

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک

گروه تبدیل انرژی

بررسی آزمایشگاهی اثر نانوسیال مغناطیسی بر بازدهی کلکتور فتوولتایک حرارتی تحت تأثیر میدان مغناطیسی

متین قدیری یزدی

استاد راهنما:

دکتر علی جباری مقدم

دکتر محمد پسندیده فرد

پایان نامه کارشناسی ارشد

شهریورماه ۱۳۹۴

فرم صورت جلسه دفاع

به پاس محبت پر مهرشان که فریادس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید؛

تقدیم به پدرم، معلمی دلسوز، زنده‌یاد محمد حسین قدیری نردی

و

غزیزترین ام، بهترین ام، مادر مهربانم

شکوه عصمت فکر باش

شکاری حادث از اندیش

قلم را گیر دست و بکش کان درآید صدایش قیژ و قیژ

نترس اگر

چند "قیلوله دیو" برآشوبند.

(متین قدیری-زمستان ۸۷)

تشکر و قدردانی:

لازم می‌دانم از اساتید محترم آقایان "دکتر علی جباری مقدم" و "دکتر محمد پسندیده فرد" بابت تمامی زحماتی که در جهت محقق شدن این پژوهش متحمل شدند، کمال تشکر را داشته باشم. بی‌شک بدون لطف، یاری و حمایت ایشان انجام این تحقیق مقدور نبود.

از جناب آقای "مهندس محمد سردارآبادی" بابت مشاوره‌های ارزشمند در جهت انجام پایان‌نامه سپاس فراوان دارم.

همچنین از برادران عزیزم که تک‌تک لحظات شیرین زندگی‌ام در کنار آنها بناشده است و یآوری استوار برایم بوده‌اند، صمیمانه سپاسگزارم.

تعهد نامه

اینجانب دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته

دانشکده دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه

..... تحت راهنمایی متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

سلول‌های فتوولتاییک متشکل از مواد نیمه‌هادی هستند که بخشی از پرتوهای منتشرشده از خورشید (پرتوهای با طول موج کوتاه) را به‌طور مستقیم به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. به دلیل اینکه تمام امواج جذب‌شده به الکتریسیته تبدیل نمی‌شوند، در سلول‌ها این موضوع منجر به تولید حرارت شده و در نتیجه آن، بازدهی سیستم فتوولتاییک کاهش می‌یابد. با افزودن سیستم بازیاب حرارتی به واحد فتوولتاییک، می‌توان علاوه بر بازده الکتریکی، بازده کلی سیستم را که شامل بازده الکتریکی و حرارتی می‌شود، افزایش داد. این سیستم‌ها به واحدهای فتوولتاییک حرارتی معروف هستند. در این پژوهش، به بررسی اثر تغییر سیال خنک‌کننده رایج این سیستم‌ها از آب به نانوسیال در بازدهی کلی سیستم به‌صورت آزمایشگاهی پرداخته شده است. نانوسیال بکار گرفته‌شده در این آزمایش از نوع مغناطیسی (نانوفروسیال) و سیال‌های مورد استفاده آب مقطر، نانوفروسیال ۱٪ و ۳٪ جرمی انتخاب شده است. به‌عنوان ایده‌ای نوین در این پژوهش نانوفروسیال، در قسمت خنک‌کاری، جهت بررسی اثر میدان مغناطیسی بر بازده کلی سیستم، تحت تاثیر دو نوع میدان مغناطیسی ثابت و متغیر با فرکانس، قرار گرفته است. آزمایش‌ها در محیط آزمایشگاهی و به کمک شبیه‌ساز خورشیدی تحت دو تابش ثابت ۱۱۰۰ و ۶۰۰ وات بر مترمربع انجام شده است. نتایج نشان داده است که استفاده از نانوفروسیال ۳٪ جرمی، بازده کل سیستم را ۴۵٪ و با اعمال میدان مغناطیسی متغیر با فرکانس ۵۰ هرتز این مقدار در حدود ۵۰٪ نسبت به حالتی که سیال عامل آب مقطر بوده افزایش یافته است. همچنین مقادیر به‌دست‌آمده با اعمال میدان مغناطیسی ثابت، نزدیک به حالتی است که میدان اعمال نمی‌شود. اگر رژی کل سیستم در حالی که میدان متغیر با فرکانس ۵۰ هرتز اعمال می‌شود به مقدار ۴۸ وات رسیده در حالی که این مقدار برای آب و سیستم فتوولتاییک به ترتیب در حدود ۳۳ و ۲۰ وات به‌دست‌آمده است.

واژه‌های کلیدی: فتوولتاییک حرارتی، نانوفروسیال آب - Fe_3O_4 ، افزایش انتقال حرارت، میدان مغناطیسی متغیر و ثابت.

Energy Conversion and Management (Impact Factor: 4.38)

Vol 103 (2015) , 468-476

Title: “Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids”

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.077>

فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه
۱-۱-۱	پیش گفتار
۲-۱	تاریخچه‌ی ساخت سلولهای فتوولتاییک
۳-۱	اصول کار سیستم‌های فتوولتاییک
۱-۳-۱	نیمه‌هادی‌ها
۲-۳-۱	جذب نور و تولید جریان
۳-۳-۱	پیوندهای $p - n$
۴-۳-۱	جریان اتصال کوتاه
۵-۳-۱	بازده الکتریکی
۴-۱	عوامل اثرگذار بر بازده الکتریکی سلول‌های فتوولتاییک
۵-۱	دور نمای تحقیق
۱۹	فصل دوم: مروری بر منابع
۱-۲	پیشگفتار
۲-۲	مزایا و معایب سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی
۳-۲	نمونه تحقیقات انجام‌شده در گذشته
۴-۲	طبقه‌بندی کلکتورهای صفحه تخت فتوولتاییک حرارتی
۵-۲	بازدهی از لحاظ قانون اول ترمودینامیک (انرژی)
۶-۲	بازدهی از لحاظ قانون دوم ترمودینامیک (اگزرژی)
۳۹	فصل سوم: مقدمه‌ای بر نانوسیالات
۱-۳	پیشگفتار
۲-۳	روش‌های تهیه نانوسیالات
۲-۲-۳	روش یک مرحله‌ای
۳-۲-۳	روش دومرحله‌ای
۳-۳	اهمیت پایداری نانوسیالات
۱-۳-۳	افزودن سورفکتانت یا عامل فعال‌کننده
۲-۳-۳	کنترل pH (اثر شیمیایی سطح)
۳-۳-۳	ارتعاش فراصوتی (آلتراسونیک)
۴-۳	ابزارهای ارزیابی پایداری نانوسیالات
۱-۴-۳	روش اسپکتروفتومتر
۲-۴-۳	آزمون پتانسیل زتا
۳-۴-۳	روش عکس‌برداری

۵۱	SEM و TEM-۴-۴-۳
۵۱	۵-۴-۳- روش پراکنش نوری
۵۲	۶-۴-۳- روش تعادل ته‌نشینی
۵۲	۵-۳- مجموعه‌ای از انواع نانوسیالات مورد مطالعه قرار گرفته شده در مقالات
۵۲	۶-۳- نانوفروسیال
۵۴	۷-۳- بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی افزایش انتقال حرارت نانوفروسیالات
۵۶	۸-۳- اندازه‌گیری خصوصیات نانوسیالات
۵۷	۱-۸-۳- رسانندگی گرمایی
۶۰	۲-۸-۳- ویسکوزیته
۶۲	۳-۸-۳- چگالی و گرمای ویژه

۶۵ فصل چهارم: سنتز نانو ذره Fe_3O_4 و تهیه نانو فروسیال

۶۶	۱-۴- سنتز نانوذرات
۶۷	۲-۴- سنتز نانوذره Fe_3O_4 و تهیه نانوسیال Fe_3O_4 - آب
۶۸	۳-۴- روش سنتز نانو ذره Fe_3O_4
۷۴	۴-۴- روش تهیه نانوسیال Fe_3O_4 - آب
۷۵	۱-۴-۴- اثر اضافه کردن اسید در پایداری نانو سیال
۷۹	۲-۴-۴- بررسی اندازه ذرات مغناطیسی سنتز شده

۸۳ فصل پنجم: انجام آزمایش

۸۴	۱-۵- مقدمه
۸۶	۲-۵- مشخصات فنی تجهیزات مورد استفاده
۸۷	۳-۵- سازه نگهدارنده تجهیزات
۸۷	۴-۵- کلکتور واحد فتوولتاییک
۸۸	۱-۴-۵- جریان سیال در تماس مستقیم با صفحه فتوولتاییک
۸۸	۲-۴-۵- جریان سیال در شبکه ی لوله ای
۸۹	۵-۵- مبدل دو لوله ای
۹۱	۶-۵- سیستم الکتریکی آزمایش
۹۱	۷-۵- صفحات فتوولتاییک
۹۲	۸-۵- باتری
۹۲	۹-۵- شارژ کنترلر
۹۲	۱۰-۵- مصرف کننده
۹۳	۱۱-۵- مدار ایجاد میدان مغناطیسی
۹۹	۱۲-۵- شبیه ساز خورشیدی
۱۰۰	۱۳-۵- محاسبات آماری، خطاها و عدم قطعیت
۱۰۳	۱۴-۵- مقادیر اندازه گیری شده و نتایج محاسبات

- ۱۰۴-۵-۱۴-۲- دقت تجهیزات اندازه گیری:
- ۱۰۵-۵-۱۴-۳- قابلیت تکرار پذیری
- ۱۰۶-۵-۱۴-۴- عدم قطعیت بازده الکتریکی
- ۱۰۷-۵-۱۴-۵- عدم قطعیت اندازه گیری دبی و دماهای سیال کلکتور
- ۱۰۸-۵-۱۴-۶- عدم قطعیت بازده حرارتی
- ۱۰۸-۵-۱۴-۷- عدم قطعیت در محاسبات انرژی حرارتی و الکتریکی

۱۰۹ فصل ششم: نتایج و تفسیر آنها

- ۱۱۰-۶-۱- پیشگفتار
- ۱۱۱-۶-۲- بررسی تغییرات بازده الکتریکی و گرمایی سیستم
- ۱۱۱-۶-۲-۱- تغییرات بازده گرمایی سیستم
- ۱۱۷-۶-۲-۲- تغییرات بازده الکتریکی سیستم
- ۱۲۰-۶-۳- گرمای کل و انرژی کل خروجی سیستم فتوولتاییک حرارتی
- ۱۲۰-۶-۳-۱- گرمای کل خروجی سیستم
- ۱۲۲-۶-۳-۲- انرژی کل خروجی سیستم
- ۱۲۴-۶-۴- دسته بندی نتایج بدست آمده

