرو به‌وسیله‌ی بازدهی تبدیل ترموالکتریک و بازدهی حرارتی دو مبدل بدست می‌آید که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{OV} = \eta_{CONV} \cdot \eta_{HX} \cdot \rho \quad (16-2)$$

که η_{OV} ، بازدهی کلی دینام ترموالکتریکی خودرو و η_{CONV} ، بازدهی تبدیل ترموالکتریک، η_{HX} بازدهی

^۱ thin-film

^۲ quantum well

حرارتی مبدل و ρ ، نسبت بین گرمایی که از مواد ترموالکتریکی عبور می کند به مقدار گرمایی که از سمت گرم به سمت سرد می رود.

۲-۱۱-۱-۳- فواید

هدف اصلی دینام ترموالکتریکی خودرو کاهش مصرف سوخت می باشد. ۴۰ درصد انرژی یک موتور احتراق داخلی به وسیله گرمای گازهای حاصل از احتراق از آگزوز به هدر می رود [27].

به منظور تبدیل اتلاف حرارتی به جریان الکتریکی دینام ترموالکتریکی خودرو، مصرف سوخت را به وسیله کم کردن تولید جریان الکتریکی موتور، کاهش می دهد. دینام ترموالکتریکی خودرو باعث می شود که خودرو به جای استفاده از یک دینام که به وسیله انرژی مکانیکی برق تولید می کند، از انرژی حرارتی موتور برای تولید برق استفاده نماید. از آنجا که جریان الکتریکی از اتلاف انرژی گرمایی بدست می آید، (که در غیر این صورت به محیط زیست هدر می رفت) موتور سوخت کمتری را برای تولید توان و رساندن آن به اجزای خودرو (مانند چراغ های عقب و جلو) مصرف کرده و بنابراین خودرو آلاینده کمتری را به محیط زیست وارد می کند [28].

از طرفی کاهش مصرف سوخت، صرفه جویی اقتصادی را در پی خواهد داشت. به جای استفاده از دینام معمولی، اگر از دینام ترموالکتریکی خودرو استفاده کنیم سرانجام در میزان هزینه سوخت صرفه جویی می شود [29]. توانایی تولید برق بدون استفاده از قطعات متحرک یک مزیت نسبت به ژنراتورهای الکتریکی معمولی می باشد.

۲-۱۱-۱-۴- معایب

الف) از آنجایی که گازهای خروجی از آگزوز از مبدل حرارتی عبور می کنند، انرژی جنبشی خود را از

دست داده و این امر باعث افزایش تلفات مکش^۱ می‌شود که تحت عنوان فشار برگشتی^۲ بیان شده که عملکرد موتور را کاهش می‌دهد [27].

ب) به منظور ایجاد بازدهی بیشتری از این دینام، ماده‌ی سرد کننده بایستی در سمت سرد مبدل حرارتی استفاده شود (به‌جای استفاده از هوای محیط). به‌همین دلیل اختلاف دما در روزهای سرد و گرم یکسان شده و این امر باعث افزایش اندازه‌ی رادیاتور می‌شود. از آنجا که لوله‌کشی بایستی تا منیفولد گازهای خروجی ادامه یابد، این قضیه همچنین باعث تحمیل بار اضافی رادیاتور می‌شود زیرا گرمای بیشتری باید به سیال خنک کننده انتقال یابد [29].

ج) دینام ترموالکتریکی خودرودر ابتدا از فلز ساخته شده است. بنابراین در وزن وسیله‌ی نقلیه سهم دارد. این دینام برای ماشین‌های کوچک و کامیون‌ها وزنی حدود ۵۶/۶۹ کیلوگرم (۱۲۵ پوند) دارد. درحالی‌که برای کامیون‌های بزرگ ۱۱۳/۳۹ کیلوگرم می‌باشد. وزن اضافی روی موتور سبب می‌شود موتور سخت‌تر کار کند در نتیجه مسافت پیموده شده به ازای واحد سوخت خودرو کمتر می‌شود.

د) هزینه^۳ یک موضوع رایج در دینام ترموالکتریکی خودرو می‌باشد. ترموالکتریک‌ها با راندمان بالاتر نیاز به کیفیت بالاتر و لذا نیاز به مواد ترموالکتریکی با کیفیت بهتری دارند و چون این مواد گران هستند، هزینه‌ی اولیه بالا می‌رود. با توجه به سیکل گرمایشی و ارتعاشات وسیله‌ی نقلیه، طول عمر ژنراتور (دینام) دارای اهمیت می‌باشد. و به طور کلی می‌توان گفت گرچه مواد ترموالکتریک با کیفیت بالاتر، جریان الکتریکی بیشتری تولید می‌کنند، اما هزینه‌ی تعویض آنها می‌تواند از صرفه‌جویی در مصرف سوخت سنگین‌تر شود و این نیاز به برآورد دقیق اقتصادی دارد [22].

^۱ Pumping

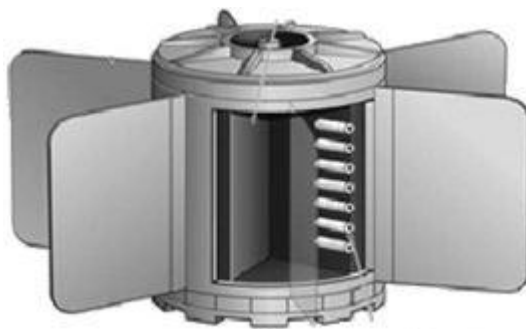
^۲ Back pressure

^۳ Cost

۲-۱۱-۲- ژنراتور ترموالکتریکی رادیواکتیو^۱

یک ژنراتور ترموالکتریکی رادیواکتیو یک ژنراتور الکتریکی می‌باشد که از تجزیه مواد رادیواکتیو، توان تولید می‌کنند. در این قبیل وسایل، گرمای آزاد شده به‌وسیله‌ی واپاشی یک ماده رادیواکتیو مناسب، با استفاده از اثر سی‌بک و با کمک ترموکوپل، به جریان الکتریکی تبدیل می‌شود. طرح شماتیکی از یک ژنراتور ترموالکتریکی رادیواکتیو در شکل ۱۶-۲ مشاهده می‌شود.

ژنراتورهای ترموالکتریکی رادیواکتیو به‌عنوان منابع قدرت در ماهواره‌ها و سفینه‌های فضایی و وسایل کنترل از راه دور، (مانند هواپیماهای بدون سرنشین) کاربرد دارد. این ژنراتورها معمولاً مطلوب‌ترین منبع قدرت برای ربات‌ها و وسایل کنترل از راه دور که نیاز به چند صد وات (یا کمتر) دارند، استفاده می‌شود. همچنین در جاهایی که امکان استفاده از سلول‌های خورشیدی وجود ندارد، کاربرد دارند.



شکل ۱۶-۲: یک RTG با مولدهای ترموالکتریک [30]

۲-۱۱-۲-۱- طراحی یک ژنراتور ترموالکتریکی رادیواکتیو

طراحی یک ژنراتور ترموالکتریکی رادیواکتیو به‌وسیله‌ی استانداردهای تکنولوژی هسته‌ای کار ساده‌ای می‌باشد. جز اصلی آن محفظه‌ی بسیار محکم از یک ماده‌ی رادیواکتیو (به‌عنوان سوخت) است. ترموکوپل‌ها در دیواره‌های محفظه قرار داده می‌شود و انتهای بیرونی هر یک از این ترموکوپل‌ها به چاه

^۱ Radioisotope Thermoelectric generation

حرارتی متصل شده است. تجزیه‌ی مواد پرتوزای سخت، گرمایی تولید می‌کند که از ترموکوپل عبور کرده و به چاه حرارتی می‌رسد و در نتیجه در این فرآیند جریان الکتریکی تولید می‌شود. ترموکوپل، یک وسیله‌ی ترموالکتریکی است که انرژی گرمایی را به طور مستقیم با استفاده از اثر سی‌بک به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. از دو ماده یا نیمه‌هادی ساخته شده است که هر دو رسانای جریان برق می‌باشند. این دو ماده به صورت یک حلقه‌ی بسته به یکدیگر متصل می‌باشند. اگر دو اتصال در دماهای مختلف باشند یک جریان الکتریکی در حلقه برقرار می‌شود.

۲-۱۱-۳- تولید برق به وسیله‌ی ترموالکتریک از کلکتورهای خورشیدی سقفی

در دو دهه‌ی اخیر، مرکز تحقیقات علمی ساختمان‌ها^۱ پیشنهادی در مورد کاهش میزان گرمایی که به وسیله‌ی سقف ساختمان جذب می‌شود، داده است که در این پیشنهاد از کلکتورهای خورشیدی سقفی^۲ استفاده می‌شود. هدف این طرح افزایش تهویه مطبوع طبیعی این ساختمان‌ها می‌باشد [31-35]. در راستای این پیشنهاد مرکز، سری مقالاتی در جهان منتشر شد که از کلکتورهای سقفی استفاده شده است [36]. کلکتورهای سقفی پرتو تابشی را جذب می‌کند و باعث ایجاد یک تهویه مطبوع طبیعی شده و آن هم باعث جلوگیری از تراکم گرما در خانه یا اتاق‌های زیر شیروانی می‌شود.

مانیوان^۳ و خداری^۴ مطالعات جدیدی مبنی بر ترکیب کلکتورهای خورشیدی سقفی و ترموالکتریک در منازل مسکونی، تحت عنوان کلکتورهای خورشیدی سقفی-ترموالکتریک^۵ انجام داده‌اند. تابش خورشید بر روی کلکتورها باعث افزایش دمای صفحه‌های مسی شده و اختلاف دما در دو سمت ترموالکتریک، باعث ایجاد توان الکتریکی می‌شود. این توان تولیدی صرف حرکت یک فن محوری جریان مستقیم شده، لذا

^۱ BSRC

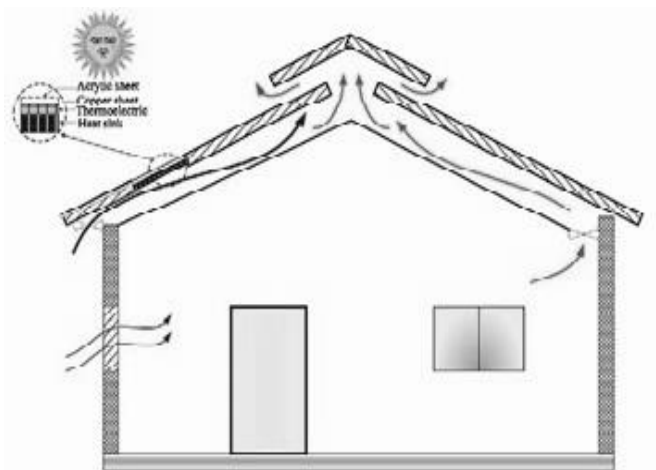
^۲ Roof solar collector(RSC)

^۳ Maneewan

^۴ Khedari

^۵ TE-RSC

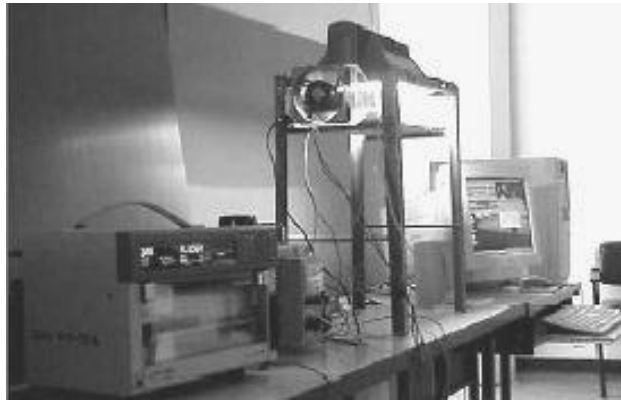
باعث سرمایش سمت سرد ترموالکتریک گردیده و در نهایت باعث افزایش تهویه مطبوع داخلی می‌گردد. بقیه‌ی این توان می‌تواند در باتری‌خانه ذخیره شده و در شب از آن استفاده گردد. شماتیک این طرح در شکل ۱۷-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۷-۲: طرح شماتیک یک TE-RSC برای تهویه مطبوع [37]

همانطور که در شکل ۱۸-۲ ملاحظه می‌کنید، مانیوان و خداری یک سیستم آزمایشگاهی را ساخته و مورد آزمایش قرار دادند. سیستم تجربی‌شان شامل یک کلکتور سقفی و ترموالکتریک، یک ورقه‌ی شفاف اکریلیکی، شکاف هوایی، صفحه‌ی مسی و مدول‌های ترموالکتریک بود. به طوری که سمت گرم این مدول‌ها به طور مستقیم به صفحه‌ی مسی (که به عنوان یک جاذب عمل می‌کند) و سمت سرد آن به یک پره^۱ مستطیلی (که به عنوان یک چاه حرارتی عمل می‌کند) متصل شده بود. اندازه‌ی این سیستم آزمایشگاهی، $145 \times 350 \text{mm}^2$ بوده و از ده ترموالکتریک از نوع (Tianjin lantian TEc1-12708) استفاده کرده‌اند [37].

^۱ Fin



شکل ۲-۱۸: تجهیزات آزمایشگاهی [37]

آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش شدت تابشی سطح کلکتورهای صاف، گرمای بیشتری را جذب کرده و دمای سمت گرم مدول‌های ترموالکتریک افزایش پیدا کرده، درحالی‌که دمای سمت سرد، تغییر چندانی ندارد. و این باعث اختلاف دمای بیشتر در دو سمت این وسیله شده و لذا توان بیشتری تولید می‌شود. افزایش توان نیز باعث افزایش سرعت هوا و لذا باعث ایجاد هوای مطبوع خواهد شد. همچنین در شدت تابشی ۸۰۰ وات بر متر مربع و در دمای محیط ۳۵-۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد توانستند ۱/۲ وات از ترموالکتریک‌ها استخراج کنند. این مقدار توان قادر به چرخش فن جریان محوری و ایجاد هوای مطبوع در اتاق‌های کوچک زیر شیروانی بود [37].

راهکار پیشنهادی برای استخراج الکتریسیته از گرما در طرح این پایان‌نامه، به‌کارگیری مولدهای ترموالکتریک می‌باشد. از جمله مزیت‌های این راه‌حل عدم نیاز به اجزای متحرک مکانیکی می‌باشد که علاوه بر بی سروصدا بودن، اطمینان به کارکرد تجهیزات به‌کار رفته را افزایش می‌دهد و همچنین عمر مفید بالای ۵ سال را برای مولد تضمین می‌کند. برای خنک‌کاری سمت سرد ترموالکتریک، به‌جای استفاده از جریان هوای آزاد از جریان آب سرد استفاده می‌شود. همچنین به‌جای به‌کارگیری از کلکتورهای متداول خورشیدی از لنز فرزنل استفاده می‌شود. دلیل به‌کارگیری این لنزها، سبکی آنها نسبت به لنزهای شیشه‌ای متداول و همچنین ارزان‌تر بودن آنها می‌باشد.

۳- فصل سوم

لنز فرزنل

۳-۱- مقدمه

لنز فرزنل به وسیله‌ی یک فیزیکدان فرانسوی بنام آگوستین فرزنل^۱ در سال ۱۸۲۲ اختراع شد. او یک اختریاب در برج دریایی بود. این لنز از وسایل بسیار پیش پا افتاده ساخته شده بود که در سواحل اروپا و آمریکای شمالی یافت می‌شد. اغلب لنزها در آن زمان به صورت دستی در فرانسه و بقیه در کشور انگلستان ساخته شده بودند. طرح لنزهای اولیه به یک کندوی عسل، اما شیشه‌ای شباهت داشته که در مرکز آن یک لامپ به‌عنوان منبع نور وجود داشت. نمونه‌ای از این نوع لنز در شکل ۳-۱ ملاحظه می‌گردد. این لنز در بالا و پایین قسمت استوانه‌ای خود، حلقه‌های هم محور از شبکه‌های بلوری داشت که قادر بود نور را به صورت یک باریکه به اطراف منعکس کند. طراحی‌های اخیر نشان می‌دهد که در مرکز این لنزها یک طرحی از "مرکزهدف"^۲ ایجاد کرده‌اند که لنز را شبیه یک عدسی کرده و قدرت آن را در متمرکز کردن نور خورشید، افزایش می‌دهند [38].



شکل ۳-۱: نمونه‌ی اولیه یک لنز فرزنل [38]

^۱ Augustin fresnel

^۲ Bull eye

۲-۳- روند تغییرات شکل هندسی لنز فرزنل

لنزهای فرزنل اولیه شکل و طراحی استاندارد داشتند، اما یک انحراف اپتیکی کوچکی در قسمت بالای آن وجود داشت و آن هم ایجاد یک تصویر در قسمت بالایی آن بود. فانوس خانه‌ها یک چراغ دریایی نفتی داشتند که از تاریکی شب تا صبح دائماً روشن بود و هیچ چشمکی نمی‌زد. از آنجایی که با روشن شدن این فانوس‌های دریایی، نورهایی که از کشتی‌های دیگر ساطع می‌شد قابل شناسایی نبود، طرح‌های دیگری برای ساخت یک لنز با قابلیت‌های بالا صورت گرفت. به طور کلی لنزهای زیادی در رده‌های مختلف وجود دارد. بزرگترین لنز، اولین رده^۱ از لنزهای فرزنل را به خود اختصاص داده، که از چند صد شبکه‌ی منشوری تشکیل شده است. هر چقدر به رده‌های این لنزها افزوده می‌شود، از بزرگی آنها کم خواهد شد. شبکه‌های منشوری، نور را از منبع به طور افقی به بیرون هدایت می‌کنند. در این روش، نور به صورت یک باریکه‌ی خطی به همگی جهات منحرف شده و تمامی اطراف ساحل را روشن می‌کند. تعداد این شبکه‌های منشوری به شکل‌بندی این شبکه‌ها بستگی دارد. اما مهمترین مزایای این لنزها، شدت نور بالای آنها بود. وقتی این لنز در ۱۰۰ فوتی (۳۰/۴۸ متری) بالای سطح دریا قرار می‌گرفت، قادر بود تا ۱۸ مایلی (۱۶۰/۹۳ کیلومتر) دریا را روشن سازد [38].

۳-۲-۱- نحوه‌ی عملکرد

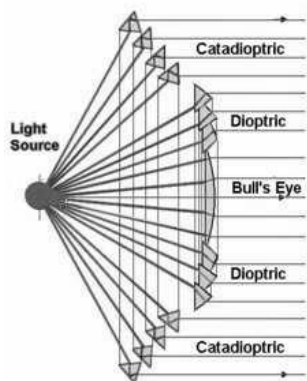
شکل ۲-۳ به صورت هندسی نشان می‌دهد که لنز فرزنل چگونه کار می‌کند. برای منحرف کردن و متمرکز کردن پرتوها به صورت یک باریکه‌ی نوری، از سه بخش تشکیل شده است. بخش اول منشورهای کاتادیپتريک^۲ می‌باشد که هم به صورت انعکاسی و هم انعکاسی عمل می‌کند. قسمت دوم مربوط به شبکه‌های منشوری دیپتريک^۳ بوده و بخش سوم مربوط به لنزهای مرکز هدف است. با تابش یک لامپ

^۱ Order

^۲ Catadioptric

^۳ Dioptric

۱۰۰۰ واتی لنز فرزنل از رده‌ی اول قادر است ۶۸۰۰۰۰ پرتو نور را تا ۲۱ مایلی (۳۳/۷۹ کیلومتر) دریا منعکس کند [39].



شکل ۳-۲: نحوه‌ی عملکرد لنز فرزنل [39]

لنزهای فرزنل به هفت رده طبقه‌بندی می‌شوند. جدول ۱-۳، قطر و ارتفاع این نوع لنزها را نشان می‌دهد. اولین لنز، بزرگترین گونه‌ی آن می‌باشد که در چراغ‌خانه‌های سواحل دریا استفاده‌ی وسیعی دارد. لنزهای کوچکتر در فانوس‌خانه‌های کوچکتر مانند فانوس‌خانه‌های موج شکن^۱، نصب می‌شوند [38].

جدول ۱-۳: مرتبه بندی لنزهای فرزنل [38]

رده	ارتفاع (متر)	قطر داخلی (متر)
اول	۲/۱۶۴	۱/۸۵۹
دوم	۱/۸۶	۱/۴۳۲
سوم	۱/۴۶۳	۱/۰۰۵
چهارم	۰/۷۳۱	۰/۵۴۸
پنجم	۰/۵۴۸	۰/۳۹۶
ششم	۰/۴۵۷	۰/۳۰۴

^۱ Breakwater

الف) رده اول

نخستین نمونه‌ی لنزهای فرزنل از رده‌ی اول در فانوس‌خانه‌های داخلی دی لئون^۱ نزدیک سواحل دایتونا^۲ در فلوریدا یافت شد. این لنزها بسیار غول‌پیکر بوده و وزنی برابر ۳ تن و ارتفاعی حدود ۱۱ فوت (۳/۳۵ متر) دارند. از ۱۰۰۰ شبکه‌ی منشوری تشکیل شده و بیشتر برای سواحل مه‌آلود به کار برده می‌شوند [38]. نمونه‌ای از این نوع لنز در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳: نمونه‌ای از یک لنز فرزنل از رده اول [38]

ب) رده‌ی دوم

در این نوع لنزها از روش مرکز هدف یا چشم مرکزی استفاده شده است [38]. شکل ۳-۴ یک لنز فرزنل از رده‌ی دوم را نشان می‌دهد.

^۱ De Leon

^۲ Daytona



شکل ۳-۴: یک لنز فرزنل از رده دوم [38]

ج) رده‌ی سوم

همانطور که در شکل ۳-۵ مشاهده می‌کنید، این لنزهای فرزنل در جای خود ثابت بوده و حول محور خود نمی‌چرخند. تعدادی از این لنزها در موزه‌ی میشیگان یافت می‌شود [38].



شکل ۳-۵: نمونه‌ای از لنز فرزنل از رده سوم [38]

د) رده‌ی چهارم

این لنز در واحدهای صنعتی بسیار پرکاربرد بوده و در دریاچه‌های بزرگ به خصوص دریاچه‌ی میشیگان استفاده می‌شود. در بیشتر لنگرگاه‌های سواحل کنار اقیانوس‌ها از این نوع لنز استفاده می‌شود [38]. نمونه‌ای از این نوع لنز در شکل ۳-۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۶: یک لنز فرزنل از رده چهارم [38]

ه) رده‌ی پنجم

این لنز از رده‌ی پنجم و متعلق به فانوس‌خانه‌ی اونتاناگون^۱ می‌باشد. این لنز باعث تغییر رنگ نور و انتشار نور قرمز می‌شود [38]. شکل ۳-۷ یک لنز فرزنل از رده‌ی پنجم را نشان می‌دهد.

^۱ Ontanagon



شکل ۳-۷: یک لنز فرزنل از رده پنجم [38]

و) رده‌ی ششم

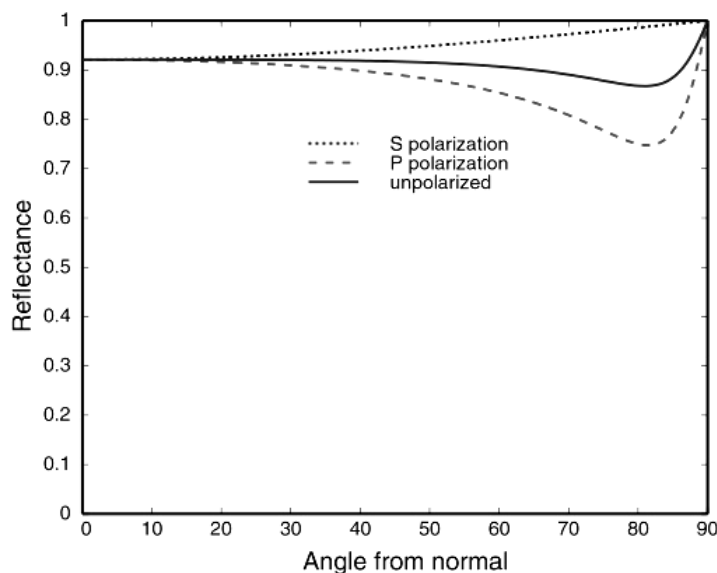
این نوع لنز کوچکترین لنز ساخته شده در فانوس‌خانه‌هاست. که برای روشنایی در ایستگاه‌های دریایی یا لنگرگاه‌های کوچک کاربرد دارد [38]. نمونه‌ای از نوع لنز در شکل ۳-۸ مشاهده می‌گردد.



شکل ۳-۸: نمونه‌ای از یک لنز فرزنل از رده ششم [38]

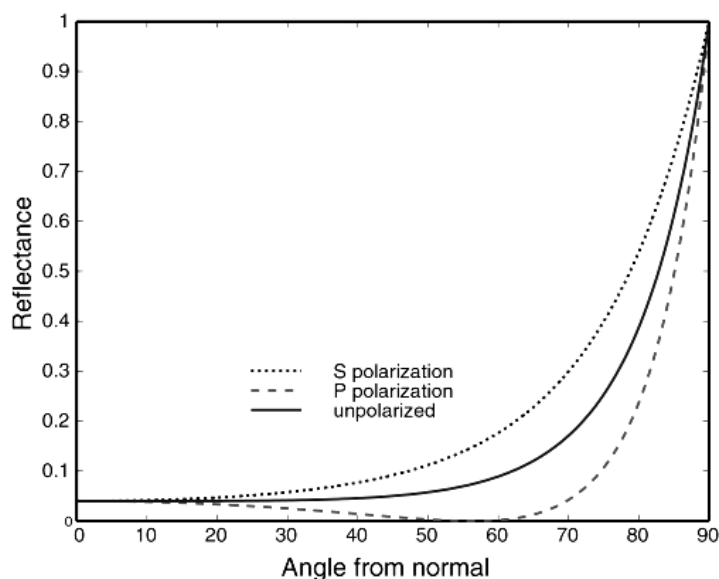
استفاده از لنزهای اولیه به دلیل داشتن ابعاد بزرگ و وزن زیاد محدود به صنایع خاص مانند صنایع دریایی بود. به مرور زمان و با تولید پلاستیک‌های مدرن، تکنیک مدلسازی جدید و دستگاه‌های تراشکاری پیشرفته در ساختار هندسی و اپتیکی فرزنل‌ها تغییراتی در جهت بهبود کارایی این لنزها صورت گرفت.