۱۲۷ فصل هفتم: جمع بندی و پیشنهادها

- ۱۲۸-۷-۱- جمع بندی
- ۱۲۹-۷-۲- آرایه ی پیشنهاد

۱۳۱ مراجع

۱۳۵ پیوستها

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) انرژی‌های موجود و میزان دوام منابع انرژی جهان در مقایسه با انرژی خورشیدی (بلوک‌های
حجمی نشان‌دهنده میزان انرژی موجود آن منبع می‌باشند). ۲
- شکل (۲-۱) اجزای اصلی سلول فتوولتاییک (نیمه‌هادی) ۹
- شکل (۳-۱) الف- با تلفیق I_{sc} و جریان در حالت تاریکی منحنی $I - V$ یک پیل خورشیدی به دست
می‌آید. ب- منحنی $I-V$ و خط بار باتری، ولتاژ و جریان خروجی را تعیین می‌کند [۳]. ۱۱
- شکل (۴-۱) خط بار مقاومتی در صورتی که بار مستقیم به واحد متصل شود و مدار معادل سلول فتوولتاییک
[۳]. ۱۱
- شکل (۵-۱) الف- تغییرات توان و جریان خروجی واحد با تغییر در تشعشع ورودی در دمای ثابت سلول‌ها؛
ب- تغییرات توان و جریان خروجی واحد فتوولتاییک با تغییرات در دمای سلول‌های فتوولتاییک در میزان
تشعشع ورودی ثابت [۵]. ۱۵
- شکل (۱-۲) مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی بازده الکتریکی سلول‌های فتوولتاییک- حرارتی [۶]. ۲۳
- شکل (۲-۲) مقایسه بازده الکتریکی، بازده حرارتی و دمای سلول‌های فتوولتاییک- حرارتی در حالت کلکتور
فیندار و بدون فین [۸]. ۲۴
- شکل (۳-۲) مدلسازی عددی بازده الکتریکی در طول روز برای کلکتور با دو سیال عامل آب‌وهوا (PV/T_{sv})
[۱۲]. ۲۷
- شکل (۴-۲) دمای سطح پشت واحد فتوولتاییک در حالت کارکرد با پمپ [۱۳]. ۲۸
- شکل (۵-۲) تغییرات بازدهی کلی سیستم فتوولتاییک با تغییر در تشعشع ورودی [۱۴]. ۲۹
- شکل (۶-۲) تغییرات بازدهی کلی با ضریب پوشش سلول‌ها توسط کلکتور [۱۴]. ۲۹
- شکل (۷-۲) (۱) پوسته و لوله (۲) کانال (۳) جریان آزاد (۴) کلکتور با دو صفحه جاذب [۱۷]. ۳۱
- شکل (۸-۲) برش مقطعی از سیستم مورد آزمایش در دانشگاه توکیو [۲۰]. ۳۲
- شکل (۹-۲) برش مقطعی از کلکتور ساخته‌شده از مواد پلیمری [۲۱]. ۳۳
- شکل (۱-۳) شماتیک کارکرد سورفکتانت بر روی نانوذره. ۴۶
- شکل (۲-۳) دسته‌بندی پایداری نانوسیال بر اساس مقادیر پتانسیل زتا [۲۴]. ۵۰
- شکل (۳-۳) بررسی پایداری نانوسیال اکسید آلومینیم با گذشت زمان به روش عکس‌برداری [۳۰]. ۵۰
- شکل (۴-۳) عکس‌های TEM و SEM نانوذرات مختلف ۵۱
- شکل (۱-۴) شماتیک نحوه قرارگیری تجهیزات جهت سنتز نانو ذره Fe_3O_4 ۷۰
- شکل (۲-۴) محل سنتز نانو ذرات ۷۰
- شکل (۳-۴) محل قرارگیری مواد شیمیایی خطرناک در آزمایشگاه ۷۱
- شکل (۴-۴) نانو ذرات سنتز شده به روش هم رسوبی ۷۱
- شکل (۵-۴) جمع‌آوری نانو ذرات سنتز شده و شستشوی آن ۷۲

- شکل (۴-۶) مرحله خشک کردن نانو ذرات سنتز شده ۷۲
- شکل (۴-۷) مرحله جمع آوری نانو ذرات خشک شده ۷۳
- شکل (۴-۸) نانو ذرات سنتز شده و آماده برای پراکنده کردن در سیال پایه ۷۳
- شکل (۴-۹) نمونه ای از نانوفروسیال های ساخته شده و بررسی مسئله پایداری آنها ۷۵
- شکل (۴-۱۰) گزارش شده توسط ۸۰
- شکل (۴-۱۱) نتایج دستگاه آنالیز اندازه ذرات ۸۰
- شکل (۴-۱۲) توزیع اندازه ذرات در نمونه آماده شده به روش تعداد ۸۱
- شکل (۵-۱) نمایی از سیستم آزمایشگاهی ساخته شده ۸۵
- شکل (۵-۲) شماتیک سیستم آزمایشگاهی ساخته شده ۸۵
- شکل (۵-۳) سازه نگهدارنده تجهیزات فتوولتاییک حرارتی ۸۷
- شکل (۵-۴) نمونه ساخته شده از جنس پلکسی به منظور هدایت سیال روی صفحه مسی متصل به پشت کلکتور ۸۸
- شکل (۵-۵) برش عرضی از کلکتور فتوولتاییک حرارتی ۸۹
- شکل (۵-۶) کلکتور لوله ای ساخته شده جهت اتصال به پشت صفحه فتوولتاییک ۸۹
- شکل (۵-۷) مبدل دو لوله ای استفاده شده در سیستم آزمایشی ۹۰
- شکل (۵-۸) شماتیک سیستم برق سیستم فتوولتاییک ۹۱
- شکل (۵-۹) مدار فرمان اولیه ساخته شده که یک مدار شیفت رجیستری است ۹۴
- شکل (۵-۱۰) شبیه سازی مدار کنترلی ایجاد میدان مغناطیسی در نرم افزار پرتئوس ۹۶
- شکل (۵-۱۱) مدار میکروکنترلی تولید کننده میدان مغناطیسی متغیر و ثابت ۹۶
- شکل (۵-۱۲) مدار میکروکنترلی تولید کننده میدان مغناطیسی در مد متغیر با فرکانس ۵ هرتز ۹۷
- شکل (۵-۱۳) مدار میکروکنترلی تولید کننده میدان مغناطیسی در مد ثابت ۹۷
- شکل (۵-۱۴) هسته های فریت U شکل بکار گرفته شده جهت اعمال میدان مغناطیسی ۹۸
- شکل (۵-۱۵) ب هسته فریت سیم پیچی شده جهت اعمال میدان مغناطیسی ۹۹
- شکل (۵-۱۶) لامپ تنگستن هالوزن ۵۰۰ وات ۱۰۰
- شکل (۶-۱) بازده گرمایی سیستم فتوولتاییک حرارتی با استفاده از آب مقطر و ۱٪ جرمی نانوذره Fe_3O_4 تحت تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و نرخ جریان جرمی ۳۰ لیتر بر ساعت با و بدون تاثیر میدان خارجی ۳۰۰ گوس. ۱۱۳
- شکل (۶-۲) بازده گرمایی سیستم فتوولتاییک حرارتی با استفاده از آب مقطر و ۱٪ جرمی نانوذره Fe_3O_4 تحت تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع و نرخ جریان جرمی ۳۰ لیتر بر ساعت با و بدون تاثیر میدان خارجی ۳۰۰ گوس. ۱۱۴

- شکل (۳-۶) بازده گرمایی سیستم فتوولتائیک حرارتی با استفاده از آب مقطر و ۱٪ و ۳٪ جرمی نانوذره Fe_3O_4 تحت تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و نرخ جریان جرمی ۳۰ لیتر بر ساعت با و بدون تاثیر میدان خارجی ۳۰۰ گوس. ۱۱۵
- شکل (۴-۶) بازده گرمایی سیستم فتوولتائیک حرارتی با استفاده از آب مقطر و ۱٪ و ۳٪ جرمی نانوذره Fe_3O_4 تحت تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع و نرخ جریان جرمی ۳۰ لیتر بر ساعت با و بدون تاثیر میدان خارجی ۳۰۰ گوس. ۱۱۶
- شکل (۵-۶) بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی با استفاده از آب مقطر و ۳٪ جرمی نانوذره Fe_3O_4 تحت تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و نرخ جریان جرمی ۳۰ لیتر بر ساعت. ۱۱۷
- شکل (۶-۶) بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی با استفاده از آب مقطر و ۳٪ جرمی نانوذره Fe_3O_4 تحت تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع و نرخ جریان جرمی ۳۰ لیتر بر ساعت. ۱۱۸
- شکل (۷-۶) بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی با استفاده از آب مقطر و ۱٪ جرمی نانوذره Fe_3O_4 تحت تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و نرخ جریان جرمی ۳۰ لیتر بر ساعت. ۱۱۹
- شکل (۸-۶) بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی با استفاده از آب مقطر و ۱٪ جرمی نانوذره Fe_3O_4 تحت تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع و نرخ جریان جرمی ۳۰ لیتر بر ساعت. ۱۱۹
- شکل (۹-۶) گرمای کل خروجی برای نانوفروسیال ۱٪ و ۳٪ جرمی، تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و میدان مغناطیسی. ۱۲۱
- شکل (۱۰-۶) گرمای کل خروجی، نانوفروسیال ۱٪ و ۳٪ جرمی، تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع و میدان مغناطیسی. ۱۲۲
- شکل (۱۱-۶) انرژی کل خروجی برای نانوفروسیال ۱٪ و ۳٪ جرمی، تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و میدان مغناطیسی. ۱۲۳
- شکل (۱۲-۶) انرژی کل خروجی برای نانوفروسیال ۱٪ و ۳٪ جرمی، تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع و میدان مغناطیسی. ۱۲۳

فهرست جداول

- جدول (۴-۱) بررسی پایداری نانو فروسیال با ۰.۵٪ جرمی نانو ذره در شرایط مختلف ۷۷
- جدول (۴-۲) بررسی پایداری نانو فروسیال با ۰.۳٪ جرمی نانو ذره در شرایط مختلف ۷۸
- جدول (۴-۳) بررسی پایداری نانو فروسیال با ۰.۱٪ جرمی نانو ذره در شرایط مختلف ۷۹
- جدول (۴-۴) مقادیر عددی اندازه گیری شده توزیع ذرات به سه روش شدتی، حجمی و عددی توسط دستگاه آنالیز ابعاد نانو ذرات ۸۱
- جدول (۵-۱) مشخصات تجهیزات استفاده شده در ساخت سیستم آزمایشگاهی ۸۶
- جدول (۵-۲) داده‌های واحد فتوولتاییک بدون کلکتور در تکرار اول آزمایش ۱۰۳
- جدول (۵-۳) داده‌های واحد فتوولتاییک بدون کلکتور در تکرار دوم آزمایش ۱۰۴
- جدول (۵-۴) داده‌های واحد فتوولتاییک بدون کلکتور در تکرار سوم آزمایش ۱۰۴
- جدول (۵-۵) دقت تجهیزات اندازه‌گیری در انجام آزمایش ۱۰۵
- جدول (۵-۶) عدم قطعیت در اثر تجهیزات اندازه‌گیری در انجام آزمایش با در نظر گرفتن حداکثر خطا ۱۰۵
- جدول (۵-۷) عدم قطعیت کلی و کلی نسبی برای مدت انجام آزمایش ۱۰۶
- جدول (۵-۸) زمانهای ثبت شده برای دبی حجمی در یک دوره آزمایش ۱۰۷
- جدول (۵-۹) دماهای ثبت شده برای یک دوره آزمایش برای تشعشع ۱۱۰۰ وات بر مترمربع ۱۰۸
- جدول (۶-۱) مقادیر بدست آمده برای نانوفروسیال ۰.۱٪ جرمی و آب مقطر ۱۲۴
- جدول (۶-۲) مقادیر بدست آمده برای نانوفروسیال ۰.۳٪ جرمی و آب مقطر ۱۲۵