آگوستین فرزنل یکی از طرفداران انتشار نور از تئوری موج، فرمولی برای پیش‌بینی رفتار انعکاسی سطوح صاف بدست آورد که هنوز هم در تئوری امواج استفاده می‌شود. این فرمول به ضریب شکست سطح (مرکب) و زاویه تابش آن بستگی دارد. برای مواد رسانا (مانند فلزات)، ضریب بازتاب فرزنل به صورت آرام و با تغییرات اندک همراه است. به عنوان مثال برای آلومینیوم، این ضریب برای تمامی زوایای تابش 0.86 باقی می‌ماند [40]. نمودار ضریب تابش فلزات در شکل ۳-۹ مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۹: نمودار ضریب تابش در فلزات [40]

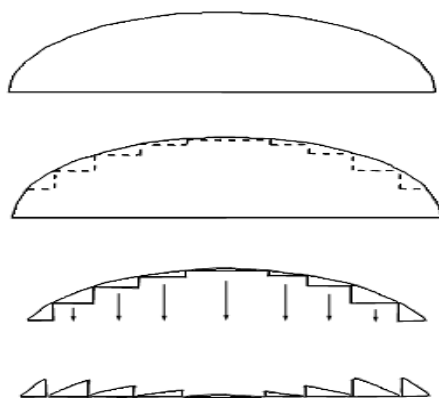
برای مواد عایق (نارسانا)، تاثیرات ضریب خیلی زیاد و محسوس می‌باشد. بیشتر شیشه‌ها و پلاستیک‌ها شاخص بازتابی حدود $1/5$ دارند و این به خاطر داشتن سطوح صیقل در فلزات و فقدان آن در نافلزات می‌باشد [40]. شکل ۳-۱۰ نمودار ضریب تابش در غیرفلزات را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۰: نمودار ضریب تابش در غیرفلزات [40]

۳-۳- نسل جدید لنزهای فرزنل

این لنزهای فرزنل بسیار سبک و باریک می‌باشند. مدل اپتیکی آن شامل یک سری از شیارهای متحدالمرکز باریک و کوچکی می‌باشد که روی سطح یک ورقه‌ی پلاستیکی با وزن سبک به منظور کاهش وزن، هزینه و ضخامت، قرار دارد. هر شیار با اندکی تغییر زاویه نسبت به شیار قبلی، اما با همان فاصله‌ی کانونی ساخته شده‌است تا بتواند نور را به سمت کانون منعکس کند. هر کدام از این شیارها می‌تواند به عنوان یک لنز انفرادی کوچک، پرتوهای موازی گسیل شده به لنز را متمرکز کند. در واقع در روش فرزنل با ایجاد شیارهای حساب شده بر سطح یک ورق شفاف می‌توان پدیده شکست نور گذرنده بر ورق نام‌برده را به گونه‌ای مدیریت نمود که ورق شفاف، رفتاری همچون یک عدسی با مشخصات اپتیکی معین داشته باشد [41]. روش ساخت لنز فرزنل در شکل ۳-۱۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۱۱: روش ساخت لنز فرزنل [41]

لنز فرزنل از انواع پلاستیک‌ها، مانند لنز فرزنل اکریلیکی، پلی واینیل کلوراید^۱، پلی کربنات^۲، پلی متیل متاکریلیت^۳ ساخته شده است. عدسی‌های محدب شیشه‌ای سنتی بسیار ضخیم، سنگین، و خیلی گران بودند، اما لنزهای فرزنل پلاستیکی نازک، با وزن سبک و هزینه‌ی ساخت پایینی می‌باشند. هرچقدر تراکم این شیارها بیشتر باشد، کیفیت تصویر ایجاد شده نیز بیشتر است. در شکل ۳-۱۲ نمونه‌ای از لنز فرزنل با ویژگی‌های اپتیکی بالا برای استفاده در سیستم‌های خورشیدی مشاهده می‌شود [41].

^۱ Polyvinyl Chloride

^۲ Polycarbonate

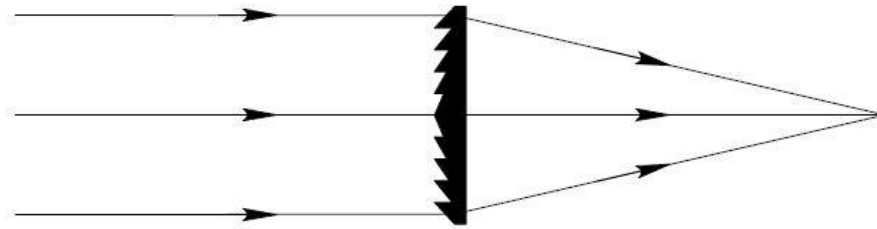
^۳ Polymethylmetacrylate



شکل ۳-۱۲: نمونه‌ای از لنز فرزnel نسل جدید [41]

۳-۳-۱- انواع لنز فرزnel

انواع لنزهای فرزnel عبارتند از، لنز فرزnel با فاصله‌ی کانونی مثبت^۱ که هم به عنوان یک کلکتور عمل می‌کند و هم به عنوان یک کلیماتور، لنز فرزnel با فاصله‌ی کانونی منفی^۲، مجموعه ردیف‌ها یا آرایه‌هایی از لنزهای فرزnel^۳، لنز فرزnel استوانه‌ای، لنز فرزnel دایره‌ای، عدسی فرزnel، لنز فرزnel انکساری و لنز فرزnel انعکاسی، می‌باشند [41]. شکل‌های ۳-۱۳ تا ۳-۱۸ انواع لنزهای فرزnel را نشان می‌دهند.

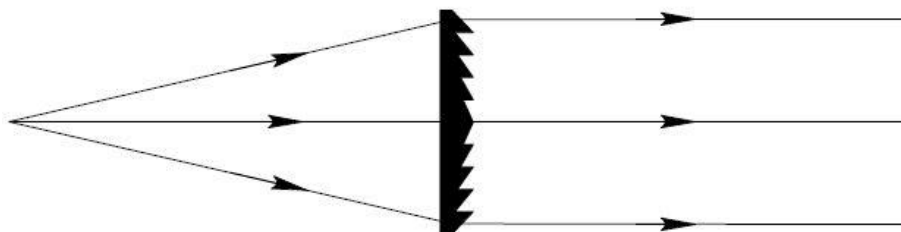


شکل ۳-۱۳: طرح یک لنز فرزnel با فاصله کانونی مثبت که به عنوان یک کلکتور عمل می‌کند. [42]

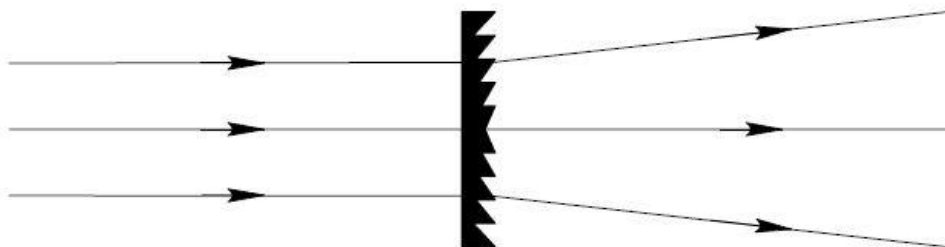
^۱ Positive Fresnel lens

^۲ Negative Fresnel lens

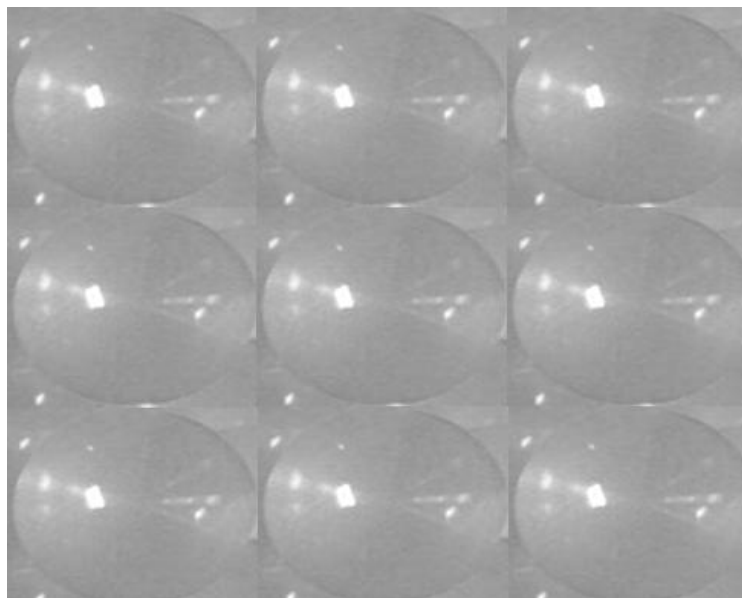
^۳ Fresnel lens Array



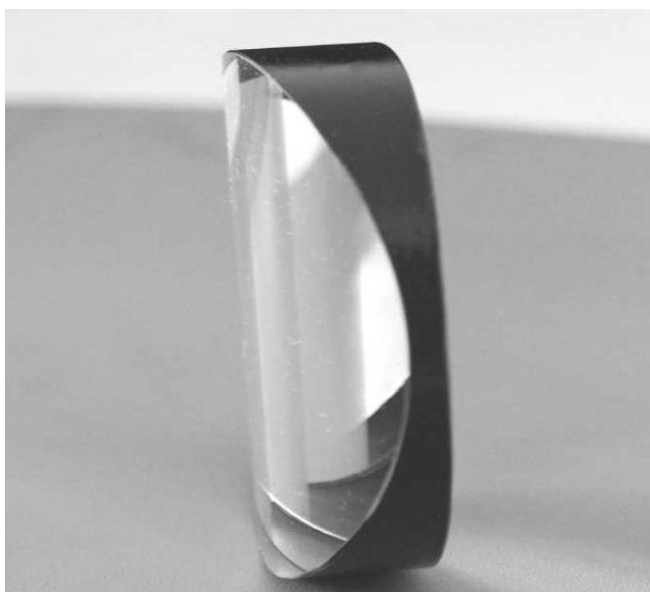
شکل ۳-۱۴: طرح یک لنز فرز نل با فاصله کانونی مثبت که به عنوان یک کلیماتور عمل می کند. [42]



شکل ۳-۱۵: طرح یک لنز فرز نل با فاصله کانونی منفی که به عنوان یک جداساز نوری عمل می کند. [42]



شکل ۳-۱۶: نمونه‌ی صنعتی آرایه‌ی لنز فرزنل [85]



شکل ۳-۱۷: لنز فرزنل از نوع استوانه‌ای [86]



شکل ۳-۱۸: لنز فرزنل دایره‌ای [87]

۳-۳-۲- کاربرد لنز فرزنل

این لنزها کاربردهایی نظیر، تولید روشنایی، لامپ فرزنلی، فانوس‌خانه‌ها، ویدئو پروژکتورها، تلویزیون‌های فرزنلی، چراغ نورافکن فرزنلی در دوربین‌ها، چراغ جلوی خودروها، آشکارسازهای حرکتی، تابلو علائم در جاده‌ها، متمرکزکننده‌های خورشیدی فرزنلی و اختریاب‌ها دارند [41].

۳-۳-۳- مزایای لنز فرزنل

لنزهای فرزنل می‌توانند در اندازه‌های بزرگ با وزن سبک طراحی و ساخته شوند که علت آن کم بودن ضخامت لنزهای فرزنل (کمتر از ۴ میلی‌متر) می‌باشد. بنابراین هزینه‌ی ساخت نسبت به مدل‌های سنتی و قدیمی نیز کمتر است. در لنزهای شیشه‌ای قدیمی ضخامت لبه‌ی لنز ۲۰۰ میلی‌متر، وزن آن ۵۰ کیلوگرم بوده و هزینه‌ی ساخت آن هزاران دلار بود. لنزهای فرزنل بیشتر در جمع‌آوری و هم‌جهت کردن پرتوهای

نور موثر و کارآمد هستند. این لنزها قادرند که یک پرتو نوری را ساطع کنند که تا پنج مرتبه قوی‌تر از سیستم‌های منعکس‌کننده‌ی قدیمی بود [41].

۴-۳- مطالعات کاربردی در زمینه‌ی استفاده از لنز فرزنل جهت متمرکز کردن نور خورشید

۳-۴-۱- پیش‌گفتار

انرژی برای زندگی بشر و توسعه‌ی نظام‌های اقتصادی، سیاسی، و حتی نظامی بسیار مهم می‌باشد. از آنجا که منابع انرژی در حال تمام شدن است، توجه‌ی جهانی به سمت منابع تجدیدپذیر می‌باشد. انرژی خورشیدی یکی از این منابع می‌باشد که با محیط زیست دوست بوده و مانع از آلودگی آن می‌شود. وسایل استفاده از آن بسیار ساده است. بنابراین قسمت عمده‌ی استفاده از انرژی در آینده را به خود اختصاص داده و جایگزین بسیار مناسبی برای سوخت‌های فسیلی می‌باشد [43]. هرچند چگالی انرژی (مقدار انرژی بر واحد سطح) آن پایین و میزان دستیابی به آن فصلی است. این دو از مهمترین معایب استفاده از نور خورشیدی می‌باشد.

لنزهای فرزنل به دلیل مزایایی از قبیل حجم کم، وزن کم، قابلیت تولید انبوه با هزینه‌ی کم، در زمینه‌ی متمرکز کردن نور خورشید بهترین گزینه می‌باشند. به علاوه به طور موثر باعث بالا بردن چگالی انرژی خورشید می‌شوند. لذا باعث کم نقش شدن عیب اول استفاده از نور خورشید شده و به همین دلیل موارد استفاده از این لنزها بیشتر شده است.

پلی متیل متاکریلیت^۱ ماده‌ای با وزن سبک است که از پلیمر مقاوم ساخته شده و رفتار نوری آن تقریباً برابر شیشه می‌باشد. این مواد برای ساختن لنزهای فرزنل ساخته شده‌اند. پلاستیک‌های مدرن، تکنیک مدلسازی جدید و دستگاه‌های تراشکاری پیشرفته باعث بهبود ساختار اپتیکی فرزنل‌ها شده است.

^۱ Polymethylmetacrylate (PMMA)

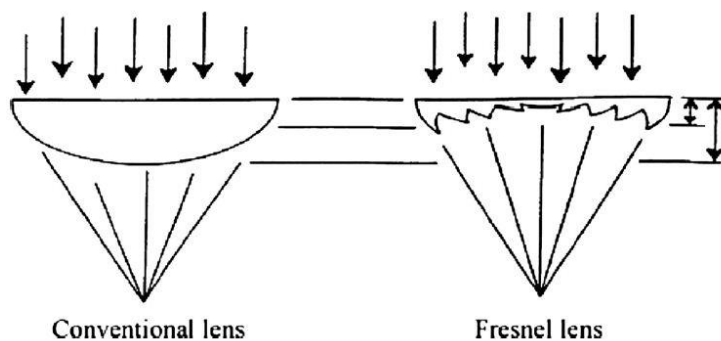
لذا افق جدیدی برای طراحی لنزهای فرزنل، برای متمرکز کردن نور خورشید باز شده است [44].

بیشتر طراحان لنزهای فرزنل برای متمرکز کردن نور خورشید به دلیل بالا بودن کیفیت اپتیکی و کم هزینه بودن تکنولوژی ساخت آن، از این نوع ماده برای ساختن لنز استفاده می‌کنند. این نوع لنزها، استفاده‌ی وسیعی در تولید توان از نور خورشید [50]، تولید هیدروژن [60]، رآکتورهای photo-bio [61,62]، تغییر ساختار بلوری شکل مواد فلزی [69-72]، و لیزرهای خورشیدی دارند [74-76].

بیشتر تحقیقات و توسعه‌ها که در مورد متمرکز کردن نور خورشید می‌باشند دو حالت دارد: یکی سیستم‌های تصویری^۱ و دیگری سیستم‌های غیر تصویری^۲.

۳-۴-۲- سیستم‌های تصویری

لنز فرزنل زنجیره‌ای از کریستال‌ها است. هرکدام از این کریستال‌ها باعث ایجاد یک شیب در ساختار لنز می‌شوند. موادی که در لنزهای قدیمی قرار گرفته در این لنزها وجود ندارد. در شکل ۳-۱۹ تفاوت میان لنزهای قدیمی و لنز فرزنل مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۱۹: لنز قدیمی و لنز فرزنل [69]

^۱ imagin

^۲ Non-imaging

در ابتدا بیشتر لنزهایی که برای کاربردهای خورشیدی انتخاب می‌شد، به طور کامل برای جمع‌آوری اشعه‌ی خورشید طراحی نشده بود. در لنزهای از نوع تصویری به دلیل ساخت نادرست شبکه‌های بلوری و شیارها، و ناهنجاری‌های موجود در طراحی تئوری این لنزها، نور منعکس شده از اجسام دقیقا در کانون متمرکز نمی‌شد و در واقع یک انحراف نوری در این سیستم‌ها وجود دارد که به دلیل عدم دقت هندسی این سیستم‌ها می‌باشد.

همانطور که در قسمت‌های پیشین ذکر شد، بعد از اختراع لنز فرزنل از فانوس‌های دریایی، استفاده از لنزهای تصویری در زمینه‌ی متمرکز کردن نور خورشید بسیار گسترده شد که می‌توان به متمرکزکننده‌های فتوولتائیک و تولید توان از خورشید اشاره کرد.

۳-۴-۲-۱- ساخت لنز فرزنل از نوع تصویری

در سال ۱۹۵۱ میلر^۱[45]، توانست یک لنز از جنس مواد پلاستیکی با دقت و کیفیت سطح بالا بسازد. المنت‌های منشوری شکل این لنزها بسیار خوب بودند اما به کمک چشم دیده نمی‌شدند. میلر ضریب شکست بسیار بالایی برای نحوه‌ی شکست منشورها به کار برد. این لنزها در جاهایی که وزن و حجم کم مهم بود، استفاده می‌شد.

باتنر^۲[46] موفق شد لنزی را طراحی کند که برای سیستم‌های فتوولتائیک بسیار مهم بود. شلمایر^۳[47,48] و نلسون^۴[49] تحقیقات خود را در زمینه‌ی لنزهای فرزنل آغاز کردند. آنها یک سیستم آزمایشگاهی طراحی کرده و توانستند به دمای ۱۴۳-۶۰ درجه سانتی‌گراد برای گرمایش آب و تولید بخار و همچنین تولید برق از ترموالکتریک برسند[47]. بازدهی جمع‌آوری نور خورشید آنها ۵۰ درصد و با نسبت

^۱ Miller

^۲ Boettner

^۳ Szulmayer

^۴ Nelson

تمرکز نزدیک به ۵ بود.

علاوه بر این هاستینگ^۱ [51] در مورد لنزهای فرزنل متمرکز پلاستیکی تحقیق و جستجو کرد. او توانست از نظر تحلیلی دست یابد که این نوع لنزها قابلیت تحمل دما تا رنج ۲۰۰-۳۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد را دارند.

۳-۴-۲-۲- متمرکزکننده‌های فتوولتائیک

یک لنز فرزنل پلاستیکی وزن کمی دارد و قادر است که چگالی دریافت انرژی را بالا ببرد. به همین دلیل برای تولید قدرت در سلول‌های فتوولتائیک استفاده می‌شود.

هارمن^۲ [52] با استفاده از روش‌های آنالیزی و تجربی، بازده و تغییرات چگالی یک لنز دایره‌ای را تعیین کرد و با استفاده از شبیه‌سازی رفتار لنز را مورد بررسی قرار داد. او دریافت که این لنزها، به دلیل اتلافات اپتیکی بالا، متمرکزکننده‌هایی ناکارآمد بودند. همچنین نشان داد که هرچقدر فاصله‌ی کانونی کوچکتر شود، این اتلافات بیشتر شده و بازده نیز کمتر می‌شود.

دن وانا^۳ [53] یک متمرکزکننده‌ی فتوولتائیکی بر اساس یک لنز فرزنل اکریلیکی طراحی، و سیستم را از نظر اقتصادی بهینه کرد. او جنبه‌های اصلی طراحی، برای بهینه‌سازی سیستم از قبیل نسبت تمرکز، اندازه و شکل لنزهای فرزنل را در نظر گرفت و فهمید که در چندین نمونه‌ی آزمایشگاهی بازده بالغ بر ۹ درصد نیز ایجاد می‌شود.

ناکاتا^۴ [54] یک متمرکزکننده‌ی تک محوره (شمالی- جنوبی) ۳۰۰ واتی را با ۳۶ لنز فرزنل دایره‌ای

^۱ Hasting

^۲ Harman

^۳ Donvana

^۴ Nakata

تشریح کرد. مساحت سطح هر کدام از این لنزها ۱۶۰۰ سانتی مترمربع بود. او نتیجه گرفت که بازده اپتیکی لنز ۸۳ درصد و توان خروجی اپتیکی آن ۵۰ درصد بیشتر از لنزهای فرزنل مرسوم در قدیم بود. قدرت خروجی از لنزهای قدیمی ۹/۱۳ وات تحت شدت تابش ۴/۷ وات بر سانتی مترمربع بود. ناکاتا توانست از ۵ عدد از این سلول‌های فتوولتائیک ۲۵/۳۷ وات با بازدهی کل ۱۰/۲ درصد تولید کند.

در سال ۱۹۹۰ سیستم‌های فتوولتائیک بر اساس لنزهای فرزنل تصویری بیشتر توسعه یافتند. تحقیقات و پژوهش‌هایی که در این زمینه شد بیشتر به سمت لنزهای فرزنل دو کانونی^۱ پیش رفت. ویت فیلد^۲ [60] سلول‌های فتوولتائیک مختلفی را مورد بررسی قرار داد. او برای مناطق دورافتاده از لنزهای فرزنل نقطه‌ای با دو محور ردیاب استفاده کرد. شکل ۳-۲۰ یک سیستم متمرکزکننده نقطه‌ای دو محوره با استفاده از لنزهای فرزنل را نشان می‌دهد.



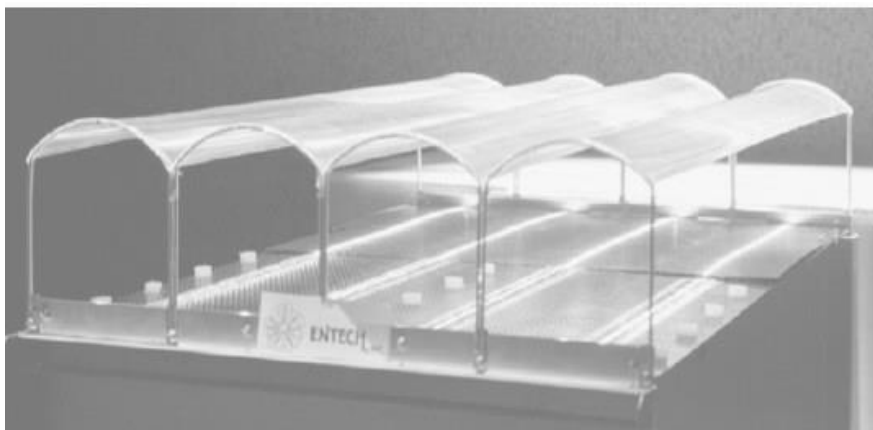
شکل ۳-۲۰: سیستم متمرکزکننده نقطه‌ای دو محوره [71]

^۱Bifocal
^۲whitfield

از مزایای این طرح می‌توان به جمع‌آوری بهینه‌ی نور خورشید اشاره کرد که به‌علت دو محوره بودن ردیاب خورشیدی آن می‌باشد. همچنین می‌توان به عنوان یک چاه گرمایی^۱ در خانه به‌کار برد. البته این طرح یک عیب عمده دارد و آن هزینه‌ی ساخت بسیار بالای آن می‌باشد.

لنزهای فرزنل معمولی نسبت به لنزهای گنبدی شکل بازدهی کمتری دارند. زیرا زاویه‌ی تابش بزرگتر و لذا اتلافات اپتیکی بیشتری دارند.

سلول‌های فتوولتائیک با استفاده از لنزهای فرزنل جدید، بسیار پرکاربرد و با بازدهی بالا می‌باشد. همانطور که در شکل ۳-۲۱ مشاهده می‌شود، اونیل^۲ [56] این نوع سیستم‌ها (مجموعه‌ی لنز فرزنل^۳) رو مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت بازدهی تبدیل انرژی خورشیدی به برق آن حدود ۲۷ درصد می‌باشد.



شکل ۳-۲۱: چهار لنز فرزنل از نوع کشیده [40]

۳-۲-۴-۳- بهره‌برداری حرارتی و تولید توان از نور خورشید

تحقیقات مهمی در زمینه کاربرد لنز فرزنل در این قسمت انجام شده است که همگی شامل موارد زیر

^۱ Heat sink

^۲ O'Neill

^۳ Stretched Lens Array (SLA)

می‌شود:

(۱) کلکتورهای خورشیدی فرزنی به‌منظور گرمایش هوا^۱ [57-59]

(۲) لنز فرزنل از نوع عدسی محدب برای تولید هیدروژن^۲ [60]

(۳) راکتورهای photo-bio و واکنش‌های فوتوشیمیایی [61,62]

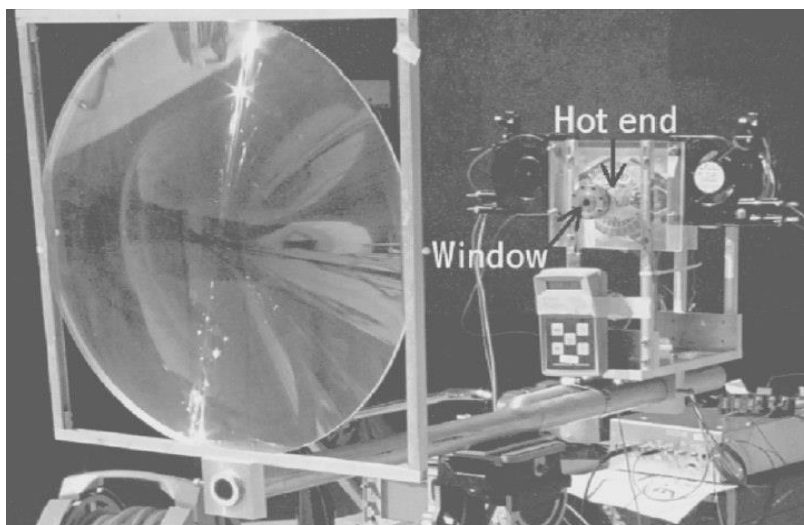
(۴) یخچال‌های تولید توان [63]

(۵) تکنولوژی منعکس‌کننده‌های فرزنل خطی [64-68]

(۶) تغییر ساختار بلوری سطح فلز^۳ [69-71]

شکل ۲۲-۳ یک دستگاه تولید توان سرمایشی از انرژی حرارتی خورشید را نشان می‌دهد. نام این

دستگاه ترمواکاستیکالی^۴ می‌باشد.



شکل ۲۲-۳: یک دستگاه تولید توان با استفاده از لنز فرزنل متمرکزکننده نقطه‌ای [63]

^۱ Fresnel Solar Collector including air heater

^۲ Convex glass Fresnel lens for hydrogen generation

^۳ Metal surface modification

^۴ Thermoacoustically

آدف^۱ این سیستم را به طور موفقیت آمیزی مورد بررسی قرار داد. یک لنز فرزنل با قطر ۰/۴۷۵ متر نور خورشید را به سمت گرم دستگاہ متمرکز می‌کند که این مکانیزم، باعث ایجاد گرمایش تا دمای ۴۷۵ درجه سانتی‌گراد می‌شود. این سیستم حدود ۲/۵ وات توان در دمای سمت سرد ۵ درجه سانتی‌گراد می‌دهد [78].

تکنیک منعکس کننده‌های فرزنل خطی^۲ بر اساس همان قواعدی است که در آینه‌ها، برای متمرکز کردن نور خورشید به کار برده می‌شود. این گونه سیستم‌ها نور خورشید را بر روی یک دریافت کننده^۳ متمرکز می‌کنند. این دریافت کننده‌ها بر روی برج‌هایی سوار شده‌اند.

منعکس کننده‌های فرزنل خطی^۴ می‌تواند به‌عنوان یک کلکتور سهموی ناودانی عمل کنند، ولی دقیقاً به شکل آنها نمی‌باشند. زیرا شکل سهموی ماندی ندارند و لوله‌های جاذب آن به اندازه‌ی کافی بزرگ نیستند. بنابراین منعکس کننده‌های فرزنل خطی در رده‌ی وسیله‌های تصویری می‌باشد [44].

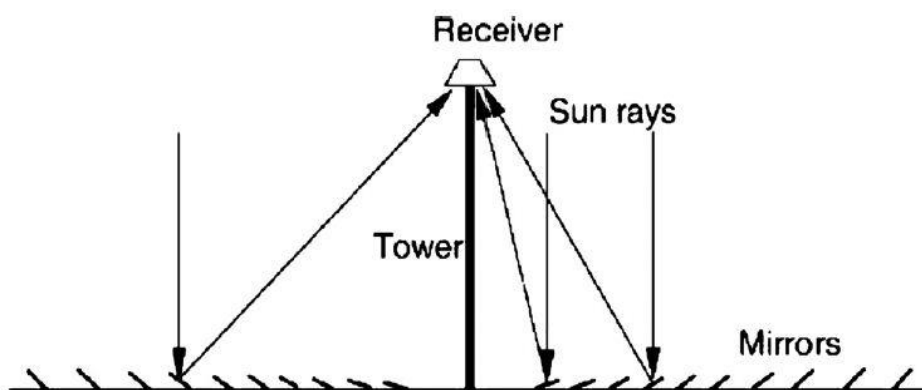
طرح شماتیکی از لنز فرزنل خطی در شکل ۳-۲۳ مشاهده می‌شود. مزایای عمده‌ی این سیستم‌ها این است که از یک سطح صاف یا منعکس کننده‌های منحنی دراز استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها در مقایسه با منعکس کننده‌های سهموی شیشه‌ای، بسیار ارزانتر است.

^۱ Adef

^۲Linear Fresnel lens

^۳Receiver

^۴Linear Fresnel reflector(LFR)



شکل ۳-۲۳: شماتیک یک لنزفرزل خطی [64]

از طرفی این سیستم‌ها بر روی زمین نصب می‌شوند لذا کمترین تجهیزات را می‌توان برای آن به کار برد [64].

مهندس مشهور انرژی خورشیدی، گئورگیا فرانسیا^۱ نخستین فردی بود که از این قاعده برای توسعه‌ی هر دو نوع منعکس کننده‌های خطی و دو محوره در جنوای ایتالیا استفاده کرد [65].

در این‌گونه سیستم‌ها اگر از سیستم ردیابی دومحوره استفاده شود، می‌توان به رنج دمایی بالاتری دست یافت، در غیر این صورت میزان جذب انرژی خورشیدی کم و لذا دمای کارکرد آن نیز کم است.

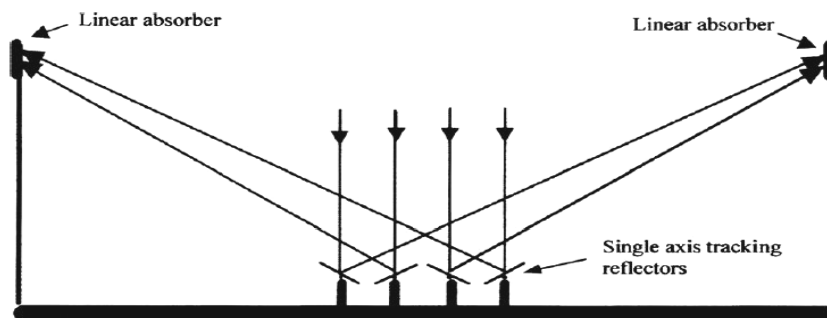
علاوه بر این یک مشکل در این نوع لنزها وجود داشت و آن ایجاد سایه‌ی ناقص یا کامل در آینه‌های مجاور بود. به همین دلیل بایستی فضای بین این دو منعکس کننده‌ها رو افزایش داد. همچنین این سایه‌ها می‌تواند به وسیله‌ی افزایش ارتفاع برج‌ها کاهش یابد. از طرفی افزایش ارتفاع باعث افزایش هزینه‌های اولیه^۲ می‌شود. برای حل این مشکل می‌توان به منعکس کننده‌های فرزنل خطی فشرده^۳ اشاره نمود که اخیراً در دانشگاه سیدنی در استرالیا مورد بررسی قرار گرفت.

^۱ Giorgia francia

^۲ Capital cost

^۳ Compact linear Fresnel reflector (CLFR)

میلز^۱ در مورد یک منعکس کننده‌های فرزنل خطی فشرده تحقیق و جست‌وجو کرد [68]. این سیستم بسیار مناسب برای تولید توان و حرارت در مقیاس بزرگ می‌باشد. در این گونه سیستم‌ها از دو تا برج جاذب و چند آینه موازی استفاده شده است. شماتیک طرح میلز در شکل ۳-۲۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۲۴: شماتیک یک سیستم CLFR [68]

همانطور که در شکل ۳-۲۴ ملاحظه می‌شود، بر روی زمین آینه‌های تک محوره نصب شده است. لذا با برخورد پرتوهای خورشید به آن، قسمتی در سمت جاذب خطی و بقیه در سمت دیگر منعکس شده و این عمل مانع از ایجاد سایه می‌شود.

متمرکز کردن نور خورشید و ایجاد دمای بالا در نقطه‌ی کانون، می‌تواند منبع مهم و مناسبی برای تغییر و اصلاح سطح مواد فلزی شود. سی‌یرا^۲ [69-71] یک سیستم متمرکزکننده را طراحی کرد که با استفاده از لنز فرزنل ظرف مدت چند دقیقه به رنج دمایی حدود ۲۰۰۰-۱۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد رسید. این دما در کانون لنز به حدی است که باعث ایجاد احتراق در مخلوط نیکل و الومینیوم شده و باعث تولید نیکل-آلومینیوم^۳ خواهد شد. همچنین نصب این لنز نیاز به تجهیزات مدرن و پیشرفته ندارد [69-71].

^۱ Mills

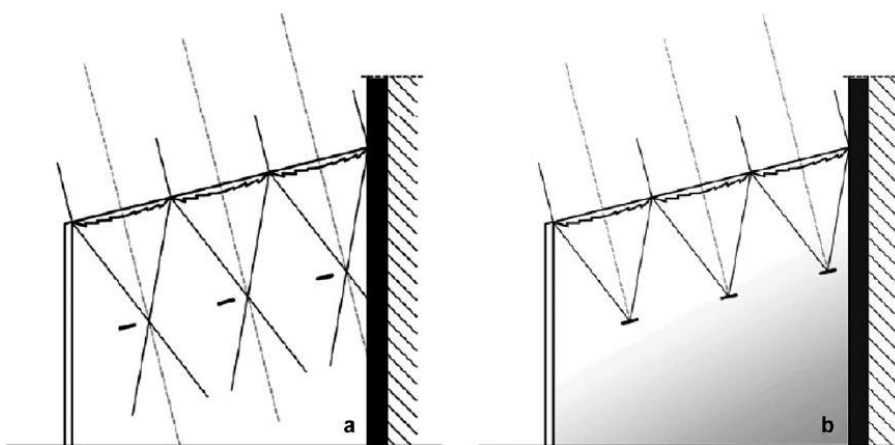
^۲ Sierra

^۳ NiAl

۳-۴-۲-۴- لامپ خورشیدی

لامپ‌های خورشیدی یک روش جدید برای استفاده از لنزهای فرزنل می‌باشد که کمتر به آن توجه می‌شود. سانگراسولیس^۱ یک روش برای کنترل نور بیرون، از یک نمونه آزمایشی سیستم نوری هیبریدی معرفی کرد [72]. او نور را از یک چرخ آینه^۲ به لنز فرزنلی که در یک دستگاه نورافکن قرار داشت، منعکس کرد. کل دستگاه نیز در یک اتاق بدون پنجره قرار داشت.

مزایای جداسازی تابش مستقیم و تابش پخشی خورشید به وسیله‌ی لنز فرزنل، این است که باعث کنترل روشنایی فضای درونی ساختمان می‌شود. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که ۶۰-۸۰ درصد نور خورشیدی که به وسیله‌ی لنز فرزنل روی برج‌های جاذب، جذب می‌شود می‌تواند برای روشنایی فضای داخلی ساختمان و گرمایش به کار رود. در هنگامی که شدت تابش خورشید کم باشد، لوله جاذب از حالت متمرکز خارج شده و اجازه می‌دهد که بقیه‌ی نور وارد فضای داخلی ساختمان شود و روشنایی ساختمان را در حد قابل قبولی نگه دارد. شماتیکی از طرح سانگراسولیس در شکل ۳-۲۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۲۵: یک سیستم روشنایی خورشیدی با لنز فرزنل با، (a) جاذب در کانون قرار ندارد (b) جاذب در کانون قرار

^۱ Tsangrassoulis

^۲ Heliostat

از تمامی تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی لنز فرزنل از نوع تصویری، می‌توان دریافت که تولید توان از انرژی خورشیدی مهمترین هدف استفاده از این نوع لنزها می‌باشد. به این دلیل که این لنزها در طراحی اپتیکی انعطاف‌پذیری بیشتری دارند، لذا باعث ایجاد شار یکنواخت روی جاذب شده و راندمان سیستم را افزایش می‌دهند.

۳-۴-۳- سیستم‌های غیر تصویری

این سیستم‌ها از زمانی که در سال ۱۹۶۵ کشف شدند، استفاده‌ی وسیعی در جمع‌آوری انرژی خورشیدی دارند. به این خاطر که متمرکز کردن نور خورشید به کیفیت تصویربرداری نیازی ندارد. در عوض به طراحی انعطاف‌پذیر، شار حرارتی یکنواخت در متمرکزکننده‌ها، سایز لنز و گستره‌ی تابش نور خورشید نیاز دارد. بنابراین این نوع لنزها را به شکل محدب طراحی می‌کنند تا نسبت تمرکز بالا، توزیع شار یکنواخت، و فاصله‌ی کانونی کمی را ایجاد کنند. خصیصه‌ی اصلی این لنزهای غیرتصویری در نسبت تمرکز هندسی (c) ^۱ آنهاست. که به طور رایج رنج $c \leq 10$ برای نسبت تمرکز کم، $10 \leq c \leq 100$ برای متوسط و $c \geq 100$ برای نسبت تمرکز بالاست.

در این‌گونه سیستم‌ها به دلیل استفاده از لنزهای فرزنل، تجزیه رنگی^۲ نور بسیار مهم می‌باشد. و آن به این معنی است که وقتی نور سفید از منشور عبور می‌کند، به دلیل شکست نور، به رنگ‌های متفاوتی ظاهر می‌شود. شکست نور به دلیل متفاوت بودن طول موج‌های طیف‌های رنگی است. این پدیده باعث اتلافات اپتیکی زیادی می‌شود.

^۱ Geometrical concentration ratio

^۲ Chromatic aberration

به منظور محاسبه‌ی این پدیده، لورنزو^۱ [77] یک پارامتری تعریف کرد که باعث می‌شود تخمینی برای خطای کیفیت اپتیکی متمرکزکننده‌ها، به‌علت وجود این شکست نور، زده شود.

۳-۴-۳-۱- سیستم‌های متمرکزکننده‌ی خطی^۲

سیستم‌های تصویری نسبت تمرکز کمتر از ۵ دارند در حالی که غیر تصویری‌ها نسبت تمرکز بیشتر از ۱۰ دارند [44].

پیزور^۳ یک متمرکزکننده‌ی فتوولتائیک خطی را مورد بررسی قرار داد. این سیستم برای استفاده در فضا طراحی شده بود که بازده‌ی نوری بالایی داشت. هزینه‌ی ساخت آن کم و تکنولوژی ساخت این سیستم پیچیده نبود. این لنزها با نوع جدید متمرکزکننده‌های خطی گالیم-آرسنیک^۴ که هر دو به‌عنوان جاذب سلول‌های خورشیدی به‌کار می‌روند، ساخته شده بود. این متمرکزکننده‌های خطی، مزایای زیادی از قبیل بازده‌ی بالا، طراحی مناسب دارند و ردیابی تک محوره برای این سیستم‌ها کافی است [79].

۳-۴-۳-۲- سیستم‌های متمرکزکننده‌ی نقطه‌ای

سیستم‌های غیر تصویری نسبت به تصویری‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای ممتاز هستند. دلیل آن عواملی نظیر، کم بودن فاصله‌ی کانونی، بزرگ بودن زاویه‌ی ورودی تابش، کم بودن حجم و زیاد بودن نسبت تمرکز این سیستم‌ها می‌باشد. به همین منظور بیشتر تحقیقات به سمت سیستم‌های غیر تصویری رفته است.

پیزور و همکارانش یک سیستم فتوولتائیک پیشرفته (با به‌کار بردن لنزهای فرزنل گنبدی شکل) را

^۱ Lorenzo

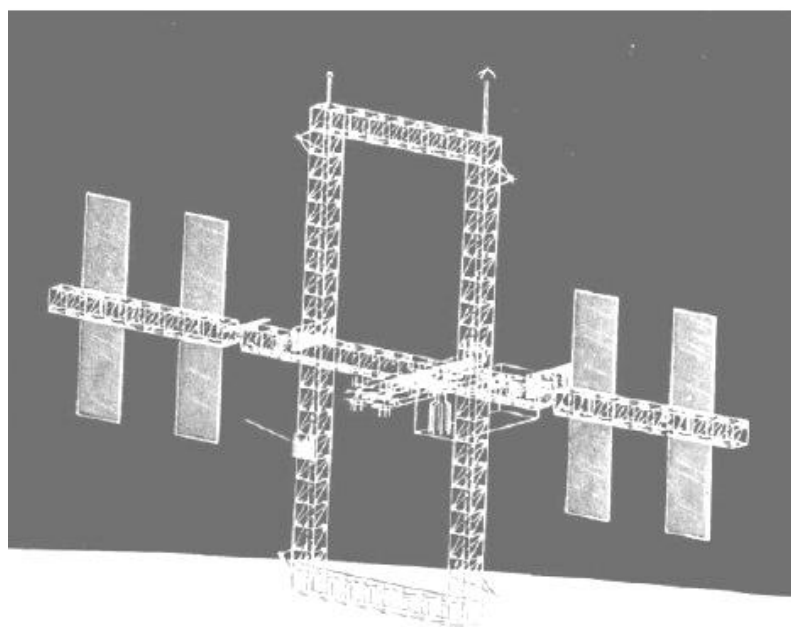
^۲ Line-focus system

^۳ Piszczor

^۴ GaAr

گزارش کرد که برای کاربردهای فضایی استفاده می‌شود. آنها در این سیستم برای جلوگیری از تلفات خوردگی و تغییر سطح فلز، درپوش باتری‌ها را به صورت منشوری و درخشان در نظر گرفتند. همین امر سبب شد کاهش شدیدی در سطح مورد نیاز و هزینه‌های سیستم شد [81].

شکل ۳-۲۶ نشان دهنده‌ی یک طرح مفهومی از این متمرکزکننده‌ها در یک ایستگاه فضایی می‌باشد. این طرح مزایای بسیار زیادی در مقایسه با سایر سیستم‌های تولید توان خورشیدی دارد.



شکل ۳-۲۶: یک ایستگاه فضایی با متمرکزکننده‌های فتوولتائیک [81]

در سال ۱۹۹۰، سه المنت حساس در این سیستم نام برده شد که به ترتیب، متمرکزکننده‌ی فرزنل، درپوش باتری منشوری شکل، و سلول‌های فتوولتائیک می‌باشد. نمونه‌ی آزمایشگاهی این سیستم ساخته و تست شد. نتایج نشان داد که بازده‌ی اپتیکی نزدیک به ۹۰ درصد داشت. همچنین این سیستم توان خروجی نزدیک به ۳۰۰ وات بر مترمربع را داراست [82].

۴- فصل چهارم

تشریح سیستم آزمایشگاهی

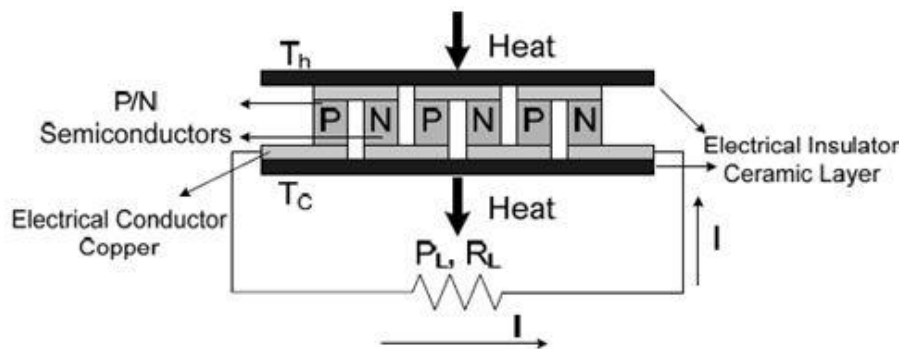
۴-۱- مقدمه

با بررسی طرح‌های اجرا شده در کشور با عنوان تولید همزمان الکتریسیته و آب گرم از خورشید مشاهده می‌گردد، برای تولید برق از سیستم فتوولتائیک استفاده شده و برای تولید آب گرم نیز از کلکتورهای متداول خورشیدی. حال آنکه در طرح موضوع این پروژه تولید برق به وسیله‌ی ترموالکتریک می‌باشد که با قراردادن مولدهای ترموالکتریک در مسیر تبادل گرما میان کلکتور خورشیدی و آب به‌طور همزمان آب گرم و الکتریسیته تولید می‌گردد. نمونه‌ای از طرح‌های اجرا شده برای تولید الکتریسیته و آب گرم در شکل ۴-۱ نمایان است.



شکل ۴-۱: نمونه‌ای از طرح‌های اجرا شده برای تولید الکتریسیته و آب گرم با استفاده از نور خورشید [83]

اصل استفاده و به‌کارگیری از مولدهای ترموالکتریک همانطوری که در فصل اول ذکر شد، بر پایه اثر سی‌بک می‌باشد که برآن اساس اختلاف دمای بین منبع گرم و منبع سرد متصل به دو نیمه هادی غیرهمسان، یک اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد خواهد نمود. بزرگی اختلاف پتانسیل تولید شده در این روش به مقدار ضریب سی‌بک (که از ویژگی‌های جنس مواد به‌کار گرفته شده می‌باشد) و اختلاف دما میان منابع سرد و گرم بستگی دارد. طرح نمادین از یک مولد ترموالکتریک در شکل ۲-۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۴: طرح نمادین از یک سلول از مولد ترمو الکتریک [84]

در این طرح پیشنهادی از یک لنز فرزنل در ساختمان هر کلکتور استفاده می‌گردد. دلیل استفاده از این لنزها سبکی آنها نسبت به لنزهای شیشه‌ای متداول و همچنین ارزان تر بودن آنها می‌باشد.

نظر به اینکه مولدهای ترموالکتریک و همچنین لنزهای فرزنل به‌کار برده شده دارای مشخصات فنی ثابتی می‌باشند، برای استفاده بهینه از توانایی تولید برق مولدها، ممکن است لازم گردد گرمای جذب شده به واسطه چند لنز فرزنل برای تولید برق در یک مولد استفاده شود. در محاسبات اولیه طرح، معلوم گردید که با توجه به متوسط شدت تابش خورشید در محل، ابعاد لنز و همچنین مشخصات ترموالکتریک به‌کار برده شده، موضوع استفاده از لنزهای چندگانه در این طرح مصداق می‌یابد. از این‌رو لازم است تا با به‌کارگیری چیدمانی از لنزهای نامبرده، گرمای حاصل از تابش خورشید را جذب نموده و به واسطه یک

سیال حامل، آن را به دیواره گرماگیر مولد ترموالکتریک رساند. با توجه به دمای بالای اعمال شده بر سیال حامل و اینکه در چنین دمایی آب در فاز بخار قرار گرفته و فشار آن نیز به مراتب بیشتر از فشار اتمسفریک می‌شود (مشکلات متعددی برای انتقال آن ایجاد می‌نماید) استفاده از آب به عنوان سیال حامل توجیه پذیر نمی‌باشد؛ لذا از روغن‌های معدنی که دمای تبخیر بالایی (در حدود ۳۰۰ درجه سلسیوس) دارند، استفاده می‌گردد.

به منظور اندازه‌گیری گرمای جذب شده در شرایطی که نور خورشید به وسیله‌ی یک لنز فرزنل با ابعاد مشخص بر سطح جاذب گرما، متمرکز گردیده و به واسطه سیال حاملی به سمت گرم یک مدول ترموالکتریک منتقل می‌شود، سیستم آزمایشگاهی طراحی شده است که در آن گرمای حاصل از تابش خورشید به واسطه یک لنز بر انباره‌ی آلومینیومی مملو از یک روغن معدنی متمرکز شده و از آنجا به دیواره گرم یک مدول ترموالکتریک منتقل می‌گردد. در دیواره سرد مدول، انباره‌ی دیگری از جنس آلومینیوم قرار دارد که در آن جریانی از آب شهری با دبی ثابت عبور می‌نماید. توان الکتریکی که در این شرایط تولید می‌گردد بسیار نزدیک به حالتی است که در آن، گرما به واسطه روغن از کانون لنزهای فرزنل جذب شده و با واسطه لوله‌های رابط به انباره روغن متصل به مدول ترموالکتریک منتقل می‌گردد.

۴-۲- مشخصات فنی مدول ترموالکتریک مورد استفاده در پروژه

با عبور گرما از مدول ترموالکتریک انرژی الکتریکی تولید می‌گردد. در این حالت مدول ترموالکتریک همچون یک مولد برق عمل نموده و میان دو سر سیم وصل شده به آن، یک اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد می‌کند. در حالتی که سیم‌ها در یک مدار الکتریکی قرار نگرفته‌اند (اصطلاحاً به این حالت مدار باز می‌گویند) بیشترین اختلاف پتانسیل ایجاد می‌گردد. در این حالت جریان الکتریکی از مدول نمی‌گذرد و از این‌رو مقاومت داخلی مدول تاثیری در افت ولتاژ ندارد. همچنین به دلیل عدم وجود جریان، توان الکتریکی قابل استحصال از مدول صفر می‌باشد. با ایجاد یک مدار الکتریکی بسته میان دو سر مدول و

برقراری جریان الکتریسیته، توان الکتریکی تولید خواهد شد. در این شرایط، به دلیل وجود مقاومت داخلی در مدول، ولتاژ دو سر مبدل کاهش می‌یابد. در حالت مدار باز ثابت شده است که بیشترین توان الکتریکی قابل استحصال مولد در زمانی رخ می‌دهد که مقاومت اهمی مدار، معادل مقاومت داخلی مدول باشد. به این شرایط بارگذاری که به آن Matched load می‌گویند، توان قابل استحصال از رابطه‌ی ۴-۱ بدست می‌آید:

$$P = \frac{V^2}{4r} \quad (۱-۴)$$

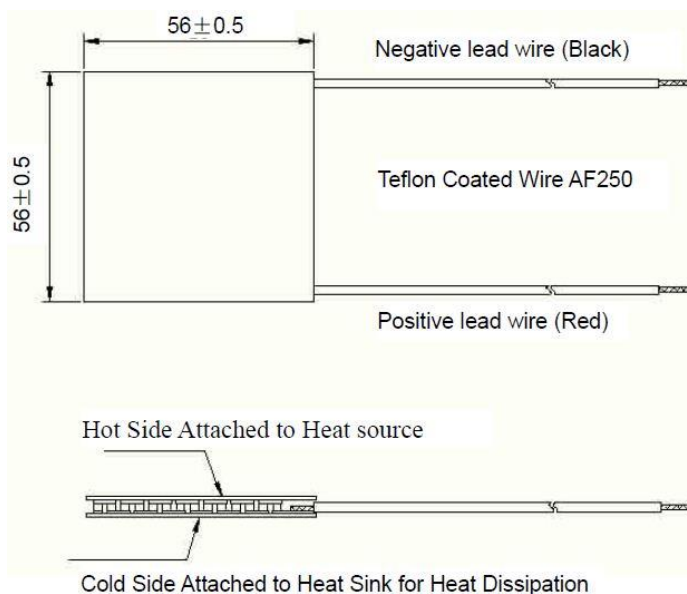
که در آن V و r به ترتیب، ولتاژ خروجی مدار باز مدول ترموالکتریک و مقاومت داخلی آن می‌باشند. از این معادله چنین بر می‌آید که برای یک اختلاف پتانسیل مدار باز مشخص، پایین بودن مقاومت داخلی می‌تواند منجر به افزایش ماکزیمم توان قابل استحصال گردد.