فهرست علائم اختصاری

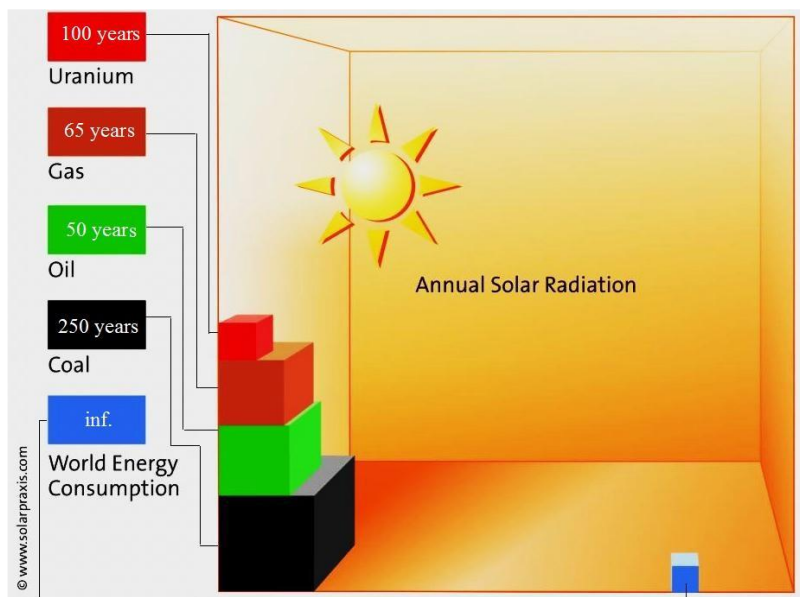
ϕ	کسر حجمی	Ex	اگرژی (J)	نمادها و اختصارات	
w(wt)	کسر جرمی	R	شعاع (m)	c_l	سرعت نور
δ	عدم قطعیت	A	مساحت سطح (m^2)	h	ثابت پلانک
زیرنویس‌ها		g	شتاب گرانش (m/s^2)	ev	الکترون‌ولت
sc	اتصال کوتاه	W	وزن (N)	N_a	چگالی اتم‌ها گیرنده
oc	مدار باز	F_s	کسر سوسپانسیون	N_d	چگالی اتم‌ها دهنده
out(o)	خروجی	k	رسانندگی گرمایی ($W/m \cdot ^\circ C$)	q	میزان بار الکتریکی
in(i)	ورودی	\dot{m}	دبی جرمی (kg/s)	T	دما
m	حداکثر	rep	تکرار	n_i	تعداد الکترون یا پروتون
el	الکتریکی	n	ضریب شکل تجربی	V	ولتاژ (V)
eff	موثر	M	جرم (kg)	I	جریان (A)
pv	فتوولتاییک	C	ظرفیت گرمایی ($J/kg \cdot ^\circ C$)	P	توان (W)
a	محیط	علائم یونانی		FF	ضریب پرکنندگی
g	شیشه	λ	طول موج (μm)	G	تشعشع (W/m^2)
cell	سلول	τ	ضریب عبور	r	ضریب پوشش
pvt	فتوولتاییک حرارتی	ν	پارامتر دلخواه	j	ضریب کاهش نور
th	گرمایی	η	بازده انرژی	n	ضریب بازتاب
c	کلکتور	ϕ	ضریب دمایی	I_0	جریان اشباع معکوس
f(L)	سیال	η_0	بازده در شرایط مبنا	mho	عکس مقاومت الکتریکی
sun	خورشید	ε	بازده اگرژی	D	قطر (m)
b(bf)	سیال پایه	θ	زاویه بازتاب	\dot{Q}	نرخ انتقال گرما (W)
p(s)	ذره (ذرات)	ρ	چگالی (kg/m^3)	\dot{E}	نرخ انرژی (W)
nf	نانوسیال	μ	ویسکوزیته	\dot{E}_x	نرخ اگرژی (W)

فصل ۱:

مقدمه

۱-۱- پیش گفتار

اهمیت نیاز به انرژی در تمامی جنبه‌های فعالیت جامعه انسانی و جهانی موضوع غیرقابل انکاری است. به‌طور کلی افزایش قیمت حامل‌های انرژی، اهمیت و موقعیت تامین انرژی و در نتیجه آن تغییرات آب و هوایی و گرم شدن زمین سبب ایجاد انگیزه برای توسعه‌ی تحقیقات در زمینه‌ی انرژی‌های تجدید پذیر برای هر ملت و جامعه‌ای شده است. این‌گونه تحقیقات می‌توانند سهم بزرگی در ایجاد تنوع و امنیت تامین انرژی برای توسعه‌ی اقتصادی پایدار و ایجاد محیط پاک داشته باشد. در حال حاضر انرژی‌های تجدید پذیر کمتر از ۱۶٪ از انرژی مصرفی مورد نیاز جهان را تامین می‌کنند [۱، ۲]، و پتانسیل استفاده گسترده از آن‌ها بستگی به موارد متعددی از جمله میزان استخراج منابع قابل دسترس، توسعه فناوری مربوطه و ... دارد. در شکل ۱-۱، نمای سه‌بعدی گرافیکی از میزان انرژی‌های موجود در زمین به منظور مقایسه‌ی کلی این انرژی‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۱) انرژی‌های موجود و میزان دوام منابع انرژی جهان در مقایسه با انرژی خورشیدی (بلوک‌های حجمی نشان‌دهنده میزان انرژی موجود آن منبع می‌باشند).

انرژی خورشیدی یکی از منابع تامین انرژی رایگان، پاک و عاری از اثرات مخرب زیست‌محیطی است که از

دیرباز به روش‌های گوناگون مورد استفاده بشر قرار گرفته است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد بحران انرژی، کشورهای جهان را بر آن داشته است که با مسائل مربوط به انرژی برخوردی متفاوت نمایند که در این میان جایگزینی انرژی‌های فسیلی با انرژی‌های تجدید پذیر و از جمله انرژی خورشیدی به منظور کاهش و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کنترل عرضه و تقاضای انرژی و کاهش انتشار گازهای آلاینده با استقبال فراوانی روبرو شده است.

میزان انرژی دریافتی سالیانه از خورشید در مقایسه با سایر منابع انرژی غیرقابل تجدید پذیر موجود در زمین، بسیار بالا است، به طوری که کمتر از ۴ ساعت دریافت انرژی خورشید در سطح زمین معادل کل تقاضای انرژی جهان است. یکی از راه‌های استفاده از این منبع عظیم انرژی در سطح زمین، واحدهای فتوولتاییک هستند که به منظور تبدیل مستقیم انرژی تشعشی خورشید به جریان الکتریسیته طراحی شده‌اند. راه دیگر تبدیل انرژی تشعشی، توسط دستگاه‌های مکانیکی به انرژی حرارتی است.

این سوال همگانی و همیشگی که: "چه زمانی از سیستم‌های فتوولتاییک عملاً استفاده خواهد شد؟" در واقع شامل سوالات متعددی است و برای پاسخ دادن به آن باید دیدگاه شخص پرسشگر را در نظر گرفت. ساکنان یک کشور صنعتی، می‌خواهند بدانند چه زمانی هزینه‌ی نصب پیل‌های خورشیدی برای مصرف‌کننده با مبلغ صرفه‌جویی شده‌ی ناشی از پرداخت کمتر پول به شبکه‌ی برق سراسری برابر خواهد شد. تجار می‌خواهند بدانند چه زمانی سرمایه‌گذاری برای تهیه‌ی دستگاه‌های فتوولتاییک، سودآور خواهد بود، مدیر شرکت برق و طراح سیستم‌های انرژی می‌خواهند بدانند چه زمانی الکتریسیته‌ی تولیدشده از دستگاه‌های فتوولتاییک پاسخگوی بخش بزرگی از مقادیر عظیم توان و انرژی خواهد بود که مجبور به تهیه‌ی آن هستند و ... ، بنابراین نمی‌توان گفت بهای برق فتوولتاییک چه موقع به آن حد کاهش خواهد یافت که امکان کاربرد گسترده‌ی آن فراهم شود ولی چند اصل کلی واضح است :

- با کاهش تدریجی هزینه‌های برق حاصل از واحدهای فتوولتاییک، مقرون به صرفه بودن آن در یک منطقه‌ی جغرافیایی خاص در صورتی محسوس تر می‌شود که برق حاصل از سایر منابع در آن محل قیمت نسبی بیشتری داشته باشد.
- امکان استفاده‌ی اقتصادی از توان فتوولتاییک به‌طور کلان بستگی به قیمت انرژی الکتریکی حاصل از منابع متداول دارد. این قیمت‌گذاری متاثر از قیمت‌های سوخت و نرخ تورم است. مدل‌های اقتصادی، کم‌وبیش نشان از افزایش قیمت انرژی الکتریکی شبکه توزیع و نرخ تورم آرایه می‌کنند.
- محل مصرف‌کننده نیز اهمیت زیادی خواهد داشت، به این دلیل که میزان انرژی حاصل از تابش تشعشع خورشید در مناطق جغرافیایی مختلف، متفاوت است و برق قابل توزیع در شبکه نیز در مناطق مختلف با توجه به مسایل تولید، با قیمت‌های متفاوت آرایه می‌شود.

۱-۲- تاریخچه‌ی ساخت سلول‌های فتوولتاییک

در سال ۱۸۳۹، دانشمند فرانسوی به نام ادmond بکرل^۱، به اثر فتوولتاییک، زمانی که در حال آزمایش با یک سلول الکترولیت ساخته‌شده از دو فلز الکترودی قرار گرفته شده در محلول هادی الکتریسیته بود، پی برد. او مشاهده کرد در حالتی که این محلول در معرض نور خورشید باشد، میزان الکتریسیته‌ی تولیدی افزایش خواهد یافت. در سال ۱۸۷۶، ویلیام کریلز آدامز^۲ و شاگردش ریچارد اوانز دی^۳ دریافتند که هرگاه عنصر سلنیوم^۴ به‌تنهایی در معرض نور خورشید قرار گیرد جریانی از الکتریسیته در آن می‌تواند تولید شود. اگرچه سلنیوم برای تبدیل کافی نور خورشید به الکتریسیته مناسب نبود، باین‌حال، اینکه یک جسم جامد بدون نیاز به حرارت، حرکت و کار می‌توانست الکتریسیته تولید کند خود کشف بزرگی محسوب می‌شد. در سال

1 Edmund Becquerel
2 William Grills Adams
3 Richard Evans Day
4 Selenium

۱۹۵۳، زمانی که جرال پیرسون^۱ (محقق فیزیک در آزمایشگاه تحقیقاتی بل^۲) در حال تحقیق برای بررسی کاربرد سیلیکون در صنایع الکترونیک بود بدون آنکه به مساله ی فتوولتاییک سیلیکون توجه کند، سلول خورشیدی ساخت که قادر بود نسبت به سلنیوم مقدار زیادی از نور خورشید را به الکتریسیته تبدیل کند، این موضوع در زمان خود به عنوان به حقیقت پیوستن رویای دست یافتن به انرژی بی پایان مورد تمجید قرار گرفت. اگرچه از لحاظ فنی سلول های خورشیدی تولیدی در آزمایشگاه بل با سرعت زیادی روبه پیشرفت بود اما از لحاظ اقتصادی سلول های تولیدی این آزمایشگاه نتوانست به عرضه برسد، سلول های تولیدی به ازای هر وات ۳۰۰ دلار در سال ۱۹۵۶، هزینه در بر داشت در صورتی که انرژی الکتریسیته حاصل از سایر منابع حدود ۵۰ سنت^۳ به ازای هر وات به دست مصرف کننده می رسید. تنها تقاضا برای این سلول ها، صنایع اسباب بازی برای تولید قایق های مینیاتوری و سازمان رادیویی برای فرستادن امواج به نقاط دور دست بود. در حالی که در دهه ی ۱۹۵۰، استفاده ی بهینه از سلول های سیلیکونی از لحاظ اقتصادی، با شک و تردید همراه شده بود، ارتش و نیروی هوایی ایالات متحده پروژه ی بزرگی برای استفاده از این سلول ها در ماهواره های فضایی به منظور تامین انرژی برای تجهیزات مورد استفاده در این ماهواره ها آغاز کردند. با استفاده از سلول های سیلیکونی، یک ماهواره قادر خواهد بود سال ها با تامین انرژی از خورشید به فعالیت خود ادامه دهد. هزینه ها برای سلول های به کار گرفته شده در کاربردهای فضایی به هیچ وجه فاکتور مهمی به حساب نمی آمد و سازنده ها بیشتر به اندازه، بازدهی و مقاومت این سلول ها اهمیت می دانند. اما روی زمین اولین معیار، قیمت تمام شده به ازای هر کیلووات ساعت است بنابراین فناوری سلول های خورشیدی تا اوایل دهه ی ۱۹۷۰، برای کاربردهای زمینی بسیار گران محسوب می شد. در این زمان دکتر الیوت برمن^۴، با استفاده از یک سیلیکون ناخالص تر و با بسته بندی سلولی با مواد ارزان تر، واحد فتوولتاییکی باقیمت تمام شده ی بسیار پایین طراحی کرد. این واحد باقیمت تمام شده ی ۲۰ دلار به ازای هر وات عرضه شد و زمینه ی رقابت و استفاده از این

1 Gerald Pearson

2 Bell labs

3 Cent

4 Elliot Berman

سلول‌ها را در روی زمین فراهم کرد. در سال ۱۹۷۳ دانشگاه دلور^۱ یکی از اولین سیستم‌های فتوولتاییک هیبریدی جهان را مورد آزمایش قرارداد که با قرار دادن فن دمنده در زیر سلول‌ها، از حرارت تولیدی توسط سلول‌ها نیز به‌عنوان منبع انرژی استفاده می‌شد. در چهار دهه‌ی اخیر رقابتی فشرده برای بالا بردن بازدهی واحدهای فتوولتاییک انجام شده است که سبب افزایش قابل قبولی در بازده این واحدها در محیط آزمایشگاهی و حتی در کاربردهای عملی شده است.