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که در حال حاضر مدول‌های ترموالکتریک گوناگونی در بازار عرضه می‌گردند که از آن میان، محصولات شرکت آمریکایی HI-Z به دلایل گوناگون با کیفیت‌ترین این نمونه‌ها ارزیابی شده‌اند. به دلیل کیفیت بالای این محصولات، نمونه‌هایی از آن در طرح‌های بازیاب انرژی از تلفات گرمایی موتور، توسط شرکت‌های مطرح خودرو سازی همچون "بی ام و" و "جنرال موتور" به کار گرفته شده است. همچنین در طرح‌های نظامی ارتش آمریکا برای تولید انرژی در شرایط ویژه، از این محصولات استفاده می‌شود. از میان دیگر نمونه‌های مولد ترموالکتریک که به تولید تجاری رسیده‌اند و از فن‌آوری نسبتاً خوبی برخوردار هستند، می‌توان به محصولات شرکت چینی تی-هاس‌تینگ^۲ اشاره کرد. ترموالکتریک به کار رفته در این پروژه از نوع "TEP1-12656-0.6" و محصول همین شرکت چینی می‌باشد. جنس

^۱ BMW

^۲ Taihuaxing Thermoelectric

نیمه‌هادی‌های این ترموالکتریک از نوع بریلیوم-تلوراید است [88]. در شکل ۳-۴ طرح شماتیک ترموالکتریک مورد آزمایش مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۴: طرح شماتیک ترموالکتریک مورد آزمایش [88]

این ترموالکتریک‌ها قادرند تا دمایی برابر ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد را به صورت مداوم و تا دمایی برابر ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد را به طور لحظه‌ای کار کنند [88]. نمونه‌ای از ترموالکتریک مورد آزمایش در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۴: ترموالکتریک مورد آزمایش [88]

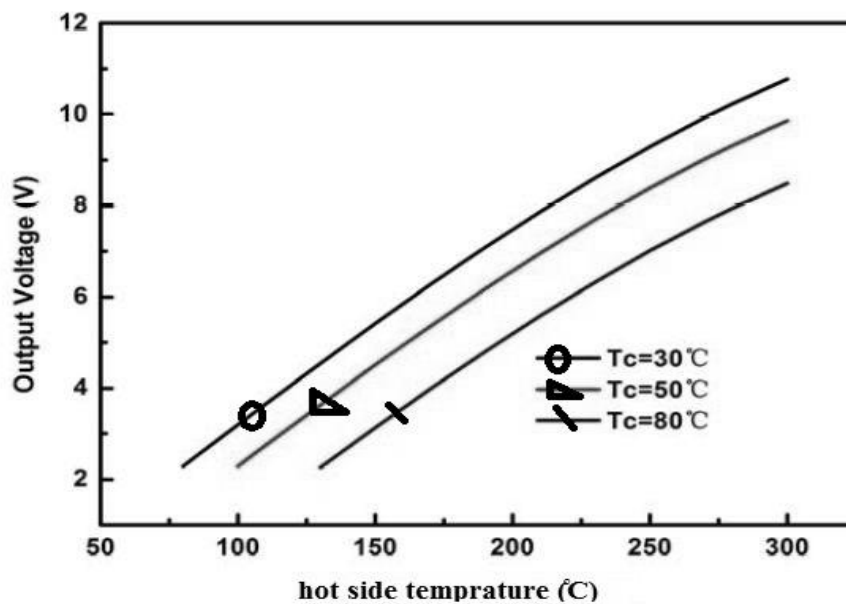
بر روی دو سطح آن لایه‌ای از گرافیت با هدایت بالا پوشانده شده است تا مقاومت آن در برابر گرما را افزایش دهد. همچنین از ۱۲۶ کوپل نیمه‌هادی تشکیل شده است که مطابق ادعای شرکت سازنده، مشخصات فنی این ترموالکتریک در جدول ۴-۱ آمده است.

جدول ۴-۱: مشخصات فنی ترموالکتریک "TEP1-12656-0.6" [88]

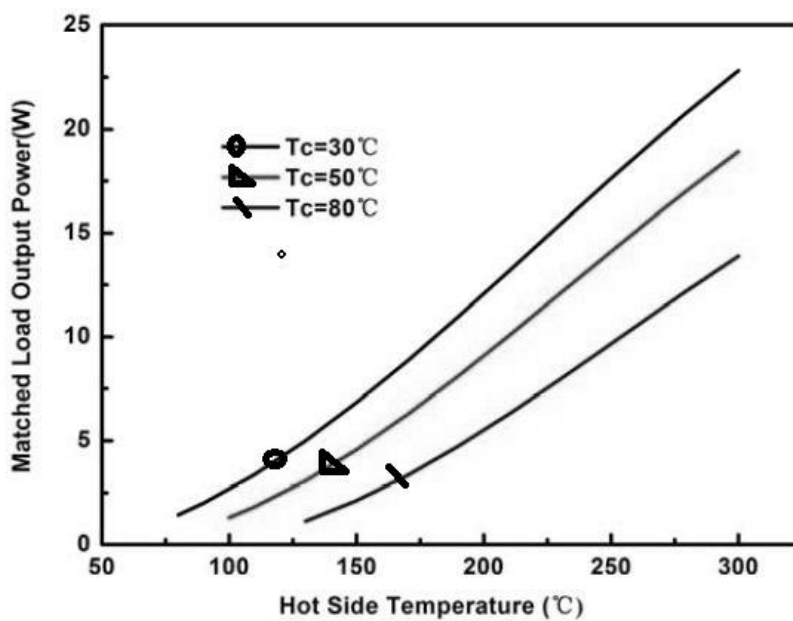
ابعاد (میلی‌متر)	۵۶×۵۶
ولتاژ مدار باز (ولت)	۸/۴
مقاومت داخلی (اهم)	۱/۲
ولتاژ در حالت matched load (ولت)	۴/۲
جریان در حالت matched load (آمپر)	۳/۵
بیشینه‌ی توان عبوری در حالت matched load (وات)	۱۴/۱

از دیگر مشخصات مکانیکی این ترموالکتریک که رفتار آلیاژهای آن را توصیف می‌کند، شامل هدایت حرارتی و ضریب سی‌بک توسط شرکت نامبرده ارائه گردیده‌اند [88]. در شکل ۴-۵ و شکل ۴-۶ به ترتیب

تغییرات ولتاژ و توان ترموالکتریک بریلیم- تلوراید بر حسب دمای اتصال گرم آن، ملاحظه می‌شود.



شکل ۴-۵: نمودار تغییرات ولتاژ ترموالکتریک مدار باز بر حسب دمای اتصال گرم [88]



شکل ۴-۶: رفتار تغییرات توان ماکزیمم ترموالکتریک بر حسب دمای اتصال گرم [88]

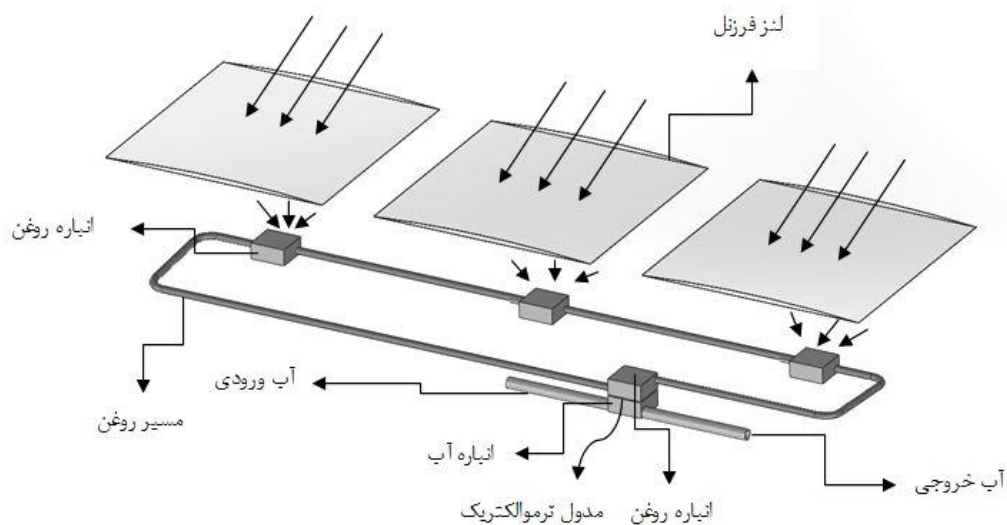
۳-۴- بررسی پتانسیل تولید برق با استفاده از یک لنز فرزنل

ابعاد لنز استفاده شده در طرح موضوع این پایان نامه 30×30 سانتیمتر مربع می‌باشد. با توجه به اینکه، مطابق مدل پرز^۱ [89] میانگین شدت تابش خورشید در ساعت ۱۲، ماه شهریور در موقعیت جغرافیایی شهرستان بابل (ارتفاع این شهر از سطح دریا ۲۰ متر و عرض جغرافیایی آن $36/5$ می‌باشد) در حدود 750 وات بر متر مربع می‌باشد، مقدار تابش متمرکز شده توسط لنزی با ابعاد داده شده در حدود $67/5$ وات بوده که با لحاظ نمودن ضریب عبور اپتیکی لنز (حدود $0/9$)، مقدار گرمای رسیده به سطح جاذب گرما در حدود $60/75$ وات می‌باشد. با فرض اینکه تمامی این تابش در سطح جذب شده و به گرما تبدیل گردیده و بدون هیچگونه تلفاتی به دیواره گرماگیر مولد ترموالکتریک منتقل گردد، توان الکتریکی تولید شده، اندکی بیش از ۲ وات است که از توان الکتریکی قابل تولید توسط مدول‌های ترموالکتریک استفاده شده در این پژوهش (حدود ۱۴ وات) به مراتب کمتر می‌باشد. لذا از این بررسی چنین برمی‌آید که برای استفاده بهینه از توانایی مدول‌های ترموالکتریک می‌بایست از مکانیزم جذب گرما توسط لنزهای چندگانه و انتقال آن به مدول ترموالکتریک به واسطه یک سیال حامل استفاده نمود.

۴-۴- طراحی مفهومی یک سیستم آب‌گرمکن خورشیدی با قابلیت تولید برق

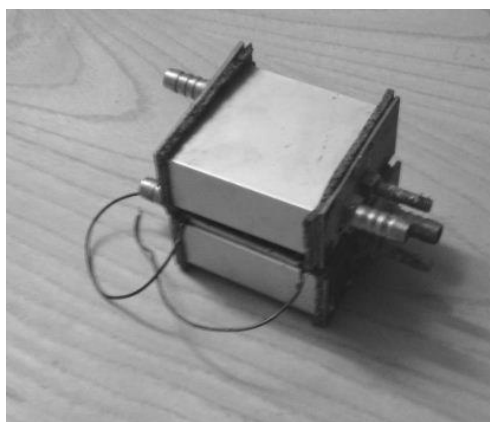
در طرح مفهومی پیشنهادی، نور خورشید به واسطه آرایه‌ای از لنزهای فرزنل در نقطه‌ی کانونی آن متمرکز می‌شود. در مرکز هر لنز، انباره‌هایی پر از روغن قرار دارد که با متمرکز شدن نور خورشید، دمای روغن افزایش یافته و سپس گرمای جذب شده به واسطه این سیال، به انباره آب متصل به مدول ترموالکتریک می‌رسد. نمایش نمادین این طرح در شکل ۴-۷ ملاحظه می‌شود.

^۱ Preze



شکل ۴-۷: نمایش نمادین از طرح پیشنهادی برای تولید الکتریسیته و آب گرم از خورشید

به دلیل متمرکز نمودن نور خورشید، مقدار توان گرمایی گسیل شده در واحد سطح افزایش یافته و باعث می‌گردد تا دمای سیال گرماگیر تا حدی که برای تولید برق مناسب باشد، افزایش یابد. مجموعه مدول ترموالکتریک، انباره‌های روغن و آب، یک مبدل گرمایی مایع به مایع مخصوص را می‌سازند که در آن، همزمان با گرم کردن آب، برق نیز تولید می‌شود. در شکل ۴-۸ نمونه‌ای از این مبدل مشاهده می‌گردد.



شکل ۴-۸: نمونه‌ای از مبدل گرمایی مایع به مایع مجهز به مدول ترموالکتریک

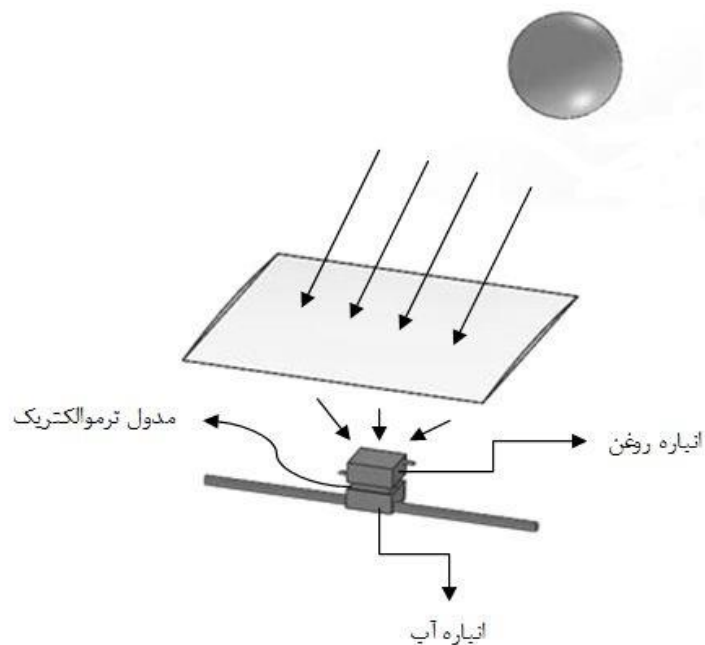
۴-۵- طراحی مدل آزمایشگاهی سیستم مورد مطالعه

برای اندازه‌گیری قابلیت یک مجموعه لنز و انباره روغن مربوطه در جذب گرمای حاصل از تابش خورشید و انتقال آن به مولد ترموالکتریک، لازم است تا یک نمونه آزمایشگاهی طراحی گردد که در آن مجموعه تعریف شده‌ای متشکل از یک لنز، یک مدول ترموالکتریک، یک انباره آلومینیومی پر از روغن و یک انباره آب متصل به جریان مصرفی، مورد آزمایش قرار گیرد.

در قسمت‌های بعدی، ضمن معرفی طرح مفهومی مدل آزمایشگاهی و توصیف جداگانه اجزاء متشکله آن، روش آزمایش به همراه دستگاه‌های اندازه‌گیری توضیح داده می‌شود.

۴-۵-۱- طرح مفهومی

در این طرح یک مبدل ترموالکتریک در مرکز کانونی یک لنز فرزنل قرار می‌گیرد. این مبدل در واقع یک مبدل گرمایی مایع به مایع، متشکل از یک مدول ترموالکتریک می‌باشد که در میان دو انباره پر از روغن و آب، قرار گرفته است. لنز فرزنل نور خورشید را به سمت کانون خود متمرکز کرده و چگالی انرژی خورشید را در منطقه کانونی خود افزایش می‌دهد. لذا انباره‌ی روغن که درست در همین منطقه قرار دارد، گرم می‌شود. برای قرار دادن لنز در معرض تابش مستقیم نور خورشید از یک سازه مکانیکی قابل تنظیم استفاده می‌گردد. شکل ۴-۹ نمایی از این طرح مفهومی را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۴-۹: طرح نمادین از سیستم مورد آزمایش

۴-۵-۲- اجزای اصلی تشکیل دهنده‌ی طرح

۴-۵-۲-۱- مبدل ترموالکتریک

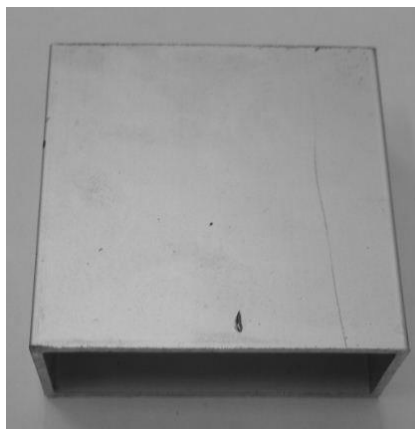
همچنان که قبلاً هم ذکر شده است، در ساختار یک مبدل ترموالکتریک از دو انباره آلومینیومی برای ذخیره روغن و آب استفاده می‌شود. همچنین یک مدول ترموالکتریک در میان این دو انباره قرار گرفته است که از جریان گرمای منتقل شده به آن، برق تولید می‌نماید.

برای تسهیل در انتقال گرما، جنس انباره‌ها از آلومینیوم انتخاب شده است که نحوه‌ی ساخت آن به

شرح ذیل می‌باشد:

الف) همانطور که در شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود، ابتدا یک قوطی آلومینیومی به ابعاد (۲/۵×۷)

سانتی‌متر و به طول ۰/۵ متر تهیه شده و سپس در اندازه‌های (۶/۵×۷) سانتی‌متر برش داده شده است.



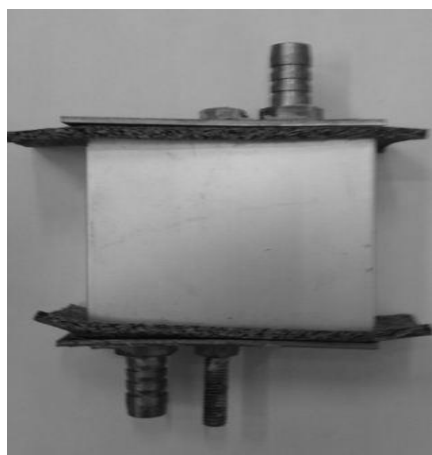
شکل ۴-۱۰: یک قوطی آلومینیومی

ب) از آنجایی که دو طرف این قوطی‌ها تو خالی است، دو ورق فولادی ۲ میلی‌متری تهیه شده و در اندازه‌های (۲/۵×۷) سانتی‌متر برش داده شده است. چون از هر یک از دو سمت این انباره بایستی سیال عبور کند، دو سوراخ به قطر سرشیر مورد نظر (۱۳ میلی‌متر) ایجاد کرده و با استفاده از مهره، سرشیر به ورقه‌های فولادی متصل شده است. همچنین برای ثابت نگه داشتن این ورقه‌ها در دو وجه قوطی آلومینیومی از یک پیچ ۲ میلی‌متری به طول ۶/۵ سانتی‌متر استفاده می‌شود. شکل ۴-۱۱ اجزای سازنده‌ی یک انباره را نشان می‌دهد.



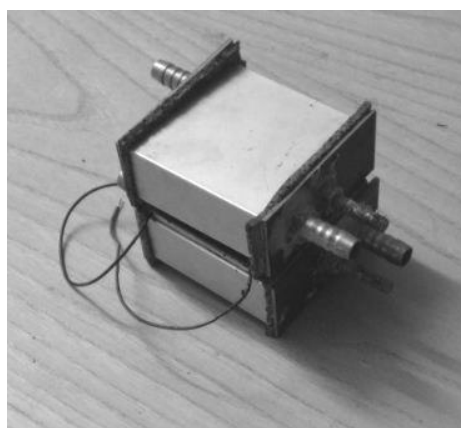
شکل ۴-۱۱: یک قوطی آلومینیومی با ورقه‌های فولادی و سرشیرها

ج) برای آب‌بند نمودن محل اتصال ورقه‌های فولادی به قوطی آلومینیومی از چوب‌پنبه‌های نسوز استفاده می‌گردد. به طور کلی برای آب‌بندی این انباره‌ها بایستی تمامی درزهای سرشیر و محل اتصالات را با استفاده از چسب سیلیکونی پوشاند (شکل ۴-۱۲).



شکل ۴-۱۲: انباره مورد آزمایش

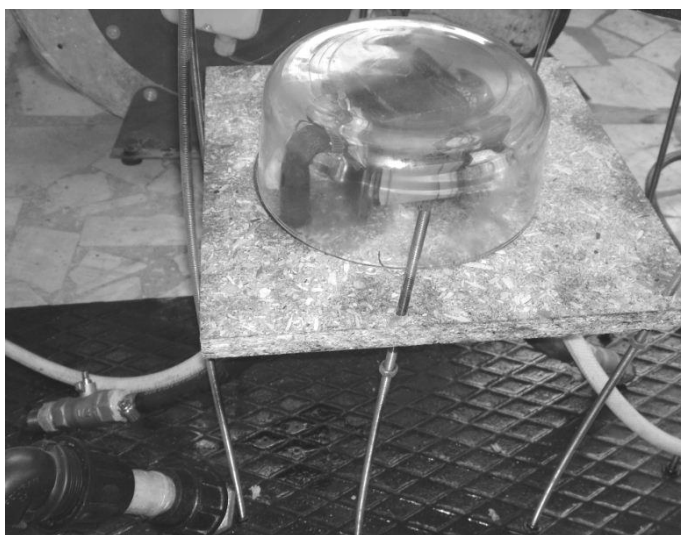
یک مدول ترموالکتریک از نوع "TEP1-12656-0.6" را در میان دو عدد انباره قرار داده و بدین ترتیب مولد ترموالکتریک مورد نظر ساخته شده است. نمونه‌ای از مولد ترموالکتریک ساخته شده در شکل ۴-۱۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۳: نمونه ساخته شده مولد ترموالکتریک

برای کاستن از مقاومت گرمایی در سطوح تماس میان انباره‌ها و مدول ترموالکتریک، لازم است تا با اعمال نیرو آن‌ها را به سطح مدول فشرود. این موضوع در هنگام قرار دادن مجموعه در حباب شیشه‌ای رعایت شده است.

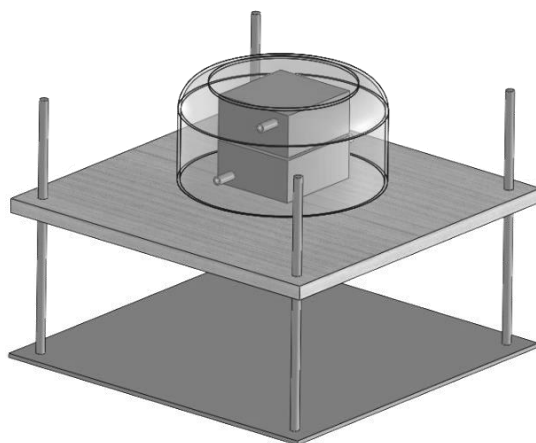
برای پرهیز از تلفات گرمایی ناشی از جریان همرفت هوا در اطراف مولد، مجموعه مبدل در یک حباب شیشه‌ای تخلیه شده از هوا قرار می‌گیرد. حباب شیشه‌ای در نظر گرفته شده برای ایزوله کردن مبدل، از جنس پیرکس می‌باشد که فضای داخلی آن با قرار دادن درپوشی از جنس چوب بسته می‌شود. درپوش دارای یک شیر تخلیه هوا است که پس از تخلیه هوا توسط یک پمپ خلا، بسته می‌شود. مجموعه مبدل در داخل حباب بر روی این درپوش چوبی نصب می‌گردد. لوله‌های ورود و خروج مایعات از انباره‌های مبدل که از درپوش می‌گذرند به خوبی آب‌بند شده‌اند. شکل ۴-۱۴ نمونه‌ای از این مبدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۴: نمونه مونتاژ شده از مبدل ترموالکتریک در حباب شیشه‌ای

درپوش حباب بسیار بزرگتر از دهانه آن در نظر گرفته شده است و در شرایط کاری مجموعه حباب و

درپوش به صورت وارونه قرار می‌گیرند تا نور خورشید از ته حباب بر مبدل بتابد. از این رو می‌توان از این درپوش به عنوان بستر نگهدارنده مجموعه حباب و مبدل بر روی پایه‌های شاسی سیستم نیز استفاده نمود. در شکل ۴-۱۵ وضعیت قرارگیری مبدل ترموالکتریک بر روی پایه‌ی شاسی مشاهده می‌شود.

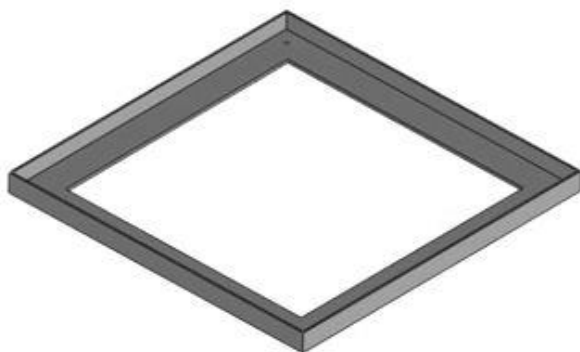


شکل ۴-۱۵: وضعیت قرارگیری مجموعه مبدل ترموالکتریک بر روی پایه شاسی

۴-۵-۲-۲- سازه مکانیکی دستگاه

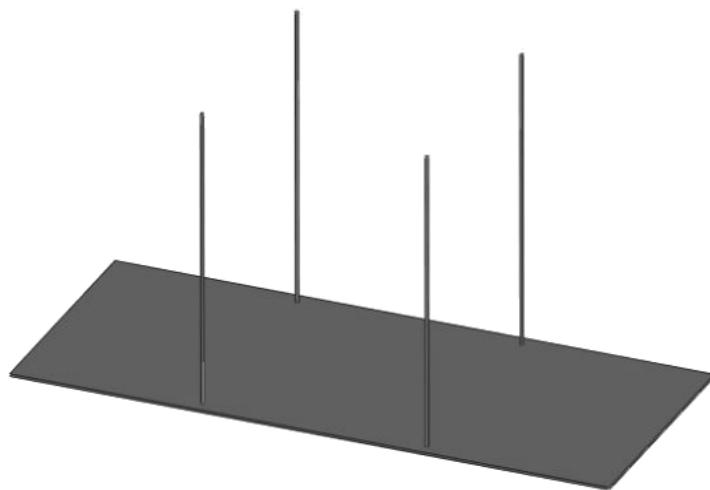
برای ثابت نگه داشتن لنز فرزنل در برابر نور خورشید و همچنین مجموعه مبدل ترموالکتریک در محدوده کانونی لنز، از سازه‌ای استفاده شده است که مراحل طراحی و ساخت آن به شرح ذیل می‌باشد:

الف) ابتدا برای نگهداری لنز فرزنل، یک قاب آهنی به ابعاد 31×31 سانتی‌متری ساخته می‌شود. برای تنظیم موقعیت قاب نسبت به شاسی سیستم چهار عدد سوراخ، برای عبور پیچ‌های تنظیم، در چهار گوشه قاب ایجاد می‌گردد. شماتیک طرح این قاب در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۶: شماتیک قاب نگه دارنده‌ی لنز فرزنل

ب) برای شاسی نگهدارنده از یک ورقه‌ی آهنی ضخیم به ابعاد 40×90 سانتی‌متر استفاده شده است، قاب آهنی فرزنل به واسطه ۴ عدد پیچ متری به قطر ۶ میلی‌متر که در چهار گوشه مربعی به ابعاد ۳۰ سانتی‌متری از هم بر روی ورق آهنی نصب شده است، بر روی این شاسی قرار می‌گیرد. طرح نمادینی از شاسی نگه‌دارنده‌ی لنز در شکل ۴-۱۷ مشاهده می‌شود.

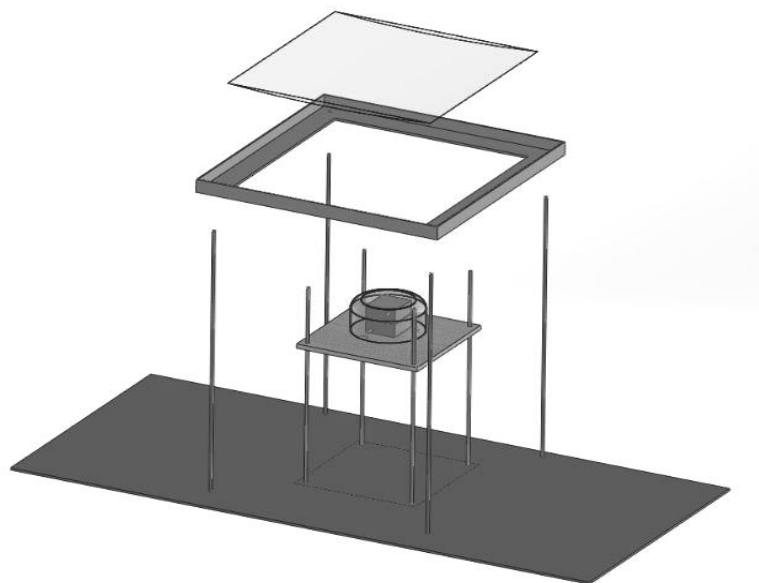


شکل ۴-۱۷: شماتیک پایه نگه‌دارنده‌ی لنز فرزنل

ج) درپوش چوبی حباب محتوی مبدل ترموالکتریک به واسطه ۴ عدد پیچ متری دیگر به قطر ۶

میلی‌متر، در چهار گوشه مربعی به ابعاد ۲۵ سانتی‌متری از هم، بر روی شاسی آهنی نصب می‌گردد. برای اینکه مبدل در کانون لنز قرار گیرد لازم است تا مراکز هندسی پایه‌های نگهدارنده لنز و مبدل بر همدیگر منطبق باشد.

د) برای مونتاژ مجموعه، قاب ساخته شده در مرحله‌ی (الف) به وسیله‌ی چهار زوج مهره‌ی ۶ میلی‌متری، بر روی پیچ‌های متری شاسی ثابت می‌گردد و سپس لنز فرزنل بر روی قاب قرار داده می‌شود. با تنظیم مهره‌ها می‌توان وضعیت قاب را نسبت به صفحه اصلی شاسی تنظیم نمود. شکل ۴-۱۸ طرح نمادین مکانیزم نگهدارنده‌ی لنز فرزنل و شکل ۴-۱۹ نمونه ساخته شده‌ی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۸: طرح نمادین سازه نگهدارنده‌ی لنز فرزنل



شکل ۴-۱۹: سازه مکانیکی نگهدارنده اجزاء سیستم مورد آزمایش

همانطور که در شکل ۴-۱۸ مشاهده می‌شود، درپوش چوبی حباب خلا، به واسطه پیچ‌های متری که برای همین منظور در طرح شاسی پیش بینی شده‌اند، بر صفحه شاسی دستگاه نصب می‌گردند. برای اینکه مجموعه مبدل در محدوده کانونی لنز قرار گیرد لازم است تا ارتفاع قرارگیری درپوش حباب پایین‌تر از ارتفاع قاب نگه دارنده‌ی لنز فرزنل باشد.

۴-۵-۳- روش آزمایش

قبل از تشریح آزمایش‌ها لازم است اقداماتی جهت افزایش راندمان سیستم و کاهش تلفات انجام شود. برای اینکه از اتلافات گرمایی در محل جذب تابش جلوگیری شود تمهیداتی به شرح ذیل اندیشیده شده است:

- ✓ برای جلوگیری از نشت حرارتی ناشی از جابه‌جایی^۱ با محیط، مجموعه مبدل ترموالکتریک در یک حباب شیشه‌ای تخلیه شده از هوا قرار گرفته است.
- ✓ برای اینکه از بازتابش پرتوهای نور به سطح جاذب انباره روغن جلوگیری گردد، سطح آن زیر

^۱Convection

شده و به رنگ تیره درآورده می‌شود.

✓ به منظور جلوگیری از نشت گرما از طریق بدنه حباب شیشه‌ای بایستی درپوش آن از جنس عایق (مانندچوب) انتخاب شود.

نظر به اینکه لنز فرزنل با متمرکز کردن نور خورشید، چگالی انرژی خورشیدی را در نقطه‌ی کانون خود به شدت افزایش می‌دهد، نگاه کردن با چشم غیرمسلح به کانون لنز فرزنل، آسیب‌های شدیدی به مردمک چشم وارد کرده و حتی باعث نابینایی می‌شود. لذا برای جلوگیری از صدمات وارده به چشم حتما بایستی از عینک‌های دودی مخصوص جوشکاری استفاده کرد.

با توجه به عایق‌بندی‌های انجام شده، برای اندازه‌گیری حداکثر دمای قابل حصول در محدوده کانونی لنز فرزنل، مجموعه مونتاژ شده در یک روز آفتابی در معرض تابش خورشید قرار می‌گیرد. در این شرایط انباره‌های روغن و آب پر می‌باشند ولی هیچ‌گونه جریان سیالی در این انباره‌ها وجود ندارد.

در آزمایش‌های دیگر، از جریان آب شهری به عنوان سیال مبرد در سطح گرماده مدول ترموالکتریک استفاده شده است. بدین منظور، این جریان به واسطه شلنگ‌های لاستیکی به انباره آب وارد و سپس از آن خارج می‌گردد. دبی جریان آب به واسطه یک شیر آب و به صورت دستی تنظیم می‌گردد.

روغن معدنی که در این طرح استفاده شده است، ساخت شرکت بهران بوده که ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی آن در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، به ترتیب ۲۰۰۹/۶۶۴ ژول برکیلوگرم-کلوین و ۰/۸۸۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد [90].

سیستم ساخته شده به شرح فوق، در برابر نور خورشید قرار داده می‌شود. شکل ۴-۲۰ سیستم خورشیدی ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۰: یک سیستم خورشیدی مورد آزمایش با قابلیت تولید برق و آب گرم

برای انجام آزمایشات در هر روز آفتابی، ابتدا به دستگاه حدود یک ساعت زمان داده می‌شود تا به حالت پایدار برسد. شروع آزمایشات ساعت ۸ صبح و پایان آن حدود ۱۶ می‌باشد. سپس به کمک تابش سنج موقعیت لنز نسبت به خورشید تنظیم شده و سپس تمامی اتصالات و شلنگ‌های ورودی و خروجی آب نیز بررسی می‌گردد. پس از اطمینان از موارد فوق، دستگاه در معرض تابش خورشید قرار داده می‌شود. در هر ساعت اقداماتی به شرح زیر انجام شده است:

- ✓ اندازه‌گیری دمای سطح مبدل به کمک دماسنج مادون قرمز
- ✓ اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل مدار باز ترموالکتریک به وسیله ولت‌متر
- ✓ ثبت دمای ورودی و خروجی آب به کمک دماسنج ترموکوپلی
- ✓ همچنین دبی آب ورودی به مبدل ترموالکتریک در تمامی آزمایشات ثابت و بر روی ۰/۰۰۲ کیلوگرم بر ثانیه تنظیم می‌شود. برای اندازه‌گیری دبی از یک بشر مدرج و یک زمان‌سنج استفاده شده است.

در هر یک از موارد بالا برای کاستن از اثر خطاهای اندازه‌گیری، سه مقدار متفاوت داده‌ها ثبت می‌گردد. آزمایشات به ترتیبی که در فوق آمده است در زمان‌های مختلفی تکرار شده و نتایج آن در جداول و نمودارهای ثبت شده در فصل پنجم منعکس می‌شود.

۴-۶- دستگاه‌های اندازه‌گیری

در این پروژه از تجهیزات گوناگونی به شرح ذیل، برای ثبت و اندازه‌گیری داده‌ها استفاده شده است:

✓ دماسنج غیر تماسی مادون قرمز

✓ دماسنج ترموکوبلی

✓ تابش سنج خورشیدی

✓ ولت‌متر دیجیتال

مشخصات فنی تجهیزات به کار رفته در ذیل توصیف شده است:

۴-۶-۱- دماسنج غیر تماسی مادون قرمز

یکی از دستگاه‌های مورد استفاده در این پروژه، دماسنج لیزری یا غیرتماسی از نوع (BG 42) ساخت شرکت بلوگیزمو^۱ می‌باشد. از این دماسنج جهت اندازه‌گیری دماهای نقطه‌ی کانونی لنز و سطوح گرماگیر و گرماده مولد ترموالکتریک استفاده می‌شود. شکل ۴-۲۱ نمونه‌ای از دماسنج لیزری را نشان می‌دهد.

^۱Blue Gizmo



شکل ۴-۲۱: دماسنج لیزری استفاده شده برای اندازه‌گیری دمای سطح گرماگیر مبدل [89]

بازه‌ی اندازه‌گیری این دستگاه از ۲۰- تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. خطای آن در صورت رعایت دستورالعمل پیشنهادی شرکت سازنده‌ی آن حدود ± 2 درجه سانتی‌گراد بوده و زمان پاسخ به شلیک آن حدود ۰/۵ ثانیه می‌باشد [91].

۴-۶-۲- دماسنج ترموکوپلی

از دماسنج ترموکوپلی جهت اندازه‌گیری دماهای آب گرم خروجی و آب سرد ورودی به مبدل استفاده می‌شود. این دماسنج محصول شرکت آمنی اینسترومنت^۱ بوده و با مدل Testo 915-1 به بازار عرضه شده است. نمونه‌ای از یک دماسنج ترموکوپلی در شکل ۴-۲۲ مشاهده می‌شود.

^۱Omni Instrument



شکل ۴-۲۲: دماسنج ترموکوپلی استفاده شده در اندازه‌گیری دمای آب [90]

این دماسنج قادر است تا دمایی حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد را اندازه‌گیری کند. همچنین دقت این

دستگاه حدود ۰/۱ سانتی‌گراد می‌باشد [92].

۴-۶-۳- ولت‌متر دیجیتال^۱

سومین دستگاهی که در این پروژه به کار رفته است، آومتر می‌باشد که برای اندازه‌گیری ولتاژ مدار باز

مدول ترموالکتریک استفاده شده است. شکل ۴-۲۳ نمونه‌ای از این آومتر را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۳: آوومتر استفاده شده در اندازه‌گیری ولتاژ [91]

این دستگاه ساخت شرکت هیوکی^۱ و با مدل (Hioki ۳۲۰۰) به بازار عرضه شده است [93].

۴-۶-۴- تابش سنج خورشیدی^۲

یکی دیگر از دستگاه‌هایی که در این آزمایش به کار می‌رود، تابش سنج (مدل TES 1333R) می‌باشد. این تابش سنج میزان تابش خورشید را هم بر حسب w/m^2 و هم بر حسب Btu/h محاسبه می‌کند. همچنین قادر است تا ۲۰۰۰ وات بر مترمربع را اندازه‌گیری کند. نمونه‌ای از یک تابش سنج در شکل ۴-۲۴ مشاهده می‌شود. این دستگاه در شرایط دمایی بین ۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد و در رطوبت زیر ۸۰ درصد کار می‌کند [93].

^۱Hioki

^۲Solar power meter



شکل ۴-۲۴: تابش‌سنج استفاده شده در اندازه‌گیری شدت تابش خورشید [91]

۵- فصل پنجم

تحلیل نتایج آزمایشگاهی

۵-۱- مقدمه

برای تحقیق درباره حدود توان الکتریکی و گرمایی قابل استحصال از یک مجموعه مبدل ترموالکتریک که در محدوده کانونی یک لنز فرزنل قرار گرفته است، داده‌های ثبت شده در آزمایشات، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج بررسی به برآورد تعداد بهینه لنزهای فرزنل لازم، جهت بهره‌برداری حداکثری از قابلیت اسمی تولید برق مدول ترموالکتریک (به کار برده شده در این پروژه) می‌انجامد.

آزمایش‌های انجام شده در روزهای ۱، ۲، ۵ و ۱۰ شهریورماه ۱۳۹۱ در محل دانشگاه صنعتی نوشیروانی واقع در شهر بابل انجام شده است. ارتفاع بابل از سطح دریا ۵۷۴ متر و عرض جغرافیایی آن $36/5$ درجه می‌باشد.

در قسمت‌های بعدی، ضمن مروری بر داده‌های اندازه‌گیری شده در طول آزمایش‌ها، قابلیت تولید توان الکتریکی و گرمایی در نمونه آزمایشگاهی بررسی شده و با جمع بندی نتایج حاصل، تعداد لنزهای لازم برای بهره‌برداری حداکثری از توان یک مدول ترموالکتریک برآورد می‌گردد.

۵-۲- نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده

مطابق روش توصیف شده در فصل پیش، نخست لازم است تا بیشترین دمای قابل حصول در سطح انباره روغن در شرایطی که هیچ جریان سیالی برای انتقال گرما از سیستم وجود ندارد، ارزیابی گردد. بدین منظور در روز اول شهریورماه ۱۳۹۱ آزمایشی انجام شده است که در آن، دمای سطح جاذب انباره‌ی روغن اندازه‌گیری شد. این آزمایش در حوالی ظهر (که شدت تابش خورشید بیشترین مقدار را داراست)، با بستن مجاری عبور سیالات آب و روغن به انباره‌ها انجام شده است. بیشترین مقدار گزارش شده برای دمای سطح جاذب 130 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. با فرض اینکه دمای دیواره سرد در 30 درجه سانتی‌گراد حفظ گردد و نرخ تامین گرما از طریق خورشید به گونه‌ای باشد که دما در دیواره گرم همواره

در ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد قرار داشته باشد، طبق نمودار نشان داده شده در شکل ۴-۶ ماکزیمم توان الکتریکی قابل استحصال برابر با ۶ وات می‌باشد.

مطابق روش توصیف شده در فصل پیش، در سه روز دیگر با انجام آزمایش‌هایی که در آن‌ها جریان آب شهری با دبی ۰/۰۰۲ لیتر بر ثانیه در انباره برقرار است، پتانسیل سیستم طراحی شده برای تولید برق و آب گرم، مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشات از ساعت ۸ صبح تا ۱۶ عصر به طول می‌انجامید. با لحاظ نمودن یک بازه یک ساعته در شروع آزمایش برای پایدار شدن شرایط دمایی سیستم، داده‌برداری در بازه‌های یک ساعته انجام می‌پذیرد که در هر مرحله ۵ نوع داده به شرح ذیل ثبت شده است:

- T_h : دمای سمت گرم (اتصال گرم^۱) ترموالکتریک
- T_{c1} : دمای آب ورودی به انباره
- T_{c2} : دمای آب خروجی از انباره
- V : ولتاژ تولیدی مدار باز ترموالکتریک
- I_t : توان تابشی خورشید در واحد سطح

سپس برای انجام محاسبات تکمیلی، با پردازش داده‌های اندازه‌گیری شده، مقادیر ذیل محاسبه می‌گردد:

- T_c : میانگین دمای آب در انباره
- ΔT : اختلاف دمای سمت گرم و میانگین دمای آب در انباره
- I_{FL} : توان تابشی خورشید در سطح لنز فرزنل

نتایج حاصل در روزهای آزمایش به ترتیب تاریخ در جداول ۵-۱ تا ۵-۳ ثبت شده است.

^۱ Hot junction

جدول ۵-۱: داده‌های مربوط به روز دوم شهریور

Time	$T_h(^{\circ}C)$	$T_{c1}(^{\circ}C)$	$T_{c2}(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	$\Delta T(^{\circ}C)$	V (volt)	$I_t(w/m^2)$	$I_{FL}(w)$
۹	۴۱/۲۱	۱۹/۱۳	۲۰/۸۴	۱۹/۹۸	۲۱/۲۳	۱/۰۲۹	۴۷۰	۴۲/۳
۱۰	۷۰/۵۲	۱۹/۱۳	۲۱/۳۲	۲۰/۲۲۵	۵۰	۱/۳۹۹	۵۳۳/۴۴	۴۸
۱۱	۸۱/۱۴	۱۹/۱۳	۲۲/۶۳	۲۰/۸۸	۶۰/۳۱	۱/۹۹	۶۵۰/۱۱	۵۸/۵
۱۲	۹۱/۲۴	۱۹/۱۳	۲۳/۰۷	۲۱/۱	۷۰/۱۴	۲/۲۷۷	۷۰۵/۹۸	۶۳/۵
۱۳	۸۲/۷۵	۱۹/۱۳	۲۲/۸۷	۲۱	۶۱/۷۵	۲/۰۸۷	۶۶۲/۲۱	۵۹/۵۹
۱۴	۷۳/۴۹	۱۹/۱۳	۲۱/۹۳	۲۱/۵۳	۵۲/۹۶	۱/۵۶	۵۵۷/۱۲	۵۰/۱۴
۱۵	۵۹/۱۴	۱۹/۱۳	۲۱/۰۷	۲۰/۱	۳۹/۰۴	۱/۳۸۴	۵۲۰/۱۲	۴۶/۸۱
۱۶	۴۲/۱۷	۱۹/۱۳	۲۰/۹۵	۲۰/۰۴	۳۵/۱۱	۱/۲۱۷	۴۸۲/۳۲	۴۳/۴

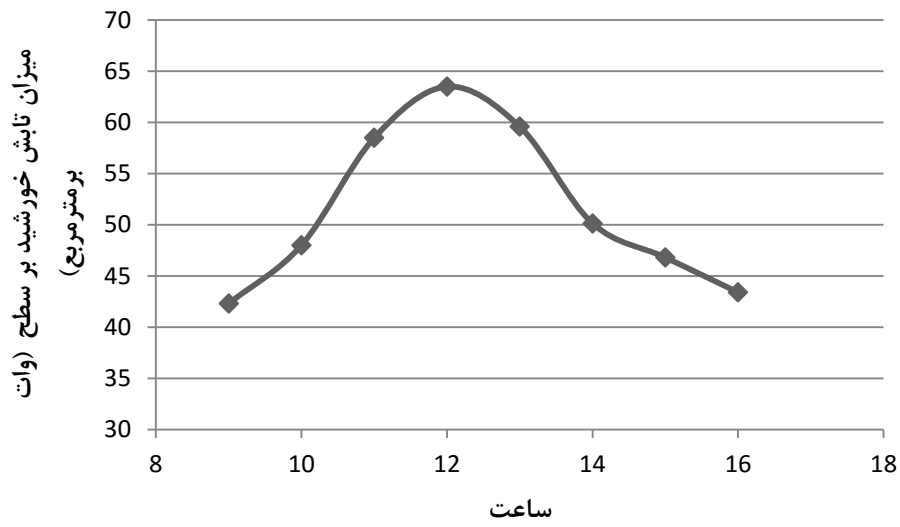
جدول ۵-۲: داده‌های مربوط به روز پنجم شهریور

Time	$T_h(^{\circ}C)$	$T_{c1}(^{\circ}C)$	$T_{c2}(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	$\Delta T(^{\circ}C)$	V(volt)	$I_t(w/m^2)$	$I_{FL}(w)$
۹	۴۲/۷۲	۱۹/۱۵	۲۰/۸۷	۲۰/۰۱	۲۲/۷۱	۱/۱۱۷	۴۶۲/۳۴	۴۱/۶۱
۱۰	۶۱/۴۴	۱۹/۱۵	۲۱/۵	۲۰/۳۲	۴۱/۲	۱/۳۸۸	۵۲۸/۴۷	۴۷/۵۶
۱۱	۷۸/۳۹	۱۹/۱۵	۲۲/۰۲	۲۰/۵۸	۵۷/۸۱	۱/۹۸	۶۴۷/۸۳	۵۸/۳۰
۱۲	۸۹/۷۲	۱۹/۱۵	۲۲/۹۵	۲۱/۰۵	۶۹/۶۷	۲/۲۳۲	۷۰۱/۴۳	۶۳/۱۲
۱۳	۸۱/۶۳	۱۹/۱۵	۲۲/۶۵	۲۰/۹	۶۰/۷۳	۲/۰۴۷	۶۵۸/۴۹	۵۹/۲۶
۱۴	۶۳/۷۵	۱۹/۱۵	۲۱/۱۷	۲۰/۱۶	۴۳/۵۹	۱/۵۰۴	۵۵۱/۳۳	۴۹/۶۵
۱۵	۵۲/۵	۱۹/۱۵	۲۰/۹۷	۲۰/۰۶	۳۲/۴۴	۱/۳۵۵	۵۱۵/۷۲	۴۶/۴۱
۱۶	۴۴/۷۲	۱۹/۱۵	۲۰/۵۸	۱۹/۸۶	۲۴/۸۶	۱/۱۶۲	۴۷۵/۱۳	۴۲/۷۶

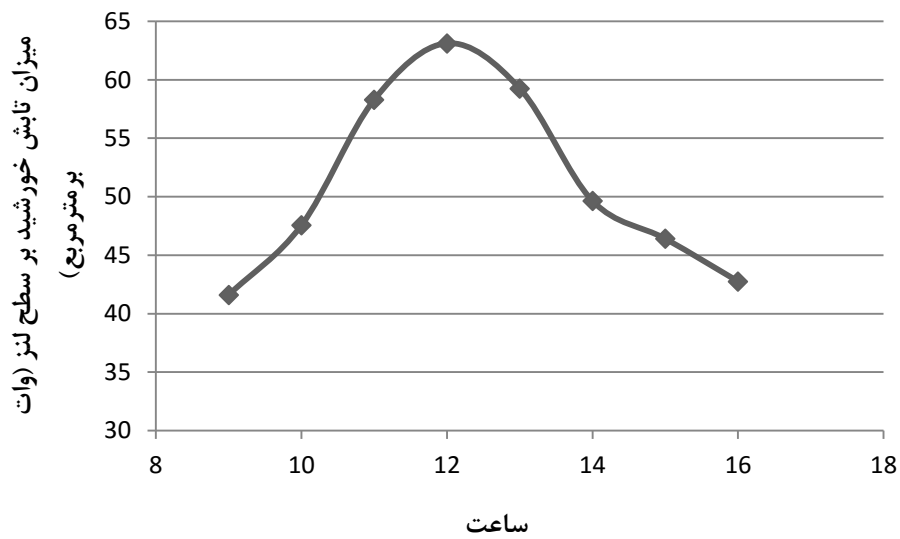
جدول ۵-۳: داده‌های ثبت شده در روز دهم شهریور

<i>Time</i>	$T_h(^{\circ}C)$	$T_{c1}(^{\circ}C)$	$T_{c2}(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	$\Delta T(^{\circ}C)$	$V(volt)$	$I_t(w/m^2)$	$I_{FL}(w)$
۹	۴۱/۰۷	۱۹/۱۸	۲۰/۱۹	۱۹/۶۸	۲۱/۳۹	۱/۰۲۷	۴۲۰/۷۹	۳۷/۸۷
۱۰	۵۱/۹۲	۱۹/۱۸	۲۱/۱۱	۲۰/۱۴	۳۱/۷۸	۱/۳۵۵	۵۳۱/۱۷	۴۷/۸
۱۱	۷۹/۴۴	۱۹/۱۸	۲۱/۸۵	۲۰/۵۱۵	۵۸/۹۲	۱/۹۸۹	۶۵۰/۱۱	۵۸/۵
۱۲	۸۵/۴۲	۱۹/۱۸	۲۲/۴۳	۲۰/۸	۶۴/۶۲	۲/۱۹۶	۶۹۷/۸۹	۶۲/۸۱
۱۳	۸۰/۴۴	۱۹/۱۸	۲۱/۵۵	۲۰/۳۶	۶۰/۰۸	۲/۰۲۱	۶۶۱/۹۱	۵۹/۵۷
۱۴	۵۷/۳۳	۱۹/۱۸	۲۱/۶۸	۲۰/۴۳	۳۶/۹	۱/۴۲۱	۵۶۱/۴۴	۵۰/۵۲
۱۵	۵۲/۷۹	۱۹/۱۸	۲۱/۴۵	۲۰/۳۱	۳۲/۴۸	۱/۳۵۹	۵۳۲/۱۹	۴۷/۸۹
۱۶	۴۷/۵۵	۱۹/۱۸	۲۰/۷۷	۱۹/۹۶	۲۷/۵۹	۱/۰۵۸	۴۳۰/۱۹	۳۸/۷۱

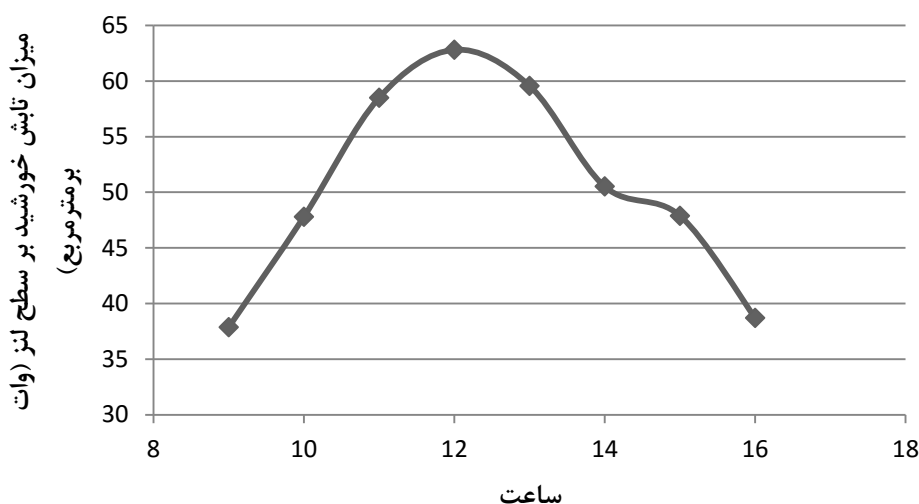
با استناد به داده‌های ثبت شده در جداول ۵-۱ تا ۵-۳ می‌توان نمودار تغییرات زمانی تابش خورشید بر سطح لنز فرزنل را در طول هر روز آزمایش ترسیم نمود. این نمودارها در شکل‌های ۵-۱ تا ۵-۳ رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد که ماکزیمم توان رسیده به لنز فرزنل ۶۳/۵ می‌باشد که در ساعت ۱۲ روز دوم ماه شهریور ثبت شده است.



شکل ۵-۱: نمودار تابش خورشید بر سطح لنز در طول روز دوم شهریور



شکل ۵-۲: نمودار تابش خورشید بر سطح لنز در طول روز پنجم شهریور



شکل ۵-۳: نمودار تابش خورشید بر سطح لنز در طول روز دهم شهریور

لازم به ذکر است که علی رغم تمهیدات اندیشیده شده، مسیر عبور انرژی از بدو رسیدن آن به سطح لنز تا هنگام رسیدن آن به دیواره گرماگیر مدول ترموالکتریک با تلفات بسیاری همراه است. از آن جمله، می توان به انعکاس نور در مسیر انتقال انرژی، هدایت گرما در مسیره های ناخواسته و همرفت گرما توسط هوای محیط و همچنین اتلافات گرمایی ناشی از تشعشع اجزای سیستم را نام برد. به دلایل گوناگون علمی مقدار این تلفات در شدت تابش بالا بیشتر است.