۱-۳- اصول کار سیستم‌های فتوولتاییک

۱-۳-۱- نیمه‌هادی‌ها^۲

رساناهای الکتریکی قوی مانند مس قابلیت هدایت جریانی به میزان حدود، 10^6 mho/cm و برای عایق‌های مناسب مانند کوارتز این قابلیت 10^{-16} mho/cm است (mho معرف عکس مقاومت الکتریکی ماده است). قابلیت هدایت نیمه‌هادی‌ها بین مقادیر فوق در گستره 10^{-4} mho/cm تا 10^4 mho/cm می‌باشد که با افزودن ناخالصی‌های متفاوت می‌توان در این گستره قابلیت هدایت را کنترل کرد. جنس نیمه‌هادی ممکن است عناصری مانند سیلیسیوم (Si)، ژرمانیوم (Ge) و یا ترکیباتی مانند کادمیوم سولفید (CdS)، گالیوم آرسنید (GaAs) و یا آلیاژی‌هایی مانند $Ga_x Al_{1-x} As$ (x هر عددی بین صفر و یک می‌تواند تعیین گردد) باشد، بسیاری از ترکیبات آلی مانند آنتراسن^۳ نیز نیمه‌هادی محسوب می‌شوند. به دلیل اینکه سیلیسیوم دومین عنصر فراوان در سطح زمین و هر اتم آن دارای چهار ظرفیت الکترونی است، گزینه‌ی مناسبی برای استفاده در سلول‌های فتوولتاییک به شمار می‌رود. هر اتم در یک بلور سیلیسیم، چهار اتم در مجاورت خود دارد که با هریک از آن‌ها در دو الکترون، کوالانس مشترک دارد و به این ترتیب لایه‌ی هشتم الکترونی

1 university of Delaware
2 semiconductor
3 Antrasen

پایداری را کامل می‌کند. برای جدا کردن یک الکترون از هسته و ایجاد یک الکترون هدایتی آزاد مقدار ۱,۱۲ الکترون‌ولت انرژی لازم است که آن را انرژی شکاف بین باندهای سیلیسیوم می‌نامند و در سیستم‌های فتوولتاییک این انرژی از فوتون‌های حامل انرژی تابیده شده از سطح خورشید که به نیمه‌هادی فتوولتاییک می‌رسد تامین می‌شود. جدا شدن یک الکترون از هسته ایجاد یک حفره یا جای خالی می‌کند. الکترون‌های اتم‌های مجاور می‌توانند این حفره را پر کنند و سبب حرکت حفره به محل جدیدی شوند، طبیعتاً این حرکت الکترون‌ها ایجاد جریان الکتریکی می‌کند. الکترون‌ها و حفره‌های تولیدی در خلاف هم، به سمت یک پیوند از نوع p-n^۱ (یا نوع دیگر) که در آن یک میدان الکتریکی قوی وجود دارد پخش می‌شوند، الکترون‌ها و حفره‌ها توسط این میدان از یکدیگر جدا شده و سبب ایجاد اختلاف پتانسیل و جریان الکتریکی در مدار خروجی می‌شوند.

۱-۳-۲ - جذب نور و تولید جریان

هر نیمه‌هادی با انرژی شکاف بین باندها^۲ (E_g) مشخص می‌شود، که میزان انرژی برای آزادسازی یک الکترون از اتم در هسته می‌باشد تا به این طریق یک جفت الکترون - حفره تشکیل شود. این انرژی را می‌توان از نور تهیه کرد، هر فوتون نور دارای انرژی $h\nu$ است که h ثابت پلانک و ν فرکانس موج نور است:

$$h\nu(eV) = h \frac{c_l}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda(\mu m)} \quad (1-1)$$

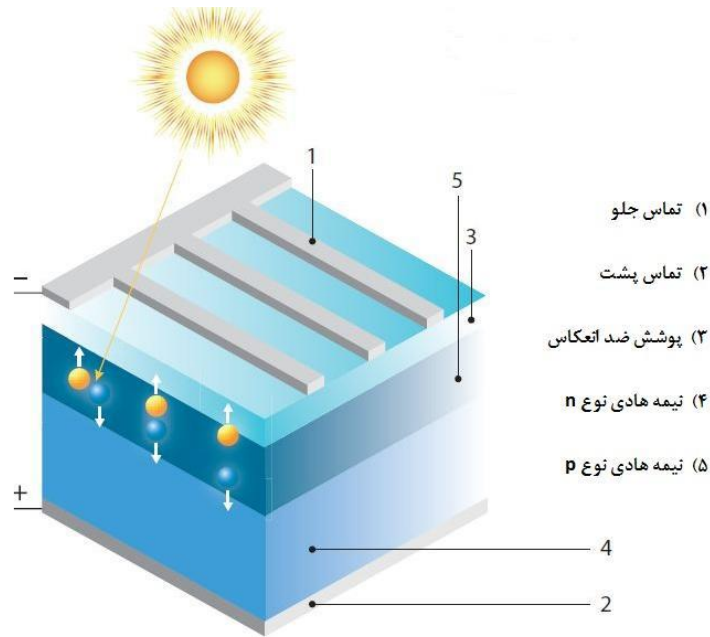
در رابطه فوق c_l سرعت نور و λ طول موج نور است. نیمه‌هادی‌ها قادرند فوتون‌هایی با $h\nu$ بزرگ‌تر از E_g را جذب کنند. انرژی هر فوتون جذب شده، با رساندن یک الکترون از باند والانس به داخل باند هدایت و تشکیل یک الکترون و یک حفره، مصرف می‌شود. هر فوتون با داشتن $h\nu$ بزرگ‌تر از E_g (تا چندین برابر E_g) قادر

1 Positive-Negative
2 Band gap energy

به تولید یک (و فقط یک) جفت الکترون - حفره است و انرژی مازاد به شکل حرارت تلف می‌شود.

۱-۳-۳- پیوندهای p - n

تمام سیستم‌های فتوولتاییک که در عمل به کار برده می‌شوند دارای عدم تقارن عمدی داخلی هستند. این عدم تقارن برای ایجاد جریان الکتریکی ایجاد شده است. هرگاه در این عدم تقارن یک نیمه‌هادی از نوع n، در یک سمت و یک نیمه‌هادی از نوع p، در سمت دیگر وجود داشته باشد، ساختار مربوطه را یک پیوند p - n می‌نامند. به دلیل تفاوت‌های موجود در تراکم الکترون‌ها و حفره‌ها در دو طرف، الکترون‌ها تمایل شدیدی برای جریان یافتن از سمت n به سمت p دارند، که این مساله برای حفره‌ها در جهت مخالف صادق است. این‌گونه انتشارها سبب می‌شوند تا بارهای الکتریکی مثبت در سمت n و بارهای الکتریکی منفی در طرف p ظاهر شوند. لایه‌ی دوگانه‌ی پدید آمده از بارهای الکتریکی، تشکیل یک میدان الکتریکی می‌دهد. این میدان به نوبه‌ی خود، یک افت پتانسیل درونی در محل پیوند به وجود می‌آورد. شکل ۱-۲، نمای کلی از ساختمان سلول فتوولتاییک و برانگیخته شدن الکترون‌ها توسط تابش خورشید را نشان می‌دهد. تمایل الکترون‌ها به نفوذ به طرف راست همراه با تمایل آن‌ها به حرکت در جهت پایین یک نمودار انرژی یا متوقف شدن آن‌ها، توسط یک مانع پتانسیلی متعادل می‌شوند.



شکل (۱-۲) اجزای اصلی سلول فتوولتاییک (نیمه‌هادی)

برای اینکه تمایل انتشار دقیقاً متوازن شود، مولر و کامینز^۱ در سال ۱۹۷۷، نشان دادند که ولتاژ درونی، باید برابر باشد با:

$$V_d = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} \quad (۱-۲)$$

که در نیمه‌هادی‌های ذاتی یا خالص، تعداد الکترون‌ها و پروتون‌ها برابر و معادل n_i ، در نظر گرفته می‌شوند. N_d چگالی اتم‌های دهنده، N_a چگالی اتم‌های پذیرنده، q میزان بار الکتریکی، T دمای نیمه‌هادی و k ثابت معادله می‌باشد. آنچه مهم است این است که یک پیوند $p-n$ ، جریان زیادی را فقط در یک جهت عبور می‌دهد. بنابراین پیوند $p-n$ ، را می‌توان به‌عنوان یکسو کننده مورد استفاده قرارداد.

۱-۳-۴ - جریان اتصال کوتاه

در این قسمت جریان دیود در حضور نور تجزیه و تحلیل می‌شود. اگر دو انتهای دیودی را به وسیله یک هادی به هم متصل کنیم جریانی در مدار مذکور جاری نخواهد شد، زیرا ولتاژ دو سر دیود صفر است. بین تمایل جریان حامل به علت عمل انتشار و اثر بازدارندگی مانع پتانسیل موجود در محل پیوند، توازن حساسی وجود دارد. با تابش نور بر روی دیود این توازن به هم می‌خورد و جریانی که جریان اتصال کوتاه I_{sc} نامیده می‌شود از انتهای طرف p ، به انتهای طرف n جاری می‌شود. مناسب‌ترین راه تجزیه و تحلیل جریان اتصال کوتاه، تقسیم طیف‌های خورشیدی به چندین بخش، که هر یک از آن‌ها گستره‌ی باریکی از طول موج را در برمی‌گیرد و سپس یافتن جریان ناشی از هر یک از این جریان‌های طیفی می‌باشد.

۱-۳-۵ - بازده الکتریکی

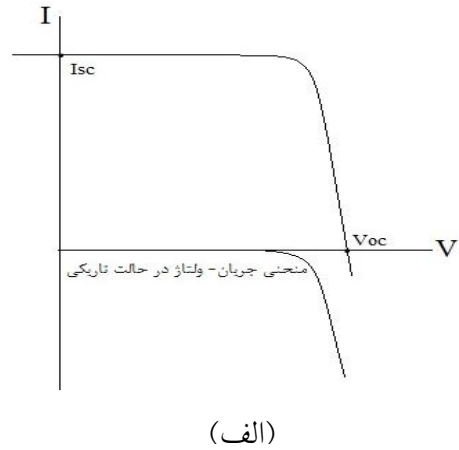
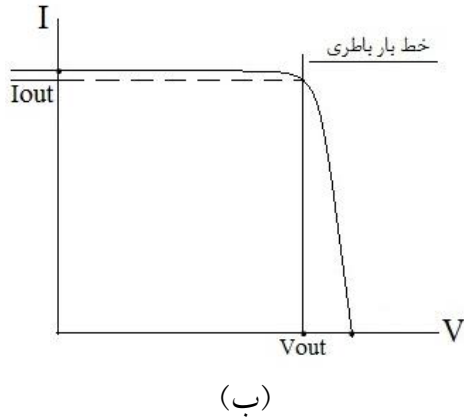
در قسمت (۱-۳-۳)، جریان دیود را در تاریکی و با ولتاژ بایاس^۱ و در قسمت (۱-۳-۴)، جریان دیود را در حالت روشنایی و بدون ولتاژ بایاس، یا جریان اتصال کوتاه به‌طور خلاصه مورد بررسی قرار دادیم. هنگامی که هم نور و هم ولتاژ وجود داشته باشد، جمع کل جریان دیود، مجموع جریان اتصال کوتاه و جریان دیود در حالت تاریکی است بنابراین خواهیم داشت:

$$I_V = I_{sc} + I_f(V) \text{ and without light} = I_{sc} - I_o \left[\exp\left(\frac{qV}{\gamma kT}\right) \right] \quad (۳-۱)$$

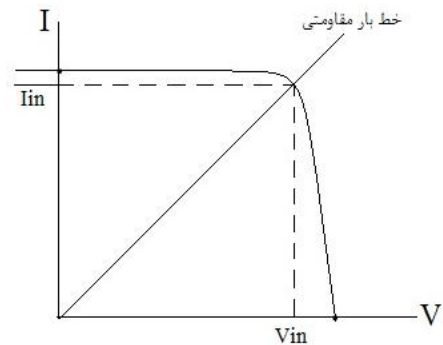
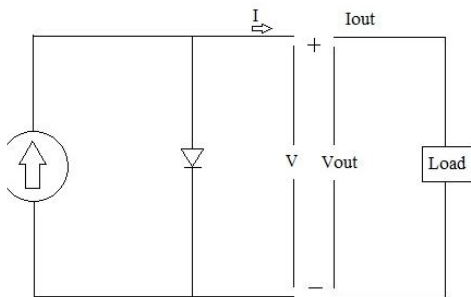
خلاصه این مطلب در شکل ۱-۳-الف آورده شده است. اگر شدت نور تغییر کند، I_{sc} تغییر می‌کند و منحنی $I - V$ به‌طور کلی در شکل مذکور بالا و پایین می‌رود. ولتاژ و جریان در یک سیستم فتوولتاییک تنها زمانی تعیین می‌شود که باری به‌عنوان مصرف‌کننده متصل باشد. در شکل ۱-۳-ب، بار یک باتری ایده آل با ولتاژ

¹ Bias voltage

نهایی ثابت است، در همان حال یک بار مقاومتی در شکل ۱-۴ در نظر گرفته شده است. هنگامی که بار مذکور یک اتصال کوتاه باشد (یعنی ولتاژ خروجی صفر باشد)، در این صورت شدت جریان خروجی دقیقا برابر جریان اتصال کوتاه است. هنگامی که بار در حالت مدار باز باشد ولتاژ خروجی معادل در این حالت ولتاژ مدار باز می باشد که با V_{oc} ، نمایش داده می شود.



شکل (۱-۳) الف- با تلفیق I_{sc} و جریان در حالت تاریکی منحنی $I-V$ یک پیل خورشیدی به دست می آید. ب- منحنی $I-V$ و خط بار باتری، ولتاژ و جریان خروجی را تعیین می کند [۳].



شکل (۱-۴) خط بار مقاومتی در صورتی که بار مستقیم به واحد متصل شود و مدار معادل سلول فتوولتاییک [۳].

بنابراین از معادله (۱-۳) خواهیم داشت :

$$V_{oc} = \frac{\gamma k T}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1 \right) \quad (4-1)$$

و برای توان خروجی خواهیم داشت :

$$P_{out} = V_{out} \times I_{out} \quad (5-1)$$

با مشاهده منحنی $I - V$ انتظار می‌رود که یک جفت ولتاژ و جریان خروجی به نام ولتاژ حداکثر V_m و جریان حداکثر I_m ، باعث به حداکثر رسیدن توان خروجی P_{out} شوند :

$$P_{out-max} \equiv P_m = V_m \times I_m \quad (6-1)$$

می‌توان با قرار دادن $\left[\exp \left(\frac{qV_{max}}{\gamma k T} \right) - 1 \right]$ به جای I_{out} در معادله P_{out} و مشتق‌گیری از P_{out} نسبت

به V_{out} و مساوی صفر قرار دادن نتیجه، مقدار V_m را به دست آورد. چنانچه V_m معلوم باشد I_m و P_m را می‌توان محاسبه کرد. V_m به‌طور معمول ۷۵ تا ۹۰ درصد V_{oc} و I_m نیز به‌طور معمول ۸۵ تا ۹۷ درصد I_{sc} است و این مقدار به $\left(\frac{qV_{out}}{\gamma k T} \right)$ بستگی دارد. حال بهتر است عامل پرکنندگی که با FF نشان می‌دهیم را

تشریح کنیم :

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (7-1)$$

عامل پرکنندگی صرفاً نسبت مساحت بزرگ‌ترین مستطیلی است که می‌تواند زیر منحنی $I - V$ قرار بگیرد به حاصل ضرب V_{oc} و I_{sc} می‌باشد. بنابراین حداکثر توان خروجی ممکن را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی زیر به دست آورد :

$$P_m = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (8-1)$$

FF تابعی از $\frac{qV_{oc}}{\gamma kT}$ و یا $\ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right)$ می باشد.

بازده تبدیل توان یک پیل خورشیدی را می توان به صورت زیر نوشت :

$$\eta_{el} = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{G_{eff}} \quad (9-1)$$

با توجه به رابطه ی ۹-۱، برای به دست آوردن بازده تبدیل به الکتریسیته ی بیشتر، ضروری است که V_{oc} ، I_{sc} و همچنین عامل پرکنندگی افزایش یابد، به عبارتی دیگر انحنای تیزی در منحنی $I - V$ داشته باشیم.

چهار گروه رایج سلول های فتولتاییک عبارت اند از :

- سیلیسیومی تک بلوره^۱؛
- سیلیسیومی چند بلوره^۲؛
- نواری سیلیسیومی^۳؛
- سلول های سیلیسیومی بی شکل^۴ که به عنوان فیلم نازک نیز شناخته می شوند.

در طیف خورشیدی، ۲۶ درصد انرژی در فوتون هایی است که $h\nu \leq 1eV$ دارند. از باقیمانده ی فوتون های مفید، انرژی بیشتر آن ها بیش از ۱,۱ الکترون ولت است. انرژی اضافی از بین می رود زیرا بین جفت الکترون حفره هایی که توسط یک فوتون ۱,۱ الکترون ولت و یک فوتون ۲,۵ الکترون ولت تولید شده اند تفاوتی وجود ندارد. ۴۱٪ انرژی، درون فوتون ها به این شکل به هدر می رود. حتی یک پیل خورشیدی با کارکرد مطلوب

1 Mono-crystalline silicon
2 Polycrystalline silicon
3 Ribbon silicon
4 Amorphous silicon

نیز تنها قادر است ۴۴٪ از انرژی را به الکتریسیته تبدیل کنند. پیل‌های واقعی در عمل دارای بازده الکتریکی بین ۵٪ تا ۱۸٪ هستند که این بازدهی به جنس سلول‌ها، روش چیدمان و یا پارامترهای مربوط به مواد به کاررفته در آن‌ها بستگی دارد.

۱-۴- عوامل اثرگذار بر بازده الکتریکی سلول‌های فتوولتاییک

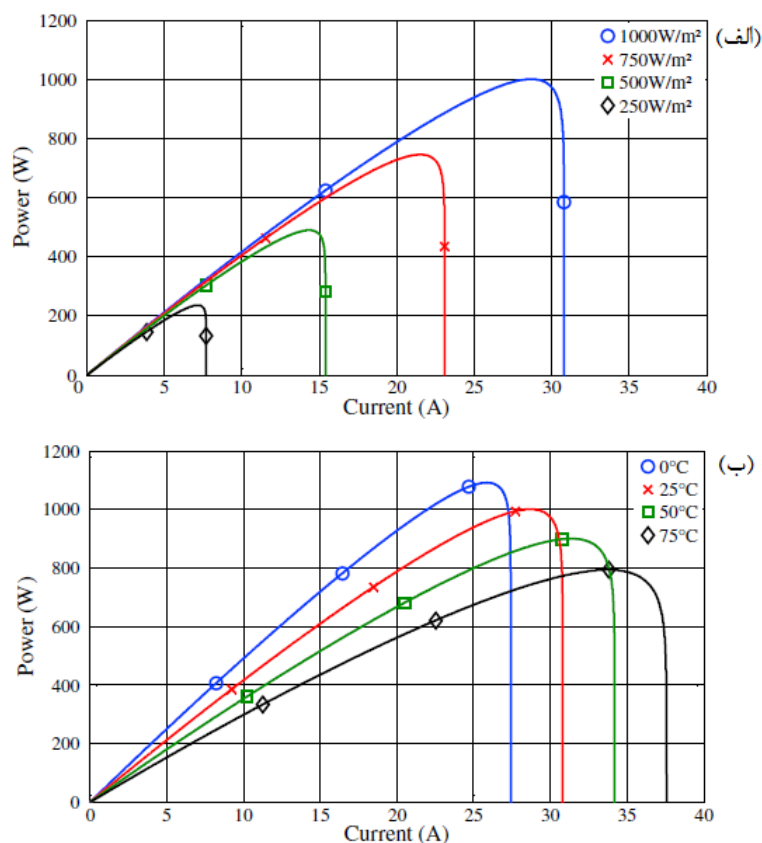
عوامل متعددی را می‌توان نام برد که بر بازده تبدیل تشعشع رسیده به سطح فتوولتاییک به انرژی الکتریکی اثرگذار هستند که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از :

- انرژی شکاف بین باندها؛
- دما که موضوع اصلی بررسی این تحقیق را شامل می‌شود.
- طول عمر ترکیب مجدد؛
- شدت نور؛
- چگالی ناخالصی و پروفیل آن؛
- سرعت ترکیب مجدد سطحی.

عواملی که به جنس سلول‌ها، خواص فیزیکی سلول‌ها و شرایط ساخت بستگی داشته باشد، بعد از تولید غیرقابل تغییر می‌باشند بنابراین پس از تولید یک واحد فتوولتاییک باید به دنبال راه‌های دیگری برای افزایش بازده این واحدها گشت. یکی از این راه‌ها کنترل دمای سلول‌ها جهت افزایش بازده الکتریکی خروجی می‌باشد. در شکل ۱-۵-الف، با ثابت در نظر گرفتن دمای سلول مشاهده می‌شود با افزایش شدت تشعشع

میزان جریان خروجی سلول و نیز توان خروجی واحد فتوولتاییک افزایش می‌یابد. اما در عمل با توجه به قوانین نیمه‌هادی‌ها و واحد فتوولتاییک که طبق توضیحات داده شده از قوانین کلی دیود تبعیت می‌کنند، با افزایش تشعشع وارد بر سطح سلول دمای سلول‌ها و جریان اتصال کوتاه خروجی افزایش می‌یابند. اما افزایش دما سبب کاهش ولتاژ مدار باز خروجی شده و در نتیجه توان الکتریکی خروجی افت پیدا می‌کند (شکل ۱-۵-ب). توسط راجر و ونچر^[۴]، رابطه‌ی توزیع دما در یک واحد فتوولتاییک (T_{pv}) بر حسب شدت تشعشع (G) و دمای محیط (T_a)، به صورت تقریبی توسط رابطه زیر ارائه شده است:

$$T_{pv} = 30 + 0.175 \times (G - 150) + 1.14 \times (T_a - 25) \quad (10-1)$$



شکل (۱-۵) الف- تغییرات توان و جریان خروجی واحد با تغییر در تشعشع ورودی در دمای ثابت سلول‌ها؛ ب- تغییرات توان و جریان خروجی واحد فتوولتاییک با تغییرات در دمای سلول‌های فتوولتاییک در میزان تشعشع ورودی ثابت [۵].