همچنین با محاسبه سطح زیر منحنی توان تابشی مشاهده می گردد که مجموع انرژی تابشی گسیل شده به سطح لنز در طول روزهای آزمایش به ترتیب تاریخ برابر با ۲۵۲، ۲۴۴/۸ و ۲۲۶/۷۸ کیلوژول است. با استناد به داده های ثبت شده و همچنین داده های معرف رفتار ترموالکتریکی مدول استفاده شده، می توان قابلیت تولید توان الکتریکی سیستم (مورد آزمایش) را ارزیابی نمود. همچنین با توجه به داده های مذکور و لحاظ نمودن مشخصه های ترمودینامیکی سیستم، می توان قابلیت تولید آب گرم آن را نیز مورد بررسی قرار داد.

۳-۵- بررسی قابلیت تولید توان الکتریکی

برای ارزیابی قابلیت تولید توان الکتریکی مدول استفاده شده، با استناد به مقادیر اندازه‌گیری شده برای ولتاژ مدار باز مدول و روابط ریاضی توصیف کننده مدارهای الکتریکی، می‌توان ماکزیمم توان قابل استحصال از مدول و همچنین شدت جریان مدار (در این توان) را محاسبه نمود. با لحاظ نمودن توان تابشی رسیده به سطح لنز فرزنل نیز می‌توان بازده الکتریکی کل سیستم را بدست آورد.

بر این اساس، داده‌هایی که مبین رفتار ترموالکتریک سیستم، در روزهای آزمایش می‌باشند، محاسبه و در جداول ۱-۵ تا ۳-۵ ثبت گردیده‌اند. عنوان داده‌های ثبت شده در جداول نامبرده به شرح ذیل می‌باشد:

- V : ولتاژ تولیدی مدار باز ترموالکتریک
- I : جریان الکتریکی در شرایط ماکزیمم توان؛ این جریان که در شرایط *mached load* محاسبه شده است، برابر است با $I = \frac{V}{2r}$ که در آن $r = 1.2\Omega$ مقاومت داخلی مدول و V ولتاژ مدار باز مدول ترموالکتریک می‌باشد.
- P : ماکزیمم توان تولیدی ترموالکتریک؛ این توان که در شرایط *mached load* محاسبه شده است، برابر است با $P = \frac{V^2}{4r}$ که در آن $r = 1.2\Omega$ مقاومت داخلی مدول و V ولتاژ مدار باز مدول ترموالکتریک می‌باشد.
- I_{FL} : توان تابشی دریافت شده در سطح لنز فرزنل
- η_e : بازده الکتریکی کل؛ نسبت توان الکتریکی تولیدی بر توان تابشی دریافت شده در سطح لنز فرزنل

جدول ۴-۵: داده‌های مبین رفتار ترموالکتریک سیستم در روز دوم شهریور

<i>Time</i>	<i>V(volt)</i>	<i>I(A)</i>	<i>P_o(watt)</i>	<i>I_{FL}(w / m²)</i>	<i>η_e(%)</i>
۹	۱/۰۲۹	۰/۴۲۸۶	۰/۲۲۰۴	۴۲/۳	۰/۵۲
۱۰	۱/۳۹۹	۰/۵۸۳	۰/۴۰۷۸	۴۸	۰/۸۵
۱۱	۱/۹۹	۰/۸۲۹۳	۰/۸۲۵۳	۵۸/۵	۱/۴۱
۱۲	۲/۲۷۷	۰/۹۴۸۷	۱/۰۸	۶۳/۵	۱/۷
۱۳	۲/۰۸۷	۰/۸۶۹۵	۰/۹۰۷۳	۵۹/۵۹	۱/۵
۱۴	۱/۵۶	۰/۶۴۹۹	۰/۵۰۶۸	۵۰/۱۴	۱/۰۱
۱۵	۱/۳۸۴	۰/۵۷۶۶	۰/۳۹۹	۴۶/۸۱	۰/۸
۱۶	۱/۲۱۷	۰/۵۰۷	۰/۳۰۸۴	۴۳/۴	۰/۷

جدول ۵-۵: داده‌های مبین رفتار ترموالکتریک سیستم در روز پنجم شهریور

<i>Time</i>	<i>V(volt)</i>	<i>I(A)</i>	<i>P_o(watt)</i>	<i>I_{FL}(w / m²)</i>	<i>η_e(%)</i>
۹	۱/۱۱۷	۰/۴۶۵۶	۰/۲۶۰۱	۴۱/۶۱	۰/۶۲
۱۰	۱/۳۸۸	۰/۵۷۸۵	۰/۴۰۱۶	۴۷/۵۶	۰/۸۴
۱۱	۱/۹۸	۰/۸۲۴۹	۰/۸۱۶۵	۵۸/۳۰	۱/۴
۱۲	۲/۲۳۲	۰/۹۳۰۱	۱/۰۳۸	۶۳/۱۲	۱/۶۴
۱۳	۲/۰۴۷	۰/۸۵۳۱	۰/۸۷۳۳	۵۹/۲۶	۱/۴۷
۱۴	۱/۵۰۴	۰/۶۲۶۷	۰/۴۷۱۳	۴۹/۶۵	۰/۹۴
۱۵	۱/۳۵۵	۰/۵۵۶۲	۰/۳۷۱۲	۴۶/۴۱	۰/۷۹
۱۶	۱/۱۶۲	۰/۴۸۴۱	۰/۲۸۱۲	۴۲/۷۶	۰/۶۵

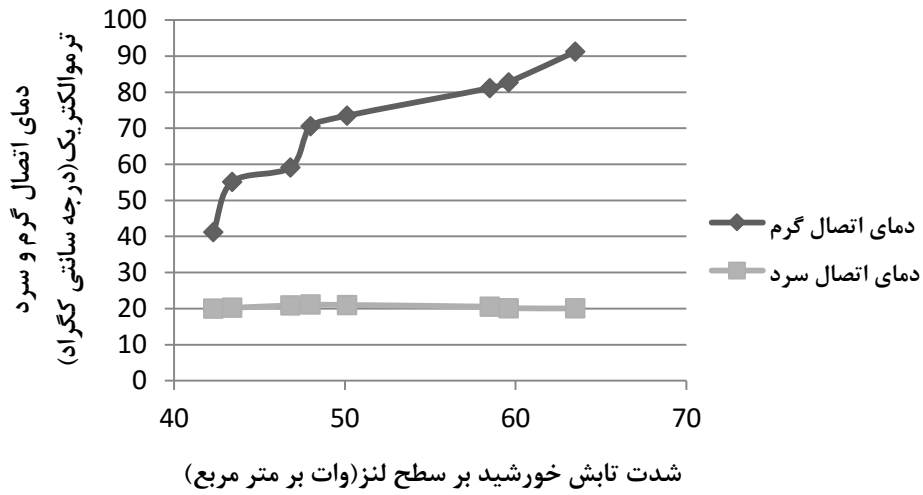
جدول ۵-۶: داده‌های مبین رفتار ترموالکتریک سیستم در روز دهم شهریور

<i>Time</i>	<i>V(volt)</i>	<i>I(A)</i>	<i>P_o(watt)</i>	<i>I_{FL}(w / m²)</i>	<i>η_e(%)</i>
۹	۱/۰۲۷	۰/۴۲۸	۰/۲۱۹۸	۳۷/۸۷	۰/۵۸
۱۰	۱/۳۵۵	۰/۵۶۴۴	۰/۳۸۲۳	۴۷/۸	۰/۸
۱۱	۱/۹۸۹	۰/۸۲۸۸	۰/۸۲۴۲	۵۸/۵	۱/۴
۱۲	۲/۱۹۶	۰/۹۱۵۲	۱/۰۰۵	۶۲/۸۱	۱/۶
۱۳	۲/۰۲۱	۰/۸۴۲۲	۰/۸۵۱۲	۵۹/۵۷	۱/۴۲
۱۴	۱/۴۲۱	۰/۵۹۲	۰/۴۲۰۵	۵۰/۵۲	۰/۸۳
۱۵	۱/۳۵۹	۰/۵۶۶۴	۰/۳۸۵	۴۷/۸۹	۰/۸
۱۶	۱/۰۵۸	۰/۴۴۰۶	۰/۲۳۳	۳۸/۷۱	۰/۶

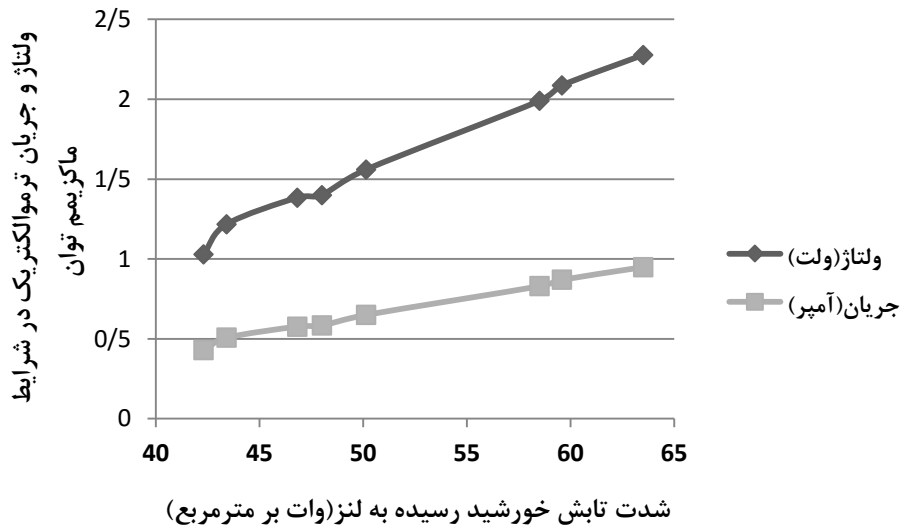
با افزایش شدت تابش نورخورشید، میزان انرژی متمرکز شده در کانون لنز فرزنل افزایش یافته و این عامل سبب تولید توان بیشتری می‌گردد. از آنجا که بازده رابطه‌ی مستقیمی با میزان تولید توان دارد، لذا با افزایش توان، بازده نیز افزایش می‌یابد. ماکزیمم مقدار ثبت شده برای راندمان الکتریکی سیستم، در طول دوره آزمایش، ۱/۷ درصد می‌باشد که در ساعت ۱۲ روز دوم شهریور ماه بر اساس داده‌های ثبت شده محاسبه شده است.

همانطور که ملاحظه می‌گردد، بازدهی تبدیل انرژی خورشیدی به برق، در این‌گونه سیستم‌ها پایین می‌باشد. هرچند این مقادیر در همان محدوده‌ای است که در مراجع به آن اشاره شده است [94].

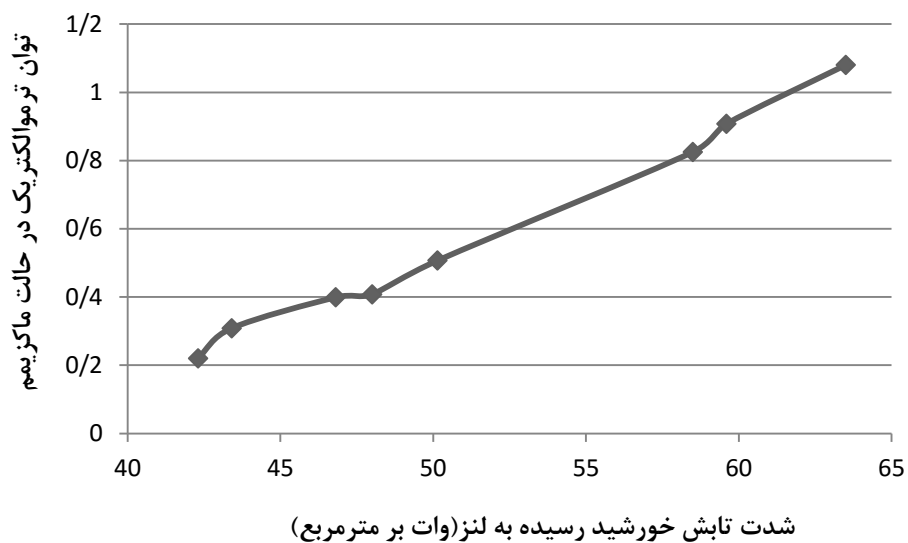
نمودارهای تغییرات دما در اتصالات گرم و سرد مدول ترموالکتریک، ولتاژ مدار باز و همچنین توان ماکزیمم قابل تولید و جریان الکتریکی در شرایط توان ماکزیمم برحسب شدت تابش رسیده به لنز فرزنل در روز دوم شهریور ماه در شکل‌های ۴-۵ تا ۶-۵ رسم شده است.



شکل ۴-۵: تغییرات دمای اتصال گرم و سرد ترموالکتریک برحسب شدت تابش رسیده به لنز در روز دوم شهریور



شکل ۵-۵: تغییرات ولتاژ و جریان ترموالکتریک در حالت ماکزیمم توان برحسب شدت تابش رسیده به لنز در روز دوم شهریور

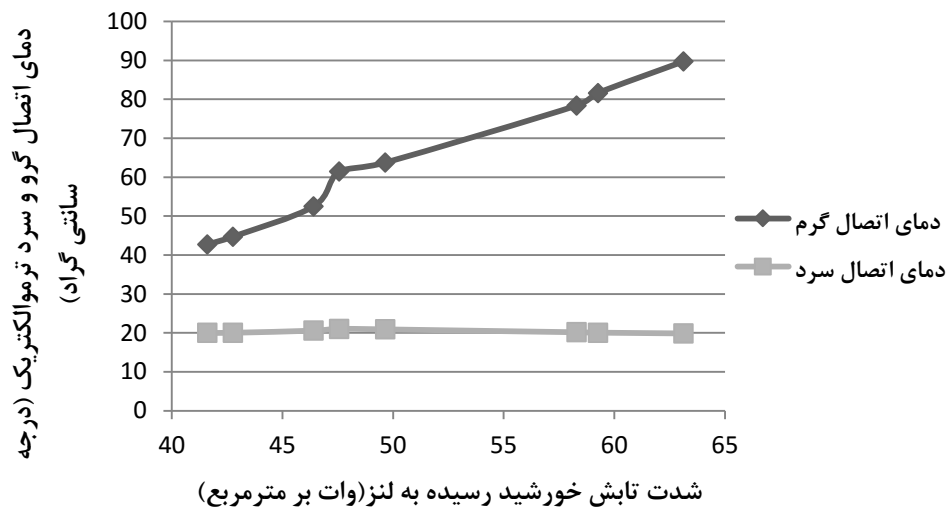


شکل ۵-۶: توان ترموالکتریک ماکزیمم بر حسب شدت تابش رسیده به لنز در روز دوم شهریور

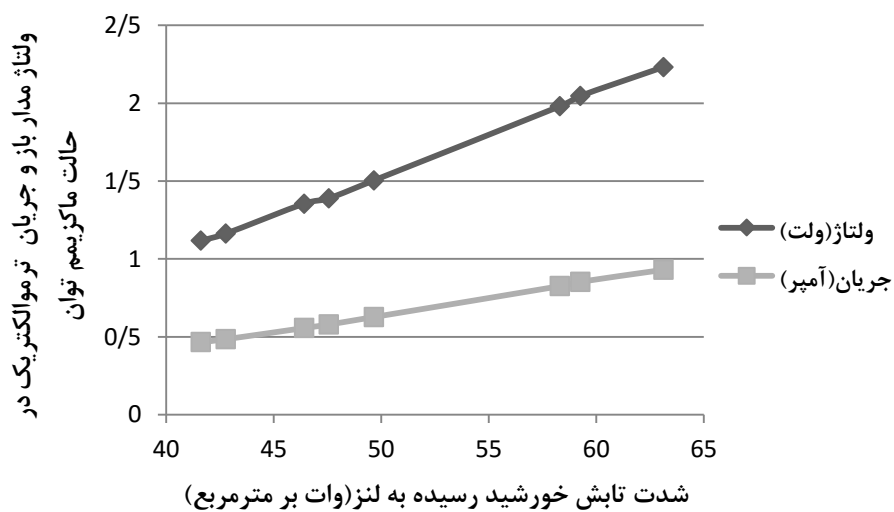
نمودارهای توصیف شده در بالا، برای نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در روز پنجم شهریور در

شکل‌های ۷-۵ تا ۹-۵ و برای آزمایش‌های انجام شده در روز دهم شهریور در شکل‌های ۱۰-۵ تا ۱۱-۵

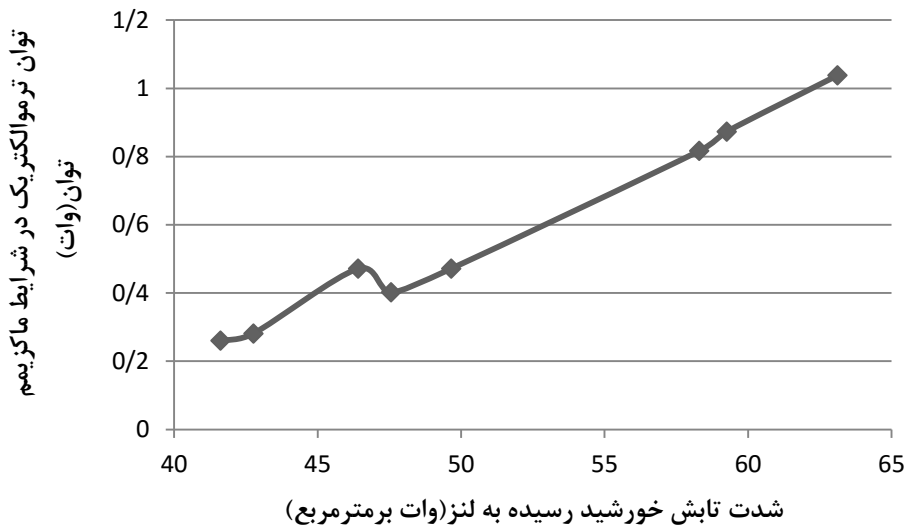
رسم شده است.



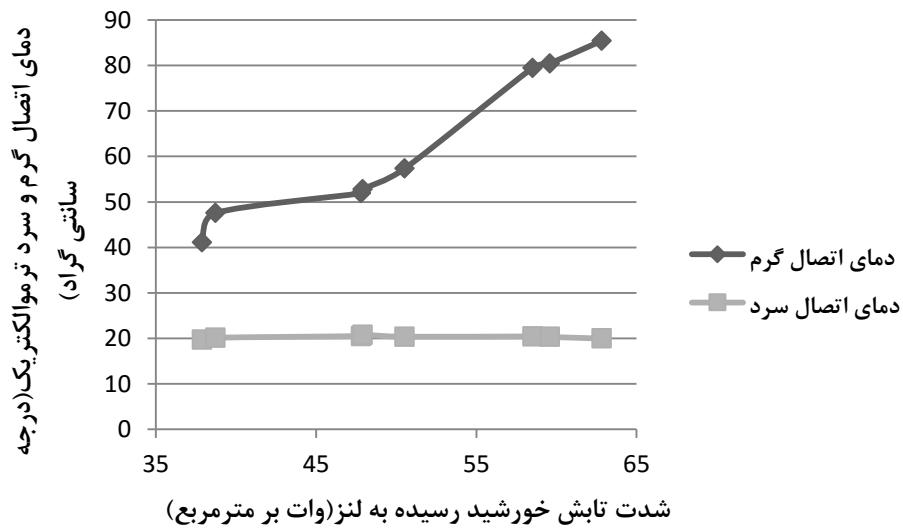
شکل ۵-۷: دمای اتصال گرم و سرد ترموالکتریک بر حسب تابش در روز پنجم شهریور



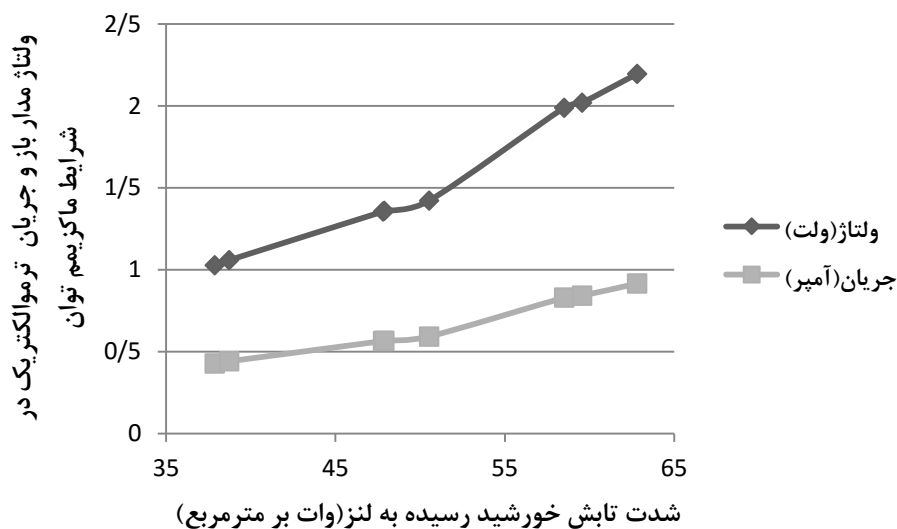
شکل ۵-۸: تغییرات ولتاژ مدار باز و جریان ترموالکتریک در حالت ماکزیمم توان بر حسب تابش در روز پنجم شهریور



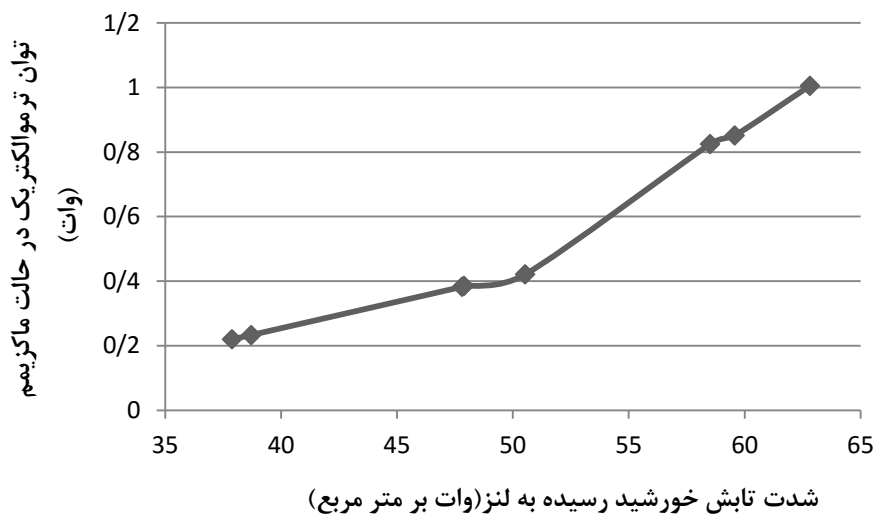
شکل ۵-۹: توان ماکزیمم ترموالکتریک بر حسب شدت تابش در روز پنجم شهریور



شکل ۵-۱۰: دمای اتصال گرم و سرد ترموالکتریک بر حسب تابش در روز دهم شهریور



شکل ۵-۱۱: تغییرات ولتاژ مدار باز و جریان ترموالکتریک در حالت ماکزیمم توان بر حسب تابش در روز دهم شهریور



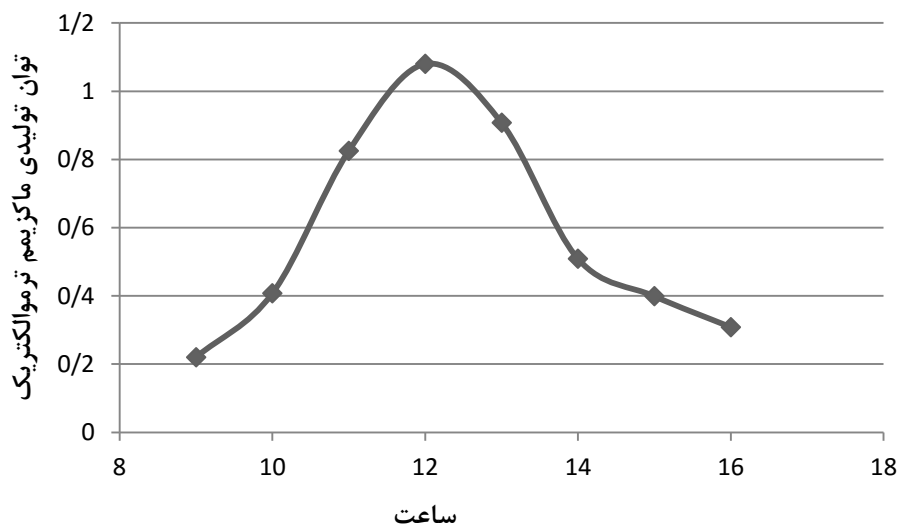
شکل ۵-۱۲: توان ترموالکتریک ماکزیمم بر حسب شدت تابش در روز دهم شهریور

با توجه به شکل‌های ۴-۵، ۷-۵ و ۱۰-۵ می‌توان دریافت که با افزایش شدت تابش خورشید، دمای اتصال گرم ترموالکتریک به طور کلی افزایش می‌یابد. هرچند آب ورودی به انباره اتصال سرد ترموالکتریک از آب شهری تامین می‌گردد و دمای آن نیز لزوماً ثابت است اما دمای این آب پس از عبور از انباره بالا

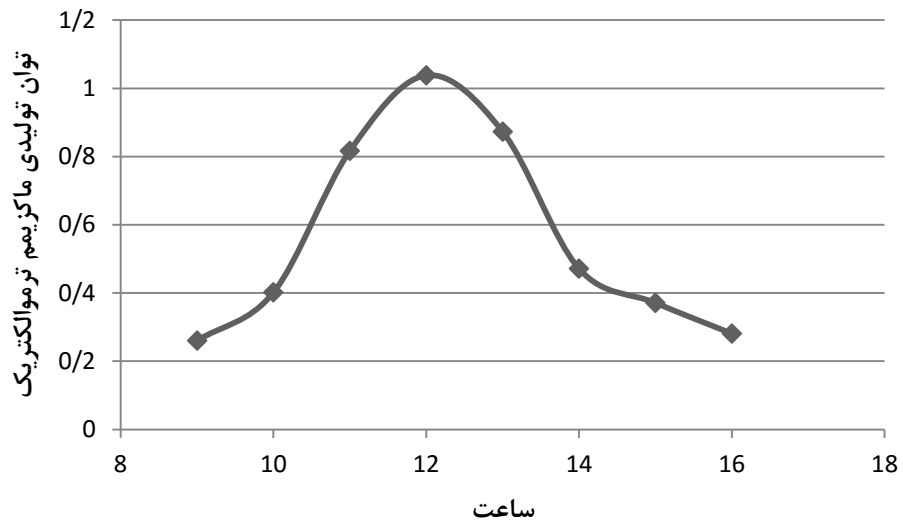
می‌رود. همچنان که پیش از این آمد، برای محاسبه دمای اتصال سرد مدول ترموالکتریک از میانگین دمای ورودی و خروجی انباره استفاده می‌گردد.