رابطه‌ی توزیع دما می‌تواند به یافتن عوامل اثرگذار بر افزایش دما و در نتیجه میزان کاهش در بازده الکتریکی کمک کند. برای بیان ارتباط تغییرات بازده الکتریکی با دمای سطح سلول می‌توان رابطه‌ای به صورت زیر ارائه کرد:

$$\eta_{pv} = G \times r \times \tau_g \times \eta_o \left[1 - \phi_{cell} (T_{pv} - 25) \right] \quad (11-1)$$

در این رابطه η_o بازدهی تبدیل انرژی الکتریکی در دمای مرجع 25°C ، ϕ_{cell} ضریب دمایی سلول خورشیدی با مقداری معادل $0.0045^\circ\text{C}^{-1}$ در روابط به کار می‌رود، این ضریب با انجام آزمون‌های اولیه بر روی واحدهای فتوولتاییک توسط سازنده‌ی سلول‌ها تعیین می‌شود. T_{pv} دمای سطح سلول، τ ضریب پوشش^۱ (میزان پوشش سطح کلکتور^۲ توسط سلول‌ها) و τ_g ضریب عبور پوشش شیشه‌ای است، که می‌تواند از رابطه‌ی ۱-۱۲ به دست آید.

$$\tau_g = e^{-\frac{jD_g}{\cos\theta_2}} \quad (12-1)$$

در رابطه‌ی ۱-۱۲، θ_2 معادل است با:

$$\theta_2 = \text{Arcsin} \left(\frac{\sin \theta_1}{n_g} \right) \quad (13-1)$$

θ_1 زاویه بازتاب از سطح پوشش، n_g ضریب بازتاب شیشه و z ضریب کاهش نور شیشه^۳ می‌باشد.

1 Packing factor

2 Collector

3 The extinction coefficient of the glass cover

۱-۵- دور نمای تحقیق

همان‌طور که در این فصل ملاحظه شد، خنک کردن واحدهای فتوولتاییک، علاوه بر افزایش دادن بازده الکتریکی، دستیابی به انرژی حرارتی به‌عنوان یک انرژی مازاد و در نتیجه افزایش بازده کلی سیستم را در پی خواهد داشت. در این تحقیق ابتدا با موازنه‌ی انرژی در اجزای اصلی یک واحد فتوولتاییک حرارتی، پیش‌زمینه‌ای برای بررسی این واحدها فراهم می‌شود. هدف اصلی انجام آزمایش‌ها بررسی میزان تاثیر افزودن نانو ذرات به سیال پایه در بازده واحدهای فتوولتاییک حرارتی می‌باشد. به‌منظور بررسی میزان کارایی ایده، با ساخت یک واحد فتوولتاییک حرارتی متشکل از تمامی اجزای اصلی یک سیستم تجاری کامل، به بررسی آزمایشگاهی موضوع پرداخته می‌شود. تغییر سیال خنک‌کننده‌ی واحد فتوولتاییک و استفاده از نانوفروسیال و همچنین اعمال میدان مغناطیسی خارجی به‌عنوان ایده‌ای جدید، موضوع اصلی این قسمت را شامل می‌شود. در این بخش تاثیر نانوفروسیال بر بازده سیستم، از لحاظ الکتریکی و حرارتی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به‌منظور بررسی صحت آزمایش‌ها، عدم قطعیت هر پارامتر مورد استفاده در آزمایش، بررسی و عدم قطعیت ترکیبی برای بازده الکتریکی و حرارتی محاسبه خواهد شد. برای حذف عوامل غیر مرتبط شبیه‌ساز خورشیدی ساخته‌شده و آزمایش‌ها تحت تابش ثابت و درون آزمایشگاه انجام می‌شود. در نهایت نتایج آزمایش‌ها به‌صورت مقایسه‌ی بازدهی الکتریکی و حرارتی واحد از لحاظ انرژی و انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

فصل ۲:

مروری بر منابع

۲-۱- پیشگفتار

همان‌طور که اشاره شد با توجه به اینکه عوامل متعددی روی بازده سلول‌های فتوولتائیک اثرگذار هستند، رسیدن به شرایط ایده‌آل برای تبدیل کامل تشعشع دارای انرژی کافی برای تبدیل شدن به الکتروسیسته دشوار است، با اشاره مجدد به این موضوع که سلول‌های فتوولتائیک بسته به جنس سلول و شرایط محیط فقط می‌توانند حدود ۵٪ تا ۱۸٪ از اشعه جذب‌شده را به الکتروسیسته تبدیل کنند، بنابراین می‌توان گفت از نقطه‌ضعف‌های واحدهای فتوولتائیک بازدهی کم تبدیل تشعشع به الکتروسیسته می‌باشد زیرا اولاً سلول‌ها، فوتون‌های دارای طول‌موج‌های بالا را نمی‌توانند جذب کنند و ثانياً آن بخشی هم که جذب می‌کنند قابلیت اینکه بطور کامل به الکتروسیسته تبدیل بشود را ندارد. بخشی از تشعشع جذب‌شده که به الکتروسیسته تبدیل نمی‌شود، به‌صورت امواج با طول‌موج بلند در فضا منتشر می‌شود و قسمت اعظم آن به حرارت داخل سلول تبدیل می‌شود. حرارت تولیدی در سلول‌های فتوولتائیک سبب افزایش دما در سلول‌ها می‌شود. ولتاژ مدارباز خروجی وابستگی کاهشی با افزایش دمای سلول‌ها دارد. بنابراین افزایش دما در سلول جزو عوامل مهم برای افت توان و کاهش بازده محسوب می‌شود. البته عوامل دیگر اشاره‌شده نیز بر بازده الکتروسیستی واحدهای فتوولتائیک اثرگذار هستند که از بحث این تحقیق خارج می‌باشند. در سال‌های اخیر تحقیقات در زمینه‌ی تولید توان فتوولتائیک همراه با ترکیب واحد حرارتی به‌صورت چشمگیری افزایش یافته است، این ترکیب با نام واحد فتوولتائیک حرارتی^۱ شناخته می‌شود. نتیجه‌ی استفاده‌ی همزمان واحد حرارتی با واحد الکتروسیستی، بازدهی بیشتر الکتروسیستی، افزایش بازده کلی سیستم، افزایش طول عمر سیستم و دوام بیشتر سلول‌ها به‌واسطه کاهش دما می‌باشد و از لحاظ اقتصادی نیز به‌صرفه‌تر است و بازگشت سرمایه در مدت‌زمان کوتاه‌تری انجام می‌پذیرد. در محاسبات انجام‌شده توسط مرکز تحقیقات انرژی هلند [۲]، نشان داده‌شده است که می‌توان مساحت صفحات را با تولید انرژی یکسان، با استفاده از کلکتورهای فتوولتائیک حرارتی تا

1 Photovoltaic-thermal system (PVT)

۴۰٪ کاهش داد. سیال مورد استفاده در فرایند خنک کاری با توجه به موقعیت، امکانات و نیاز مصرف کننده تعیین می گردد که می تواند آب یا هوا باشد (سیالات دیگر از قبیل روغن ها و سیالات مورد استفاده در سیستم های تبرید به علت هزینه های بالا و عدم بهره وری اقتصادی مورد استفاده ی کاربردی قرار نمی گیرند). استفاده از هر کدام از این سیال ها (آب یا هوا) در کلکتور مزایا و معایبی دارد. کلکتورهای *PVT*، با سیال عامل^۱ آب، ظرفیت گرمایی و هدایت حرارتی بالایی دارند. در نتیجه نرخ انتقال حرارت در واحد سطح در این نوع کلکتورها بالا بوده و به تبع آن دارای بازده کلی بالایی می باشند. مایع، چگالی بالایی نسبت به هوا دارد، بنابراین دبی کمتری از سیال برای استحصال میزان یکسان حرارت از سلول ها نیاز است. در این کلکتورها برای گردش سیال خنک کننده در کلکتور می توان از سیستم ثقلی کمک گرفت که سبب کاهش در هزینه ها می شود. در مقابل در کلکتورهای *PVT*، با سیال کاری هوا امکان یخ زدگی و جوشش در سیال که سبب توقف کارکرد می شود وجود ندارد، در صورت بروز نشستی آسیبی به سیستم وارد نمی شود و همچنین در استفاده ی طولانی مدت، استهلاک سیستم کمتر و نیز هزینه های اولیه نسبت به کلکتورهایی با سیال عامل مایع کمتر است.

مدل های آزمایشگاهی مختلفی از سیستم های فتوولتاییک حرارتی توسط چندین محقق مورد آزمایش قرار گرفته است. هدف اصلی تمامی این آزمایش ها، ساخت سیستمی با بالاترین بازده الکتریکی و بازدهی رضایت بخش از لحاظ حرارتی بوده است. مقدار قابل توجهی از تحقیقات به صورت خاص برای بهبود در انتقال حرارت و ابداع سیستم هایی برای کاهش هزینه ها و به طور همزمان افزایش بازده الکتریکی بوده است.

۲-۲- مزایا و معایب سیستم های فتوولتاییک حرارتی

از دیدگاه مهندسی برای فناوری تلفیق انرژی خورشیدی حرارتی و الکتریکی مزایا و معایب مختلفی را می توان برشمرد که مهم ترین آن ها را به طور خلاصه بیان می کنیم:

1 Working fluid

الف) مزایا:

- بدون ایجاد هرگونه اغتشاش صوتی، انرژی تولید می کنند.
- آلودگی های زیست محیطی از جمله مواد و پرتوهای رادیواکتیو^۱، دود و فاضلاب های صنعتی که دیگر منابع انرژی ایجاد می کنند تولید نمی شود.
- انرژی قابل اطمینانی است و به طور نسبی دارای بازدهی بالاتری در واحد سطح، نسبت به واحدهای تک منظوره است.
- سیستمی با قطعات مکانیکی ساده و غیر متحرک دارد و دارای طول عمر بالا (بین ۲۰ تا ۳۰ سال) است. بنابراین هزینه های تعمیر، نگهداری و تعویض بسیار پایینی دارد.
- نسبت به تولید جداگانه (الکتریسیته و حرارت)، هزینه های اولیه کمتر و فضای کمتری نیاز دارد.

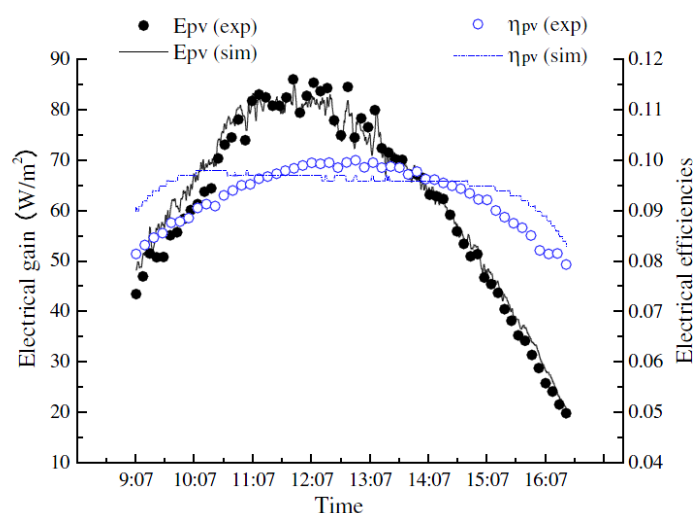
ب) معایب:

- تولید الکتریسیته و حرارت غیریکنواخت دارد، بنابراین نوسانات خروجی بسیار زیاد می باشد.
- از لحاظ اقتصادی نیاز به سرمایه گذاری اولیه بالایی دارد بنابراین دوره بازگشت سرمایه طولانی تر است.
- برای نصب در سقف های طراحی شده ی بسیاری از ساختمان ها مناسب نیست.

- برای شرایط آب و هوایی بسیار سرد، امکان یخزدگی سیال جاذب حرارت و آسیب به قسمت‌های حرارتی سیستم وجود دارد.

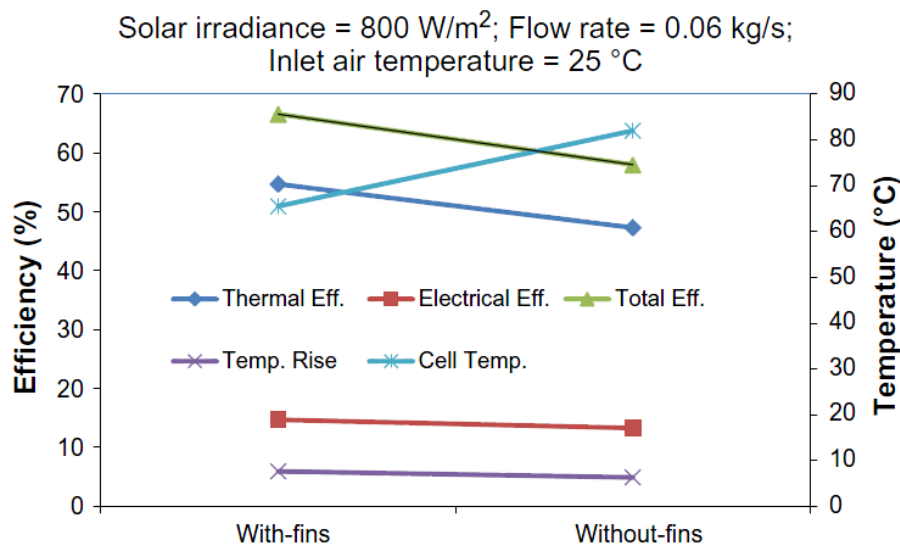
۲-۳- نمونه تحقیقات انجام شده در گذشته

پی جانگ^۱ و همکاران [۶]، سیستم جدید فتوولتاییک حرارتی، که حرارت را توسط میله‌های مسی به محل جریان سیال منتقل می‌کرد مورد آزمایش قرار دادند. مزیتی که این سیستم در مقایسه با سیستم‌های رایج داشت این بود که از آن می‌توان در مناطق سردسیر بدون یخزدگی سیال، مورد استفاده قرار داد. نتایج به دست آمده از این مطالعه مشخص کرد که بازده حرارتی این سیستم ۴۱٫۹٪ و بازده الکتریکی ۹٫۴٪ می‌باشد. علاوه بر آن تحلیل بازده بر اساس قانون دوم ترمودینامیک، بازده کلی سیستم را ۶٫۸٪ پیش‌بینی می‌کند. هرچند نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با نتایج عددی آن‌ها، در پیش‌بینی میزان الکتریسیته‌ی حاصل، دقت خوبی نشان می‌دهند اما در پیش‌بینی بازده الکتریکی اختلافات عمده‌ای باهم دارند. نمونه‌ای از نتایج عددی آن‌ها و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۲-۱، آورده شده است.



شکل (۲-۱) مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی بازده الکتریکی سلول‌های فتوولتاییک- حرارتی [۶].

تریپاناگنستوپولوس^۱ و همکاران [۷]، مدل‌های آزمایشگاهی شامل سه تغییر در کانال هوا را مورد بررسی قرار دادند: (۱) تغییر در عمق کانال هوا؛ (۲) نصب فین‌ها و مجراهایی در کانال؛ (۳) قرار دادن یک صفحه با پوشش خاص در مسیر جریان سیال. نتایج سیستم بهبودیافته آن‌ها با سیستم مرجع که دارای عمق کانال ۱.۵cm بود، مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس نتایج این تحقیق، پیشنهاد شد که یک راه ساده و کارآمد به منظور افزایش بازدهی، قرار دادن یک صفحه فلزی که در خلاف جهت جریان، زبر شده است، می‌باشد. روسن و راکش^۲ [۸]، به ارزیابی عملکرد فین در یک واحد فتوولتائیک حرارتی با سیال عامل هوا پرداختند. در مطالعه آن‌ها، تأثیرات حضور فین در کانال جریان هوا، عمق کانال جریان هوا، نرخ جریان، دمای هوای ورودی و ضریب پوشش، روی بازدهی الکتریکی و حرارتی به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۲-۲).



شکل (۲-۲) مقایسه بازده الکتریکی، بازده حرارتی و دمای سلول‌های فتوولتائیک-حرارتی در حالت کلکتور فین‌دار و بدون فین [۸].

1 Tripanagnostopoulos

2 Rosen and Rakesh

فین گسترش یافته به طور قابل توجهی دمای سلول را، از 82°C به 66°C کاهش داد. حضور فین، در بازدهی الکتریکی حدود 3% و در بازدهی حرارتی حدود 8% افزایش را نشان می دهد. همچنین در تحقیق انجام شده توسط آنها، ارزیابی های گسترده ای برای خروجی های الکتریکی و حرارتی متأثر از ضریب پوشش گزارش شده است و نشان داده شده که ضریب های پوشش بالا به سبب تولید بیشتر الکتریسیته سودمند خواهد بود (شکل ۲-۲).

دابی و تیواری^۱ [۹]، مطالعه ای تحلیلی روی بازدهی الکتریکی کلکتورهای فتوولتاییک حرارتی صفحه تخت، با سیال کاری هوا انجام دادند. در این مطالعه تأثیر جریان روی واحدهای فتوولتاییک به عنوان یکی از پارامترهای طراحی و شرایط آب و هوایی بررسی شده است. چهار ترکیب از واحدهای فتوولتاییک در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت: ترکیب اول شامل واحدهای فتوولتاییک شفاف با مجرای عبور سیال، ترکیب دوم واحدهای فتوولتاییک شفاف بدون مجرا، و ترکیب های بعدی شامل واحدهای فتوولتاییک با صفحه عایق برای دو حالت فوق بوده است. در این مطالعه مشخص شد که میانگین بازدهی الکتریکی واحد فتوولتاییک با مجرای عبور سیال 10.41% و بدون عبور سیال 9.75% می باشد.

تیواری و سودا^۲ [۱۰]، مدل عددی خود از تحقیق انجام شده را روی سیستم با سیال عامل آب برای تحلیل بازدهی و آزمایش های میزان حساسیت از کلکتورهایی با پوشش و بدون پوشش شیشه ای نیز گسترش دادند. در این تحقیق بررسی های قابل توجهی به طور خاص برای بهبود در انتقال حرارت کلکتورهای هوا به صورت جابجایی آزاد و اجباری صورت گرفته است. این مطالعه ها به طور عمومی روی هندسه ی کانال، ایجاد توربولانس بیشتر در کانال جریان و افزایش مساحت سطح انتقال حرارت جابجایی در کانال متمرکز شده اند.

دهرا^۳ [۱۱]، مدلی برای شبکه حرارتی دوبعدی جهت پیش بینی توزیع دمای هوا، دمای واحد فتوولتاییک و پانل پشتی^۴ در مقطعی از دیواره ی خورشیدی واحد فتوولتاییک که به صورت عمودی به عنوان دیوار در

1 Dubey and Tiwari

2 Tiwari and Sodha

3 Dehra

4 Back panel

قسمت خارجی اتاق نصب شده بود ارائه کرد، در مطالعه‌ی وی معادلات گره‌ای شبکه‌ی حرارتی حالت پایدار، با در نظر گرفتن تبادل و انتقال حرارت به صورت توأم توسعه یافته است. در این تحقیق روند حل ماتریسی برای فرمول‌بندی میزان هدایت و شبکه‌های منبع حرارت، توسط پرداختن به شبکه دوبعدی به کار گرفته شده است. در مدل وی روند حل عددی از شبکه‌ی دوبعدی حرارتی شامل موارد زیر است:

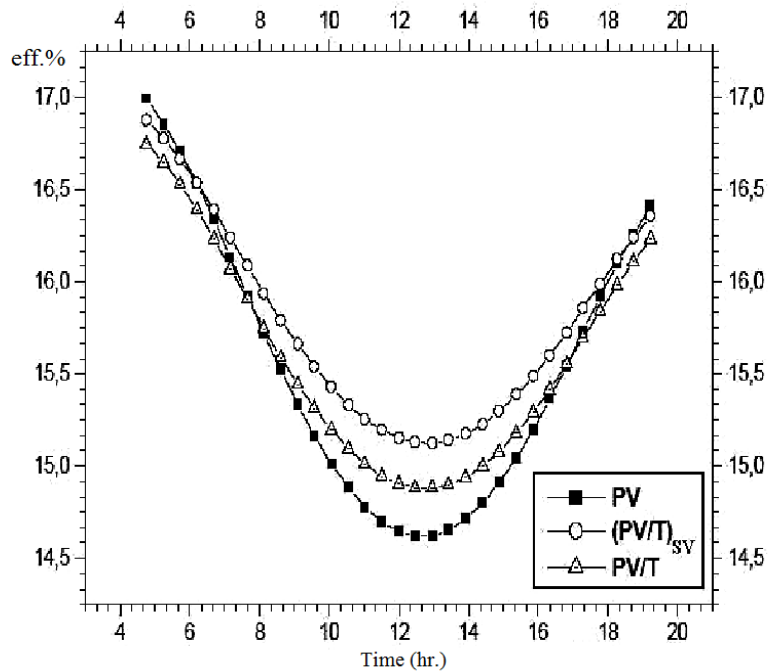
- ساختار شبکه‌بندی گره‌ای؛

- موازنه‌ی انرژی روی گره‌های صفحه در لبه جامد- هوا؛

- موازنه‌ی انرژی روی گره‌های هوا در مسیر هوا؛

- حل سیستم توسط حل معادلات جبری.

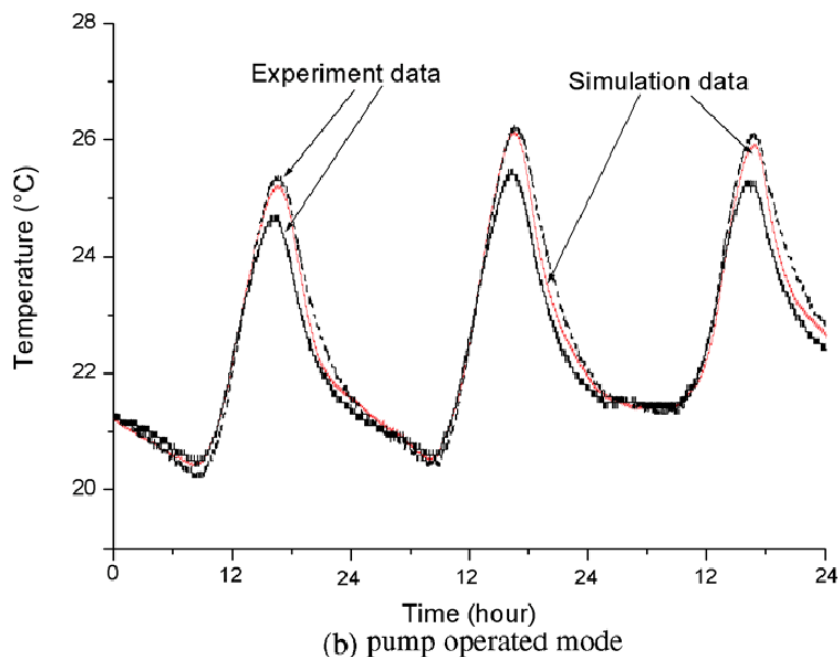
بوبکری^۱ و همکاران [۱۲]، با رویکردی عددی به مطالعه‌ی بازدهی کلکتور فتوولتاییک حرارتی هیبریدی پرداختند. بر طبق مطالعات آن‌ها با توجه به خواص ترموفیزیکی، کلکتورهایی با سیال عامل آب یا هوا بازدهی کمی را نشان می‌دهند، در این تحقیق ترکیب دو کلکتور (با سیال عامل هوا و آب) به عنوان روشی موثر برای بالا بردن بازدهی به کار گرفته شده است (شکل ۲-۳).