همانطور که در شکل‌های ۵-۵، ۵-۸ و ۵-۱۱ مشاهده می‌شود، ولتاژ مدار باز مدول ترموالکتریک به طور کلی با افزایش شدت تابش خورشید، افزایش می‌یابد. به تبع آن چون توان ماکزیمم تولیدی ترموالکتریک، تابعی از ولتاژ مدار باز آن است، پس انتظار می‌رود با افزایش این ولتاژ، ماکزیمم توان الکتریکی قابل تولید ترموالکتریک نیز زیاد گردد. این موضوع در شکل‌های ۵-۶، ۵-۹ و ۵-۱۲ به درستی نمایان است.

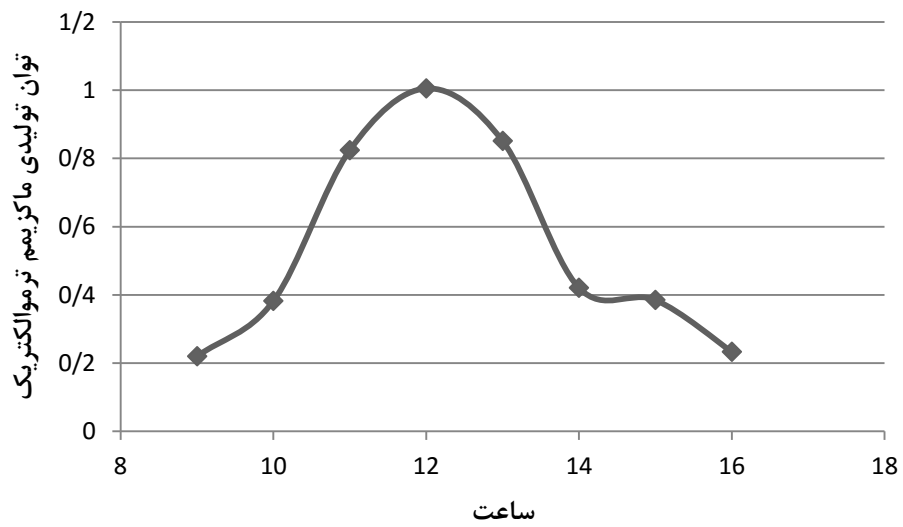
با استناد به نتایج جداول ۵-۴ تا ۵-۶، رابطه زمانی ماکزیمم توان الکتریکی تولیدی در طول روز به تفکیک روزهای آزمایش در شکل‌های ۵-۱۳ تا ۵-۱۵ ترسیم شده است.



شکل ۵-۱۳: نمودار ماکزیمم توان الکتریکی تولیدی در طول روز دوم شهریور



شکل ۵-۱۴: نمودار ماکزیمم توان الکتریکی تولیدی در طول روز پنجم شهریور



شکل ۵-۱۵: نمودار ماکزیمم توان الکتریکی تولیدی در طول روز دهم شهریور

در ابتدا (ساعات نزدیک به صبح) به دلیل کم بودن تابش خورشید و پایین بودن دمای سمت گرم ترموالکتریک، میزان توان تولیدی بسیار کم است. لذا رفته رفته با افزایش تابش خورشید میزان توان دریافتی لنز فرزنل افزایش یافته و این امر سبب ازدیاد دمای سمت گرم ترموالکتریک می‌شود. این موضوع به خوبی در شکل‌های ۵-۱۳ تا ۵-۱۵ نمایان است. نتایج نشان می‌دهد که ماکزیمم توان الکتریکی قابل تولید در دوره آزمایش ۱/۰۸ بوده که در ساعت ۱۲ روز دوم شهریور ثبت شده است.

همچنین با محاسبه سطح زیر منحنی توان الکتریکی مشاهده می‌گردد که مجموع انرژی الکتریکی قابل تولید در طول روزهای آزمایش به ترتیب تاریخ برابر با ۱۰/۸۳، ۹/۸ و ۹/۷۸ کیلوژول است.

۵-۴- بررسی قابلیت تولید آب گرم

برای ارزیابی قابلیت تولید آب گرم توسط سیستم آزمایشگاهی مورد مطالعه، با استناد به مقدار اندازه‌گیری شده برای دمای آب ورودی به انباره، دمای آب خروجی از انباره، دبی آب گذرنده در انباره و همچنین روابط ترمودینامیکی، می‌توان توان گرمایی قابل استحصال از سیستم را محاسبه نمود. همچنین با لحاظ نمودن توان تابشی رسیده به سطح لنز فرزنل می‌توان بازده گرمایی کل سیستم را محاسبه کرد.

بر این اساس، داده‌هایی که مبین رفتار تبدیل گرمای سیستم، در روزهای آزمایش می‌باشند، محاسبه و در جداول ۵-۷ تا ۵-۹ ثبت گردیده‌اند. عنوان داده‌های ثبت شده در جداول نامبرده به شرح ذیل می‌باشد:

- P: ماکزیمم توان تولیدی ترموالکتریک
- I_{FL} : توان تابشی دریافت شده در سطح لنز فرزنل
- T_{cw} : دمای آب ورودی (آب سرد)
- T_{hw} : دمای آب خروجی (آب گرم)

- ΔT_w : اختلاف دمای آب ورودی و خروجی
- \dot{Q} : توان گرمایی منتقل شده به آب در حالت مدار باز الکتریکی؛ این توان که به واسطه مدول ترموالکتریک به انباره آب وارد می شود برابر است با $\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T_w$ که در آن \dot{m} دبی آب با مقدار 0.02 کیلوگرم بر ثانیه و C_p ظرفیت گرمایی ویژه آب با مقدار 4180 ژول بر کیلوگرم -درجه سانتی گراد و ΔT_w ، اختلاف دمای آب ورودی و خروجی می باشد.
- η_{th} : بازده گرمایی کل؛ نسبت توان گرمایی تولیدی بر توان تابشی دریافت شده در سطح لنز فرزنل در شرایط مدار باز الکتریکی
- η_{TEG} : بازده الکتریکی مدول ترموالکتریک با احتساب گرمای گذرنده بر مدول؛ برابر است با

$$\eta_{TEG} = \frac{P_{ML}}{\dot{Q}}$$

جدول ۵-۷: داده‌های مربوط به تولید آب گرم در روز دوم شهریور

Time	$T_{cw} (^{\circ}C)$	$T_{hw} (^{\circ}C)$	$\Delta T_w (^{\circ}C)$	$I_{FL} (w / m^2)$	$\dot{Q} (W)$	$P (watt)$	$\eta_{th} (\%)$	$\eta_{TEG} (\%)$
۹	۱۹/۱۳	۲۰/۸۴	۱/۷۱	۴۲/۳	۱۴/۲۹	۰/۲۲۰۴	۳۳/۷۸	۱/۵۱
۱۰	۱۹/۱۳	۲۱/۳۲	۲/۱۹	۴۸	۱۸/۳	۰/۴۰۷۸	۳۸/۱۴	۲/۱۷
۱۱	۱۹/۱۳	۲۲/۶۳	۳/۵	۴۸/۵	۲۹/۲۶	۰/۸۲۵۳	۴۸/۵۸	۲/۷۴
۱۲	۱۹/۱۳	۲۳/۰۷	۳/۹۴	۶۳/۵	۳۲/۹۳	۱/۰۸	۵۱/۸۵	۳/۱۷
۱۳	۱۹/۱۳	۲۲/۸۷	۳/۷۴	۵۹/۵۹	۳۱/۲۶	۰/۹۰۷۳	۵۲/۴۵	۲/۸۲
۱۴	۱۹/۱۳	۲۱/۹۳	۲/۸	۵۰/۱۴	۲۳/۴	۰/۵۰۶۸	۴۶/۶۶	۲/۱۱
۱۵	۱۹/۱۳	۲۱/۰۷	۱/۹۴	۴۶/۸۱	۱۶/۲۱	۰/۳۹۹	۳۴/۶۲	۲/۴
۱۶	۱۹/۱۳	۲۰/۹۵	۱/۸۲	۴۳/۴	۵۱/۲۱	۰/۳۰۸۴	۳۵/۰۴	۱/۹۵

جدول ۵-۸: داده‌های مربوط به تولید آب گرم در روز پنجم شهریور

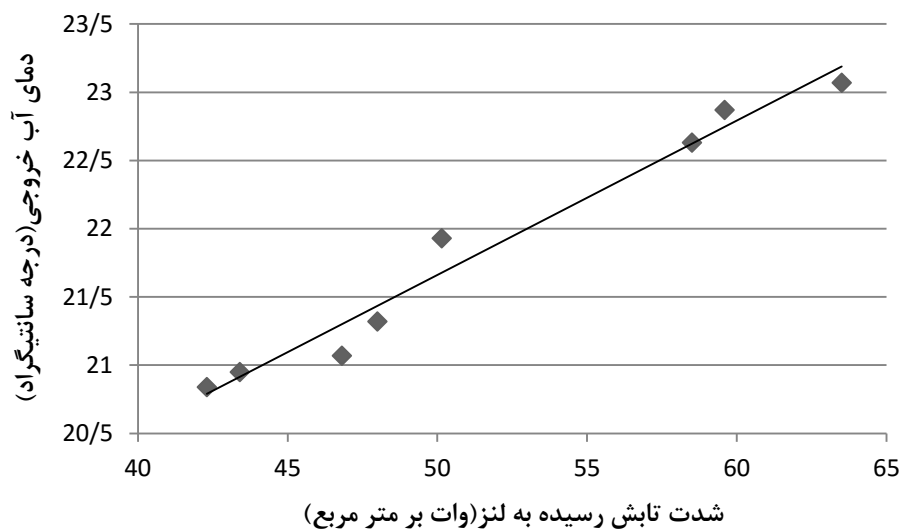
Time	$T_{cw} (^{\circ}C)$	$T_{hw} (^{\circ}C)$	$\Delta T_w (^{\circ}C)$	$I_{FL} (w / m^2)$	$\dot{Q}(W)$	$P_o (watt)$	$\eta_{th} (\%)$	$\eta_{TEG} (\%)$
۹	۱۹/۱۵	۲۰/۸۷	۱/۷۲	۴۱/۶۱	۱۴/۳۷	۰/۲۶۰۱	۳۴/۵۳	۱/۷۷
۱۰	۱۹/۱۵	۲۱/۵	۲/۳۵	۴۷/۵۶	۱۹/۶۴	۰/۴۰۱۶	۴۱/۲۹	۲
۱۱	۱۹/۱۵	۲۲/۰۲	۲/۸۷	۵۸/۳	۲۳/۹۹	۰/۸۱۶۵	۴۱/۵	۳/۲۹
۱۲	۱۹/۱۵	۲۲/۹۵	۳/۸	۶۳/۱۲	۳۱/۷۶	۱/۰۳۸	۵۰/۳۱	۳/۱۶
۱۳	۱۹/۱۵	۲۲/۶۵	۳/۵	۵۹/۲۶	۲۹/۲۶	۰/۸۷۳۳	۴۹/۳۷	۲/۸۹
۱۴	۱۹/۱۵	۲۱/۱۷	۲/۰۲	۴۹/۶۵	۱۶/۸۸	۰/۴۷۱۳	۳۴/۲۷	۲/۷۱
۱۵	۱۹/۱۵	۲۰/۹۷	۱/۸۲	۴۶/۴۱	۱۵/۲۱	۰/۳۷۱۲	۳۲/۷۷	۲/۳۸
۱۶	۱۹/۱۵	۲۰/۵۸	۱/۴۳	۴۲/۷۶	۱۱/۹۵	۰/۲۸۱۲	۲۷/۹۴	۲/۲۹

جدول ۵-۹: داده‌های مربوط به تولید آب گرم در روز دهم شهریور

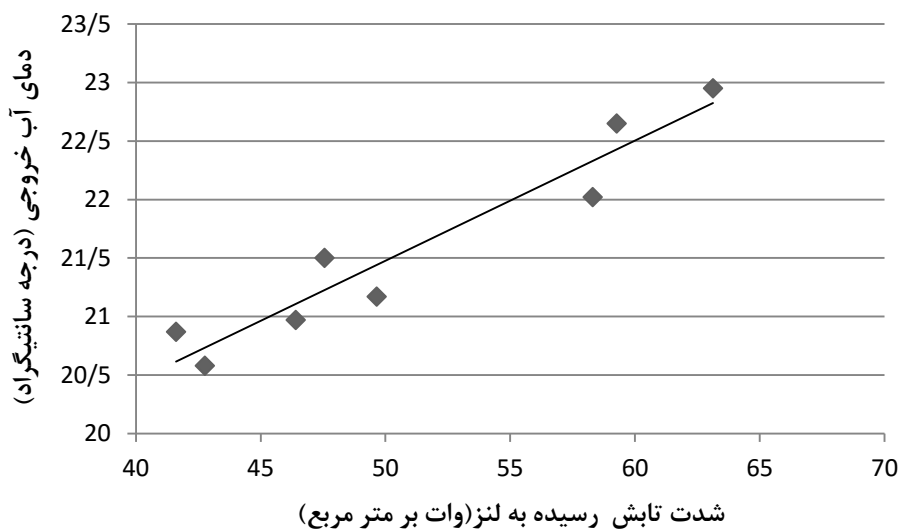
Time	$T_{cw} (^{\circ}C)$	$T_{hw} (^{\circ}C)$	$\Delta T_w (^{\circ}C)$	$I_{FL} (w / m^2)$	$\dot{Q}(W)$	$P_o (watt)$	$\eta_{th} (\%)$	$\eta_{TEG} (\%)$
۹	۱۹/۱۸	۲۰/۱۹	۱/۰۱	۳۷/۸۷	۸/۴۴	۰/۲۱۹۸	۲۲	۲/۵۳
۱۰	۱۹/۱۸	۲۱/۱۱	۱/۹۳	۴۷/۸	۱۱/۶۲	۰/۳۸۲۳	۲۴,۳	۳/۱۸
۱۱	۱۹/۱۸	۲۱/۸۵	۲	۵۸/۵	۲۲/۳۲	۰/۸۲۴۲	۳۸/۱/۳	۳/۵۶
۱۲	۱۹/۱۸	۲۲/۴۳	۳/۲۵	۶۲/۸۱	۲۷/۱۷	۱/۰۰۵	۴۳/۲۵	۳/۵۶۶
۱۳	۱۹/۱۸	۲۱/۵۵	۲/۳۷	۵۹/۵۷	۱۹/۸۱	۰/۸۵۱۲	۳۳	۴/۱۱
۱۴	۱۹/۱۸	۲۱/۶۸	۲/۵	۵۰/۵۲	۲۰/۹	۰/۴۲۰۵	۴۱	۱/۹۷
۱۵	۱۹/۱۸	۲۱/۴۵	۲/۲۷	۴۷/۸۹	۱۸/۹۷	۰/۳۸۵	۳۹/۰۱	۱/۹۸
۱۶	۱۹/۱۸	۲۰/۷۷	۱/۵۹	۳۸/۷۱	۱۳/۲	۰/۲۳۳	۳۴/۳۳	۱/۷۲

با استناد به جداول ۷-۵ تا ۹-۵ مشاهده می‌گردد که، ماکزیمم راندمان گرمایی سیستم، در طول دوره آزمایش، ۵۲/۴۵ درصد می‌باشد که در ساعت ۱۳ روز دوم شهریور ماه بر اساس داده‌های ثبت شده محاسبه گردیده است.

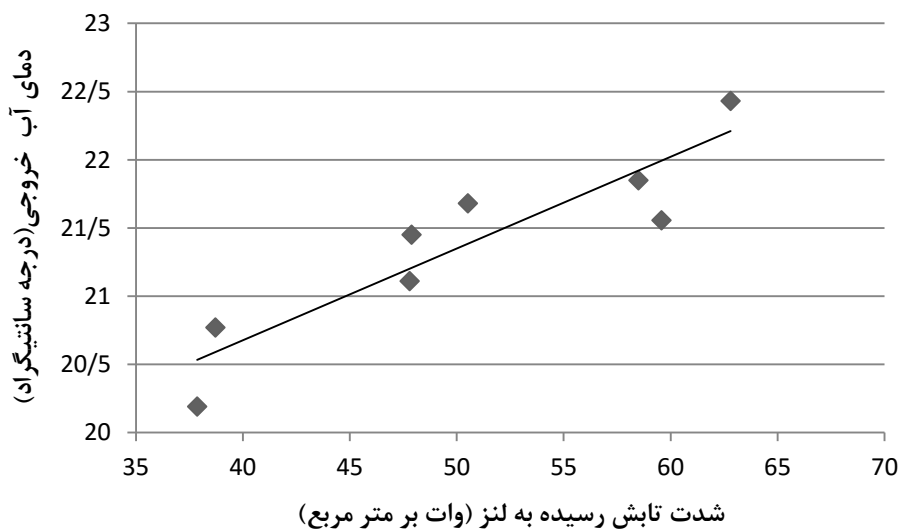
نمودارهای تغییرات دمای آب گرم خروجی از انباره بر حسب توان تابشی رسیده به لنز فرزنل به ترتیب تاریخ آزمایش در شکل‌های ۵-۱۶ تا ۵-۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۶: نمودار دمای آب خروجی بر حسب شدت تابش دریافتی لنز در طول روز دوم شهریور



شکل ۵-۱۷: نمودار دمای آب خروجی بر حسب شدت تابش دریافتی لنز در طول روز پنجم شهریور

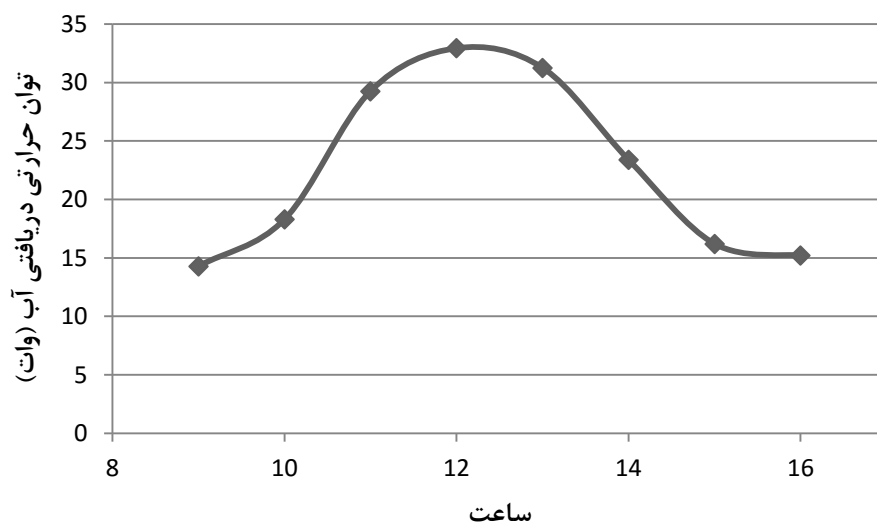


شکل ۵-۱۸: نمودار دمای آب خروجی بر حسب شدت تابش دریافتی لنز در طول روز دهم شهریور

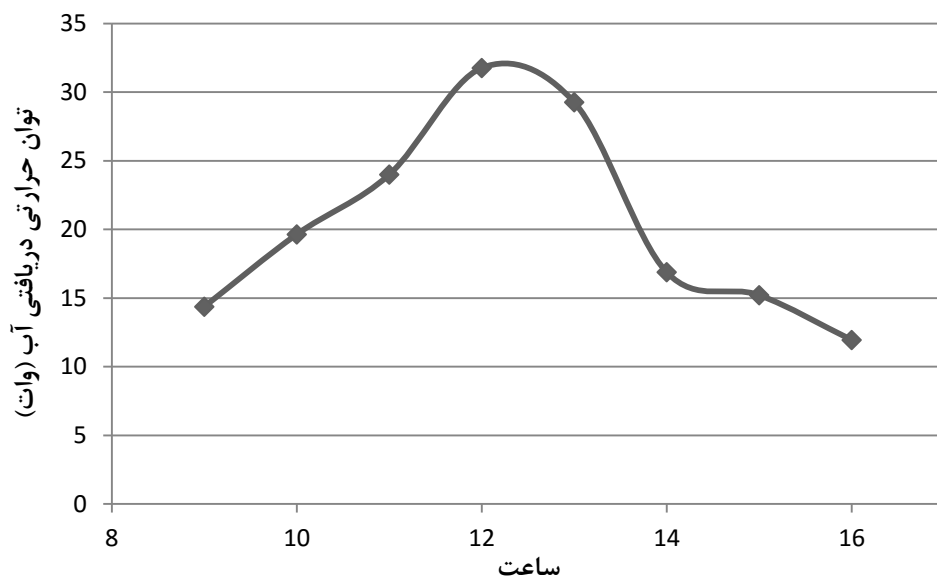
همانطور که در شکل‌های ۵-۱۶ تا ۵-۱۸ ملاحظه می‌شود، مهم‌ترین نکته‌ای که در نمودارها وجود دارد این است که با افزایش میزان شدت تابش خورشید، دمای آب خروجی افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش شدت تابش، انرژی خورشیدی متمرکز شده در مرکز لنز فرزنل افزایش می‌یابد. لذا دمای سیالی

(روغن) که در سمت گرم ترموالکتریک وجود دارد، بیشتر خواهد شد. این عامل سبب می‌شود که گرمای بیشتری به آب ورودی (آب سرد) رسیده و دمای آن را بالا ببرد. در واقع توان حرارتی رسیده به آب در این حالت افزایش می‌یابد. البته در ساعات زیادی در روزهای مختلف آزمایش، با افزایش شدت تابش دمای آب کاهش یافته است که این جزء خطاهای آزمایش می‌باشد. با توجه به جدول ۵-۷، بیشترین میزان افزایش دما (۳/۹۴ درجه سانتی‌گراد) در آب خروجی مربوط به ساعت ۱۲ روز دوم شهریور می‌باشد. مشاهده می‌شود که در این شرایط، توان تابشی در سطح لنز فرزنل بیشترین مقدار خود را دارد (۷۰۵/۹۸ وات).

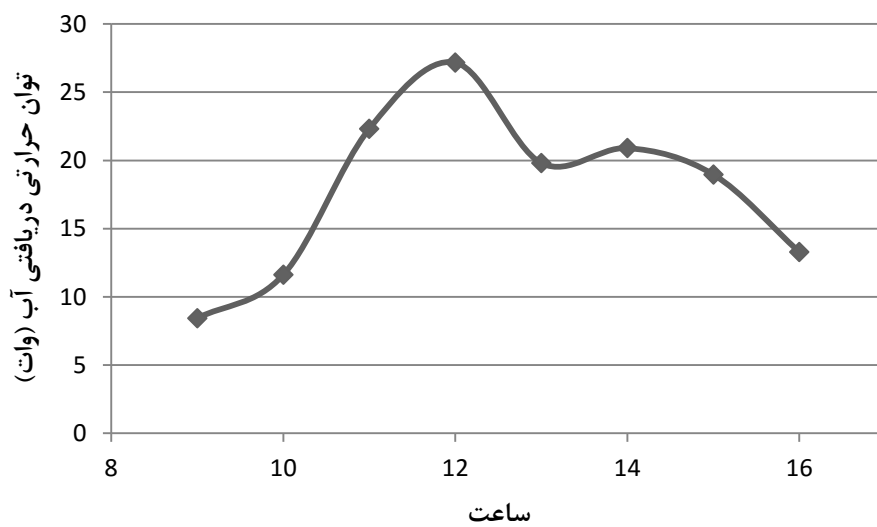
با استناد به نتایج جداول ۵-۷ تا ۵-۹، رابطه زمانی توان گرمایی تولیدی در طول یک روز به تفکیک روزهای آزمایش در شکل‌های ۵-۱۹ تا ۵-۲۱ ترسیم شده‌اند.



شکل ۵-۱۹: نمودار توان گرمایی جذب شده در آب در روز دوم شهریور



شکل ۵-۲۰: نمودار توان گرمایی جذب شده در آب در روز پنجم شهریور



شکل ۵-۲۱: نمودار توان گرمایی جذب شده در آب در روز دهم شهریور

با توجه به شکل‌های ۵-۱۹ تا ۵-۲۱، مشاهده می‌شود که با افزایش شدت تابش، توان گرمایی جذب شده در آب نیز افزایش می‌یابد. علت آن این است که لنز فرزنل انرژی بیشتری را در نقطه کانونی خود متمرکز می‌کند. این موضوع باعث افزایش دمای سیال واسط در سمت گرم ترموالکتریک شده و لذا توان حرارتی بیشتری به آب انتقال می‌یابد. در ساعات پایانی روز هم به دلیل کاهش شدت تابش، دمای سیال واسط افت محسوسی داشته و همین عامل سبب کاهش توان حرارتی منتقل شده به آب، می‌گردد.

همچنین با محاسبه سطح زیر منحنی توان گرمایی، مشاهده می‌شود که مجموع انرژی مصرف شده برای گرم کردن آب در طول روزهای آزمایش به ترتیب تاریخ برابر با ۱۹۵/۷۲، ۱۹۰/۵۳ و ۱۸۳/۵ کیلوژول است.

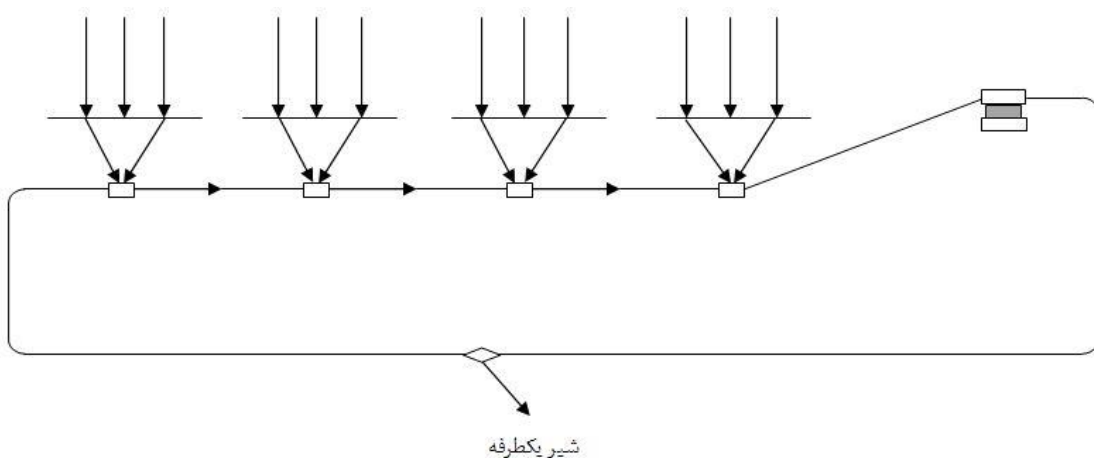
۵-۵- بهینه‌سازی طرح پیشنهادی

با توجه به مقدار اسمی ماکزیمم توان الکتریکی قابل تولید توسط مدول ترموالکتریک و توان‌های ثبت شده در آزمایشات، می‌توان نتیجه گرفت که برای استفاده از حداکثر ظرفیت تولید برق مدول، می‌بایستی آرایه‌ای از لنزهای فرزنل را در یک طرح مهندسی شده به کار گرفت. با استناد به داده‌های فنی مدول استفاده شده، ماکزیمم توان الکتریکی قابل تولید ۱۴ وات ذکر شده است. این مقدار توان در شرایطی که دمای سمت گرم و سرد مدول به ترتیب ۲۵۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد باشد، رخ می‌دهد. نظر به این که در شرایط توصیف شده در طرح مورد مطالعه، با توجه به عایق‌بندی‌های انجام شده، حداکثر دما در اتصال گرم مدول ترموالکتریک می‌تواند ۱۳۰ درجه باشد و همچنین فرض کنیم متوسط دمای آب در اتصال سرد مدول ۳۰ درجه باشد، مطابق نمودار شکل ۴-۶، حداکثر توان قابل استحصال در حدود ۶ وات ارزیابی می‌گردد. با لحاظ کردن شرایط ماکزیمم توان الکتریکی قابل تولید که طبق آزمایش‌های انجام شده در ساعت ۱۲ روز دوم شهریور بوده و مقدار آن برابر ۱/۰۸ وات ثبت شده است، تعداد لنزهای لازم برابر با ۶ برآورد می‌گردد.

قابل ذکر است که تعداد برآورد شده برای طرح بهینه، کمترین مقدار آن می‌باشد. در چنین طرحی در شرایطی حداکثر توان ۶ وات قابل استحصال است که شدت تابش خورشید در حدود مقدار آن در روز اول آزمایش (یکم شهریور ۱۳۹۱) باشد. از این رو تعداد لنزهای لازم بهتر است بیش از ۶ عدد باشد.

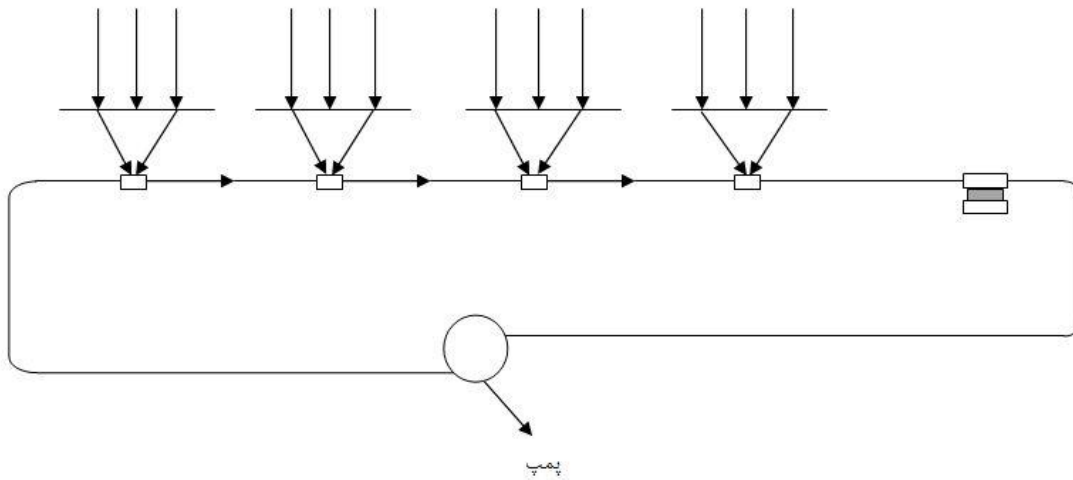
برای برقراری جریان روغن در مسیر گذرنده بر انباره‌های روغن که در کانون لنزهای فرزنل قرار دارند دو طرح به شرح ذیل پیشنهاد می‌گردد:

✓ روش ترموسیفون؛ در این روش با استفاده از پدیده انبساط گرمایی سیال، با قرار دادن مجموعه مدول ترموالکتریک در ارتفاع بالاتری از انباره‌های روغن (قرار گرفته در کانون لنزها) جریان روغن ایجاد می‌گردد. در این حالت بهتر است برای جهت دادن به جریان از یک شیر یکسوکننده استفاده شود. طرح نمادینی از این سیستم در شکل ۵-۲۲ آورده شده است.



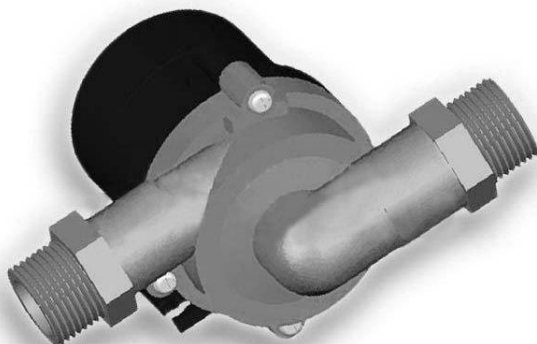
شکل ۵-۲۲: استفاده از روش ترموسیفون جهت برقراری جریان روغن

✓ استفاده از پمپ سیرکولاسیون؛ در این روش با قرار دادن یک پمپ الکتریکی کم مصرف، جریان سیال روغن برقرار می‌گردد. طرح نمادینی از این سیستم در شکل ۵-۲۳ ملاحظه می‌شود.



شکل ۵-۲۳: استفاده از پمپ جهت برقرای جریان روغن

در مقایسه با روش ترموسیفون ، استفاده از پمپ سیرکولاسیون مستلزم مصرف بخشی از برق تولید شده می باشد. اگر از پمپ‌هایی استفاده شود که در طرح آب گرمکن‌های خورشیدی جدید به کار می‌رود، مقدار برق مصرفی درمقابل مقدار برق تولیدی که بدین طریق با افزایش جریان روغن بدست می‌آید، قابل توجه است. نمونه‌ای از پمپ سیرکولاسیون در شکل ۵-۲۴ آورده شده است.



شکل ۵-۲۴: نمونه‌ای از یک پمپ سیرکولاسیون

مزیت مهم استفاده از پمپ سیرکولاسیون بر روش ترموسیفون در این است که در صورت استفاده از پمپ، دبی جریان روغن قابل کنترل می‌باشد. لذا در شرایطی که شدت تابش خورشید بالا بوده و امکان دستیابی به توان الکتریکی بالاتر مهیا باشد، می‌توان با افزایش دبی روغن، این امر را محقق نمود. حال آنکه تحت شرایط مذکور، در روش ترموسیفون این طبیعت است که تصمیم می‌گیرد.

۶- فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

در این پروژه تحقیقات جامعی در مورد سیستم‌های تولید توان توسط مدول‌های ترموالکتریک انجام شده است (فصل اول). پژوهش‌های گوناگونی هم در زمینه‌ی استفاده از لنز فرزنل در سیستم‌های خورشیدی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت (فصل دوم). هدف این پروژه بررسی تجربی یک سیستم آبگرمکن خورشیدی می‌باشد که قادر به تولید توان توسط مولدهای ترموالکتریک از نوع "TEP1-12656" 0.6" است. در این طرح، برای افزایش دما در سطح مدول ترموالکتریک، از لنز فرزنلی با ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متر مربع استفاده شده است.

بررسی‌ها نشان داده است که با توجه به شدت تابش خورشید بر واحد سطح در محل آزمایش‌ها، چنین ابعادی از لنز فرزنل قادر به تامین گرمای لازم برای تولید برق حداکثری مدول ترموالکتریک استفاده شده، نمی‌باشد. از این‌رو، با توجه به اینکه لنزهای موجود در بازار کشور (عمدتاً برای استفاده در دستگاه‌های اپتیکی ویدئو پروژکتور وارد کشور می‌شوند) دارای ابعاد ثابت (شبه نمونه مورد آزمایش) بوده و قیمت مدول‌های ترموالکتریک موجود در بازار به مراتب بسیار بالاتر از قیمت لنزها می‌باشد و همچنین به دلایل فنی دیگری همچون قابلیت محافظت بهتر کلکتور در برابر جریان باد، طرح چند لنزی برای جمع‌آوری گرمای مورد نیاز یک مدول پیشنهاد گردید. در این طرح پیشنهادی برای انتقال گرما از سیال، روغن معدنی استفاده می‌شود.

برای بررسی امکان سنجی طرح پیشنهادی، یک سیستم آزمایشگاهی نیز ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج بدست آمده در روزهای مختلف آزمایش نشان داده است که با توجه به عایق‌بندی‌های دستگاه ساخته شده، حداکثر دمای قابل دسترس در سطح انباره روغن در روز یکم شهریور، برابر با ۱۳۰ درجه می‌باشد.

بیشترین راندمان حرارتی سیستم مذکور حدود ۵۲/۴۵ درصد می‌باشد که در ساعت ۱۳ روز دوم شهریور ثبت شده است. در این ساعت، میزان توان حرارتی منتقل شده به آب ۳۱/۲۶ وات می‌باشد. همچنین مشخص شد که اگر از آب شهری، با دبی ۰/۰۰۲ لیتر در ثانیه و دمای اولیه‌ای در حدود ۱۹ درجه سلسیوس، برای خنک کردن مدول ترموالکتریک استفاده شود، حداکثر توان الکتریکی قابل استحصال برابر با ۱/۰۳۸ وات است. بر اساس داده‌های بدست آمده و همچنین با استناد به مشخصات فنی مدول ترموالکتریک استفاده شده، مشخص شد که می‌بایستی حداقل از ۶ لنز در طرح پیشنهادی استفاده شود. در این حالت با توجه به عایق‌بندی‌های انجام شده در مسیر انتقال انرژی از سطح لنز به مدول ترموالکتریک، حداکثر توان قابل استحصال در طرح پیشنهادی در حدود ۶ وات پیش‌بینی می‌شود.

۶-۲- پیشنهادات

برای افزایش توان تولیدی ترموالکتریک، بالابردن دمای آب خروجی و به طور کلی برای بهبود طرح پیشنهاداتی شده است که در ذیل به آن اشاره می‌شود.

الف) نظر به اینکه زاویه تابش نور خورشید در طول روز از افق شرقی تا افق غربی در تغییر است، برای بهره‌گیری حداکثری از گرمایش خورشیدی لازم است تا لنز فرزنل به گونه‌ای جابه‌جا گردد که همواره عمود بر راستای تابش خورشید قرار گیرد. برای نیل به این مقصود، طراحی یک مکانیزم الکتریکی ردیاب خورشیدی می‌تواند مناسب باشد. برای کاستن از توان الکتریکی مورد نیاز جهت چرخیدن مکانیزم نامبرده لازم است که تا حد امکان لنز گردان و متعلقات مربوطه سبک انتخاب گردند. چنانچه مصرف برق لازم برای گرداندن لنز و متعلقات مربوطه بر مقدار برق مفید تولید شده، تاثیر اساسی بگذارد، راه دیگری را می‌توان آزمود. به عنوان مثال می‌توان از یک مکانیزم هیدرولیکی خاص استفاده کرد که توان لازم برای حرکت خود را با جذب گرما از نور خورشید کسب نماید.

ب) ارائه راه‌حل‌های فنی برای کاستن از تلفات گرمایی در مسیر انتقال انرژی از سطح لنز فرزنل به سطح گرماگیر مدول ترموالکتریک.

ج) اگر از لنز فرزنل با ابعاد بزرگتر استفاده گردد، به دلیل بالا بودن ضریب اپتیکی لنز، میزان توان دریافتی به نقطه کانونی لنز بیشتر می‌شود. این امر همچنین سبب افزایش چگالی نور خورشید در نقطه کانونی لنز خواهد شد. لذا دمای سمت گرم ترموالکتریک نیز افزایش یافته و نهایتاً باعث تولید توان بیشتری می‌شود.

مراجع

- [1] www.npc-rt.ir \$ www.aftabir.com& www.teamwavelength.com
- [2] www.nature.com
- [3] As the "figure of merit" approaches infinity, the Peltier–Seebeck effect can drive a heat engine or refrigerator at closer and closer to the Carnot efficiency. DiSalvo, "Thermoelectric Cooling and Power Generation", Science 1999. Any device that works at the Carnot efficiency is thermodynamically reversible, a consequence of classical thermodynamics
- [4] www.wikipedia.com
- [5] <http://www.bnl.gov/magnets/staff/gupta/cryogenic-data-handbook/Section13.pdf>
- [6] Rockwood, Alan L. (1984). "Relationship of thermoelectricity to electronic entropy". *Phys.Rev. A30* (5): 2843–4. Bibcode1984PhRvA..30.2843R. doi:10.1103/PhysRevA.30.2843
- [7] www.seebeck-info.com
- [8] www.maximumpc.com
- [9] www.annulareviews.org
- [10] www.peltier-info.com
- [11] Roberts, R.B. (1977). "Absolute scale of thermoelectricity". *Nature*265 (5591): 226–7. Bibcode1977Natur.265..226R. doi:10.1038/265226a0
- [12] www.tetech.com
- [13] www.mhtl.uwaterlo.com
- [14] Katie Walter (May 2007). "A Quantum contribution to Technology". Lawrence Livermore National Laboratory.
- [15] R. Venkatasubramanian, E. Siivola, T. Colpitts, and B. O’Quinn, *Nature* 413, 597 2001.
- [16]T. C. Harman, M. P. Walsh, B. E. Laforge, and G. W. Turner, *J. Electron. Mater.* 34, L19 2005
- [17] Thermoelectric conversion of waste heat to electricity in a IC engine powered vehicle,”US department of energy efficiency renewable energy(EERE)” 2008.

[18] Solar refrigeration options –a state-of-the-art review. D.S. Kim, C.A. Infante Ferreira. 2008, International Journal of Refrigeration, pp. 3–15. DOI web link

[19] A. B. Neild, Jr., SAE-645A (1963).

[20] Birkholz, U., et al. "Conversion of Waste Exhaust Heat in Automobile using FeSi₂ Thermoelements". Proc. 7th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion. 1988, Arlington, USA, pp. 124-128

[21] www.energy.gov

[22] Yang, Jihui. "Automotive Applications of Thermoelectric Materials". Journal of Electronic Materials, 2009, VOL 38; page 1245

[23] Snyder, G. J. Toberer, E. S. "Complex Thermoelectric Materials". NATURE MATERIALS, 2008, VOL 7; NUMBER 2, pages 105-114

[24] TEGs - Using Car Exhaust To Lower Emissions". Scientific Blogging. June 3, 2008

[25] Laird, Lorelei. "Could TEG improve your car's efficiency?". DOE Energy Blog. August 16, 2010

[26] <http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS118101>

[27] abYu, C. "Thermoelectric automotive waste heat energy recovery using maximum power point tracking". Energy Conversion and Management, 2008, VOL 50; page 1506

[28] Laird, Lorelei. "Could TEG improve your car's efficiency?". DOE Energy Blog. August 16, 2010

[29] abStabler, Francis. "Automotive Thermoelectric Generator Design Issues". DOE Thermoelectric Applications Workshop.

[30] www.flightglobal.com

[31] Namprakai P, Thepa S, Hirunlabh J. Statistical estimation of solar for Bangkok Thailand. King Mongkut's University of Technology Thonburi magazine 1989;12(2):42–61.

[32] Khedari J, Hirunlabh J, Bunnag T. Experimental study of a roof solar collector towards the natural ventilation of new habitations. Renew Energy 1996; (1-5):335–8.

- [33] Hirunlabh J, Wachirapuwadon S, Pratinthong N, Khedari J. New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation. *Build Environ* 2001;36(3):383–91. S. Maneewan et al. / *Renewable Energy* 29 (2004) 743–752 751.
- [34] Khedari J, Hirunlabh J, Bunnag T. Experimental study of a roof solar collector towards the natural ventilation of new houses. *Energy Build* 1997;26(2):159–64.
- [35] Khedari J, Yamtraipat N, Pratinthong N, Hirunlabh J. Thailand ventilation comfort chart. *Energy Build* 2000;32(3):245–9.
- [36] Khedari J, Mansirisub W, Chaima S, Pratinthong N, Hirunlabh J. Field measurements of performance of roof solar collector. *Energy Build* 2000 (3):171–8.
- [37] S. Maneewan, J. Khedari, B. Zeghmami, J. Hirunlabh, Eakburanawat. Investigation on generated power of thermoelectric roof solar collector. 2004 ;743–752
- [38] www.michiganlighthouse.com
- [39] www.lanternroom.com
- [40] www.howstuffworks.com
- [41] www.3Dlens.com
- [42] www.fresneltech.com
- [43] Jiang ZM. Reflections on energy issues in China. *Journal of Shanghai Jiaotong University* 2008;13(3):257–74.
- [44] Leutz R, Suzuki A. *Nonimaging Fresnel lenses: design and performance of solar concentrators*. Heidelberg: Springer Verlag; 2001.
- [45] Miller OE, Mcleod JH, Sherwood WT. Thin sheet plastic Fresnel lenses of high aperture. *Journal of the Optical Society of America* 1951;41(11):807–15
- [46] Boettner EA, Barnett NE. Design and construction of Fresnel optics for photoelectric receivers. *Journal of the Optical Society of America* 1951;41(11):849–57.

- [47] Szulmayer W. Solar strip concentrator. *Solar Energy* 1973;14(3):327–35.
- [48] Szulmayer W. Solar concentrator. USA, Patent No. 4, 230, 094; 1980.
- [49] Nelson DT, Evans DL, Bansal RK. Linear Fresnel lens concentrators. *Solar Energy* 1975;17(5):285–9.
- [50] Rice HD. Solar energy converter and elongated Fresnel lens element. USA, Patent No. 4,011,857; 1977.
- [51] Hastings LJ, Allums SL. Performance Characteristics of a 1.8 m ×3.7 m Fresnel lens solar concentrator. *Journal of Energy* 1979;3(2):65–6.
- [52] Harmon S. Solar-optical analyses of a mass-produced plastic circular Fresnel lens. *Solar Energy* 1977;19(1):105–8.
- [53] Donovan RL, Hunter HC, Smith JT, Jones RL, Boardman S. Ten kilowatt photovoltaic concentrating array. Washington D.C. In: *Proceedings of the 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 1978. p. 1125–30.
- [54] Nakata Y, Shibuya N, Kobe T, Okamoto K, Suzuki A, Tsuji T. Performance of circular Fresnel lens photovoltaic concentrator. *Japanese Journal of Applied Physics* 1980;19(Suppl. 19–2):75–8.
- [55] Whitfield GR, Bentley RW, Weatherby CK, Hunt AC, Mohring HD, Klotz FH, et al. The development and testing of small concentrating PV system. *Solar Energy* 1999;67(1–3):23–34.
- [56] O’Neil MJ, Piszczor MF, Eskenazi MI, McDaniel AJ, George PJ, Botke MM, et al. Ultra-light stretched Fresnel lens solar concentrator for space power applications. In: *Proceeding of the SPIE*, Vol. 5179. 2003. p. 116–26.
- [57] Demichelis F, Minetti-Mezzetti E. Concentrator for solar air heater. *Applied Physics* 1979;19(3):265–8.
- [58] Al-Jumaily KEJ, Al-Kaysi MKA. The study of the performance and efficiency of flat linear Fresnel lens collector with sun tracking system in Iraq. *Renewable Energy* 1998;14(1–

4):41–8.

[59] Zhai H, Dai YJ, Wu JY. Investigation of concentrating solar photovoltaic/thermal system performance based on Fresnel lens. *Journal of Engineering Thermophysics* 2007;28(5):725–8 [in Chinese].

[60] Alkan C, Sekerci M, Kunc S. Production of hydrogen using Fresnellens-solar electrochemical cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 1995;20(1):17–20.

[61] Monteagudo JM, Duran A. Fresnel lens to concentrate solar energy for the photocatalytic decoloration and mineralization of orange II in aqueous solution *Chemosphere* 2006;65(7):1242–8.

[62] Duran A, Monteagudo JM. Solar photocatalytic degradation of reactive blue 4 using a Fresnel lens. *Water Research* 2007;41(3):690–8.

[63] Adeff JA, Hofler TJ. Design and construction of a solar-powered, thermoacoustically driven, thermoacoustic refrigerator. *Journal of Acoustical Society of America* 2000;107(6):37–42.

[64] Kalogirou SA. Solar thermal collectors applications. *Progress in Energy and Combustion Science* 2004;30(3):231–95.

[65] Francia G. Pilot plants of solar steam generation systems. *Solar Energy* 1968;12(1):51–64.

[66] Mills DR. Solar thermal electricity. In: Gordon J, editor. *Solar energy: the state of the art*. Germany: ISES; 2001. pp. 577–651.

[67] Feuermann D, Gordon JM. Analysis of a two-stage linear Fresnel reflector solar concentrator. *ASME Journal of Solar Energy Engineering* 1991;113(4):272–9.

[68] Mills DR, Morrison GL. Compact linear Fresnel reflector solar thermal power plants. *Solar Energy* 2000;68(3):263–83.

[69] Sierra C, Vazquez AJ. High solar energy concentration with a Fresnel lens. *Journal of Materials Science* 2005;40(6):1339–43.

[70] Sierra C, Vazquez AJ. NiAl coatings on carbon steel by self-propagating high-temperature synthesis assisted with concentrated solar energy: mass influence on adherence and porosity. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2005;86(1):33–42.

[71] Sierra C, Vazquez AJ. NiAl coating on carbon steel with an intermediate Ni gradient layer. *Surface & Coating Technology* 2006;200(14–15):4383–8.

[72] Tsangrassoulis A, Doulos L, Santamouris M, Fontoynt M, Maamari F, Wilson M, et al. On the energy efficiency of a prototype hybrid daylighting system. *Solar Energy* 2005;79(1):56–64.

[73] Tripanagnostopoulos Y, Siabekou C, Tonui JK. The Fresnel lens concept for solar control of buildings. *Solar Energy* 2007;81(5):661–75.

[74] Yabe T, Ohkubo T, Uchida S, Yoshida K, Nakatsuka M, Funatsu T, et al. High efficiency and economical solar-energy-pumped laser with Fresnel lens and chromium codoped laser medium. *Applied Physics Letters* 2007;90(26):1–3, 261120.

[75] Yabe T, Bagheri B, Ohkubo T, Uchida S, Yoshida K, Funatsu T, et al. 100 W class solar pumped laser for sustainable magnesium-hydrogen energy cycle. *Journal of Applied Physics* 2008;104(8):1–8, 083104.

[76] Ohkubo T, Yabe T, Yoshida K, Uchida S, Funatsu T, Bagheri B, et al. Solar-pumped 80 W laser irradiated by a Fresnel lens. *Optics Letters* 2009;34(2):175–7.

[77] Lorenzo E. Chromatic aberration effect on solar energy systems using Fresnel lenses. *Applied Optics* 1981;20(21):3729–32.

[78] Lorenzo E, Luque A. Comparison of Fresnel lenses and parabolic mirrors as solar energy concentrators. *Applied Optics* 1982;21(10):1851–3.

[79] Piszczor MF, O'Neil MJ, Fraas LM. A novel space photovoltaic module using a linear Fresnel lens and a line-focus tandem cell receiver. Louisville, Kentucky. In: *Proceedings of the 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 1993. p.1386–91.

[80] Leutz R, Suzuki A, Akisawa A, Kashiwagi T. Developments and designs of solar engineering Fresnel lenses. Hong Kong, China. In: *Proceedings Symposium on Energy*

Engineering (SEE 2000), vol. 2. 2000. p. 759–65.

[81] Piszczor MF, O’Neil MJ. Development of an advanced photovoltaic concentratorsystem for space applications. Philadelphia, Pennsylvania. In: Proceedings of the 22nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. 1987.

[82] Piszczor MF, Swartz CK, O’Neil MJ. Component and prototype panel testing of the mini-dome Fresnel lens photovoltaic concentrator array. Reno, Nevada. In: Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. 1990. p. 598–603.

[83] www.net-solar.com

[84] Y. Zhou, “Energy Harvesting Using a Thermoelectric Generator and Generic Real based Management”, Msc Thesis, Case Western Reserve University, 2008

[85] www.holomaker.com

[86] www.greenoptimistic.com

[87] www.gaggione.com

[88] Thermonamic Electronics (jiangxi) corp.,Ltd. All about TEP-12656-0.6-NET

[89] Duffie, J.A., Beckman, W.A., Solar Engineering of Thermal Process. 3rd Edition, John Wiley & Sons, 2006.

[90] www.behranoil.com

[91] BG 42 Infrared Thermometer, catalog

[92] Thermometer with robust penetration probe catalog- Testo 915-1

[93] Hioki 3200, catalog and TES 1333R, catalog

[94] Rockendorf G, Sillmann R, Podlowski L, Litzenburger L. PV-hybrid and thermoelectric collectors. *Solar Energy* 1999;67(4-6):227–37.

Abstract

The proposed design in this study is a solar water heater system which is capable to generate electricity. In this design thermoelectric modules as well as Fresnel lens have been used in the order of generating electricity and concentrating sunlight on heat absorber reserve, respectively.

In order to evaluate the ability of converting solar energy to efficient heat and electricity, an experimental setup has been designed and built by means of a thermoelectric module and common Fresnel lens. Results indicate that in radiation intensity of 705 W/m^2 , 1.08 W electrical power has been generated. Besides, in this radiation intensity the temperature of inlet water (cold water) has been increased about 3.94°C .

According to result, it is proposed to use a six Fresnel lens array for collecting solar energy in this design (which transfers solar energy from focal lenses to thermoelectric module by the use of mineral oil) with the aim of getting maximum efficiency from the equipments which are used in design's optimization.

Keywords: Fresnel lens, Thermoelectric, Solar water heater, Electrical power



Shahrood University of Technology

Mechanical Engineering Department

**Investigation and Feasibility Study of a Solar Water Heater System
with Electricity Generation Ability using Thermoelectric module**

By:

Milad Hasan nia

Supervisors:

Dr. Ali Abbasnejad

Dr. Ali moazemi goudarzi

January 2013

Shahrood, Iran