شکل (۲-۳) مدل سازی عددی بازده الکتریکی در طول روز برای کلکتور با دو سیال عامل آب و هوا (PV/T_{sv}) [۱۲].

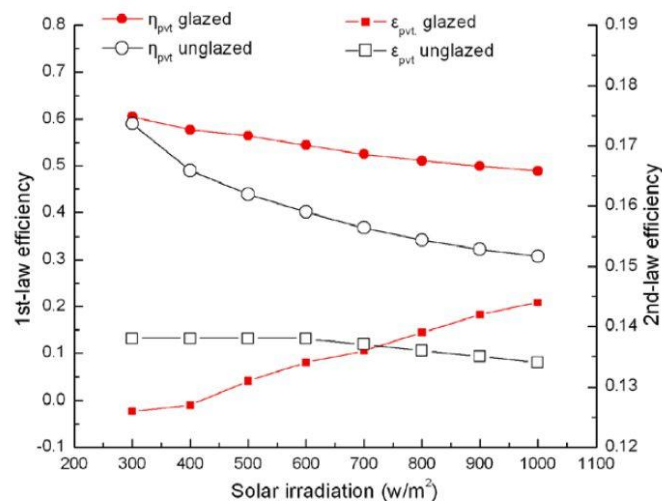
در شکل ۲-۳، نمونه‌ای از نتایج آن‌ها برای تاثیر استفاده از دو کلکتور در بازدهی الکتریکی آورده شده است. آن‌ها نتایج خود را با سیستم فتوولتاییک و سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال عامل آب مقایسه کردند. سیستم فتوولتاییک مورد بررسی آن‌ها افزایش ۱٫۱٪ در بازدهی الکتریکی و کاهش دمای سلول تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد (شکل ۲-۳). برای پیش‌بینی دمای واحدهای فتوولتاییک و میزان گرمای جذب‌شده توسط سیال در طول دوره‌ی نوسان تشعشع ورودی یا تغییر میزان سیال در یک موقعیت ناپایدار، چاو و هی^۱ [۱۳]، یک مدل دینامیکی صریح بر اساس تفاضل محدود برای سیستم فتوولتاییک با کلکتور حاوی سیال عامل آب ارائه کردند. آن‌ها از یک لایه عایق الکتریکی و لایه‌های چسبنده با مقاومت حرارتی کم برای اتصال بین قطعات استفاده کردند و گزارش کردند که در یک کلکتور مناسب، بازده ترکیبی را می‌توان بالای ۷۰٪ نیز رسانید، و در یک کلکتور نامناسب این میزان به زیر ۶۰٪ می‌رسد. در شکل ۲-۴، نمونه‌ای از مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی آن‌ها برای مدل سازی سلول فتوولتاییک همراه با پمپ به منظور ایجاد

جابجایی اجباری در سیال، در سه روز متوالی نشان داده شده است.

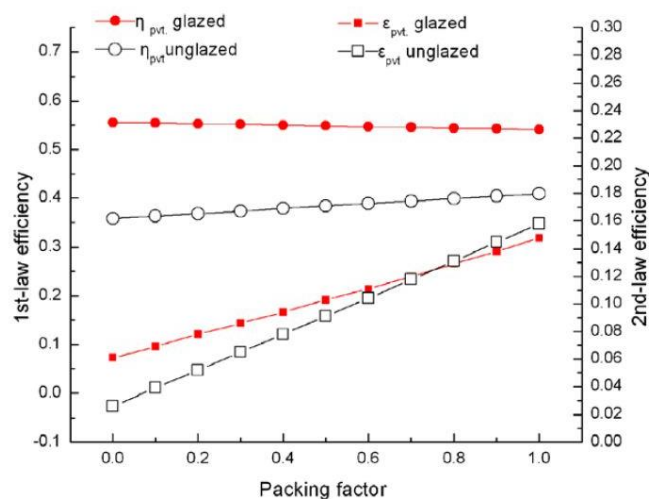


شکل (۲-۴) دمای سطح پشت واحد فتوولتاییک در حالت کارکرد با پمپ [۱۳].

چاو [۱۴]، شش پارامتر کلیدی محیطی و داخلی را روی سیستم فتوولتاییک حرارتی از جمله ضریب پوشش، دمای محیط و ... را روی بازدهی قانون اول و دوم و بازدهی الکتریکی بررسی کرد. نتایج بازدهی حرارتی و الکتریکی برای کلکتور با پوشش شیشه‌ای به ترتیب ۵۰٫۳٪ و ۹٫۳٪ و برای بدون پوشش شیشه‌ای ۴۰٫۸٪ و ۱۲٫۱٪ است. همچنین تأثیر پوشش شیشه‌ای کلکتور روی بازده حرارتی و الکتریکی توسط وی مورد بررسی قرار گرفته است. به‌عنوان نمونه، تأثیر ضریب پوشش روی بازدهی قانون اول و دوم در شکل‌های (۲-۵) و (۲-۶)، آورده شده است.



شکل (۲-۵) تغییرات بازدهی کلی سیستم فتوولتائیک با تغییر در تشعشع ورودی [۱۴].



شکل (۲-۶) تغییرات بازدهی کلی با ضریب پوشش سلول‌ها توسط کلکتور [۱۴].

دابی و همکاران [۱۵]، بازده تئوری کلکتورهای صفحه‌ای با ضریب پوشش جزئی، که به صورت سری به هم متصل شده بودند را مورد ارزیابی قرار دادند. مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد که این‌گونه کلکتورها در ارزش‌گذاری سالیانه در صورتی که نیاز اولیه مصرف‌کننده، انرژی حرارتی باشد، مفید خواهد بود. از طرف دیگر در صورتی که انرژی درخواستی اولیه الکتریسیته باشد، کلکتور با ضریب پوشش بالاتر مفیدتر است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که دمای خروجی سیال با افزایش تعداد کلکتورها از ۴ به ۱۰، به طور قابل توجهی از ۶۰ به ۸۴

افزایش می‌یابد. همچنین انرژی حرارتی مفید از ۴,۱۷ کیلووات ساعت به ۸,۶۶ کیلووات ساعت و انرژی الکتریکی به دست آمده از ۰,۰۵۲ کیلووات ساعت به ۰,۱۲۳ کیلووات ساعت، وابسته به افزایش تعداد کلکتورها، افزایش خواهند یافت.

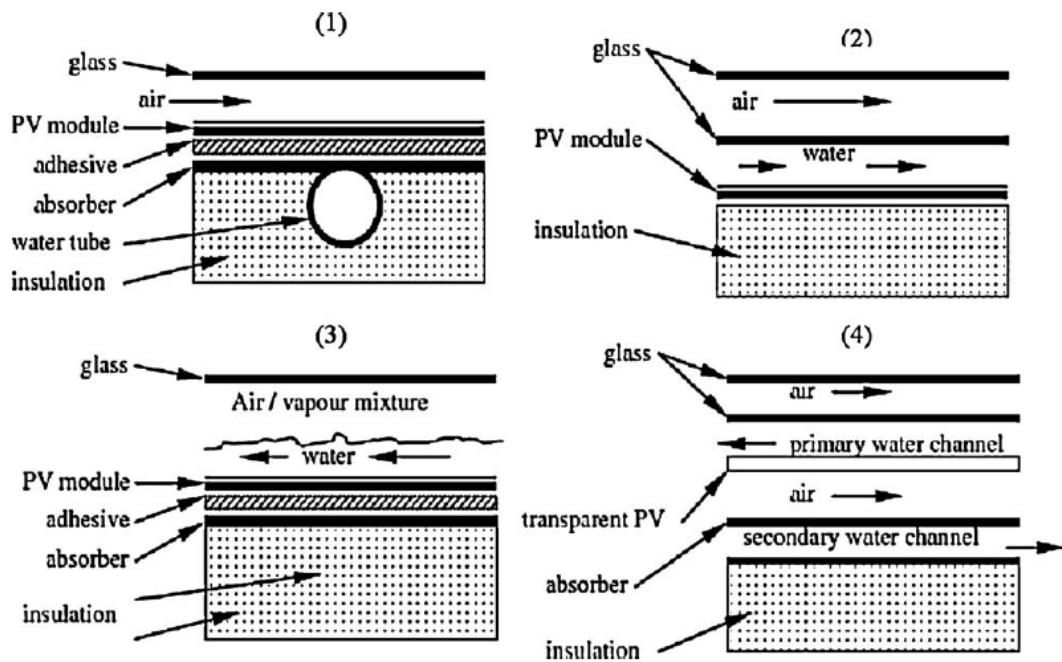
جونز و آندروود^۱ [۱۶]، بیانی برای دمای واحدهای فتوولتاییک بر اساس تشعشع و دمای محیط ارائه کردند. بر طبق مطالعات آنها، پارامترهای مختلفی بر بازده سلول‌ها تأثیر می‌گذارند که از آن جمله می‌توان به ضریب پوشش، تلفات اهمی بین دو سلول متوالی و دمای واحدهای فتوولتاییک اشاره کرد. در این تحقیق بیان شد که با افزایش ضریب پوشش سلول توسط کلکتور به عنوان راهی ساده می‌توان به طور قابل ملاحظه‌ای بازده الکتریکی و حرارتی را افزایش داد.

۲-۴- طبقه‌بندی کلکتورهای صفحه تخت فتوولتاییک حرارتی

کلکتورهای صفحه تخت واحدهای فتوولتاییک حرارتی با توجه به نیاز مصرف‌کننده به سه دسته‌ی کلی، کلکتور با سیال عامل آب (سیال مایع)، کلکتور با سیال عامل هوا و کلکتور ترکیبی از این دو سیال تقسیم‌بندی می‌شود. در یک طراحی کامل از کلکتور صفحه تخت بهتر است پوشش شیشه‌ای روی صفحه فتوولتاییک، توان و بازده تولید در سلول‌های خورشیدی، و نوع جاذب در کلکتور را نیز در نظر بگیرد. زونداگ^۲ و همکاران [۱۷]، جزئیات انواع مختلف کلکتورهای صفحه تخت را که در شکل ۲-۷، آورده شده است بیان کرده‌اند. برای کلکتور با سیال عامل آب، دسته‌بندی می‌تواند بر اساس الگوی جریان آب در کلکتور، و برای سیال هوا، بر اساس ساختار جریان صورت گیرد. در تحقیق حاضر به علت مزایایی که برای سیال مایع بیان شد و همچنین کاربرد گسترده‌تر آن نسبت به سیال هوا، از سیال مایع استفاده می‌شود، بنابراین به تشریح جزئی‌تر کلکتور با سیال مایع می‌پردازیم.

1 Jones and Underwood

2 Zondag



شکل (۲-۷) (۱) پوسته و لوله (۲) کانال (۳) جریان آزاد (۴) کلکتور با دو صفحه جاذب [۱۷].

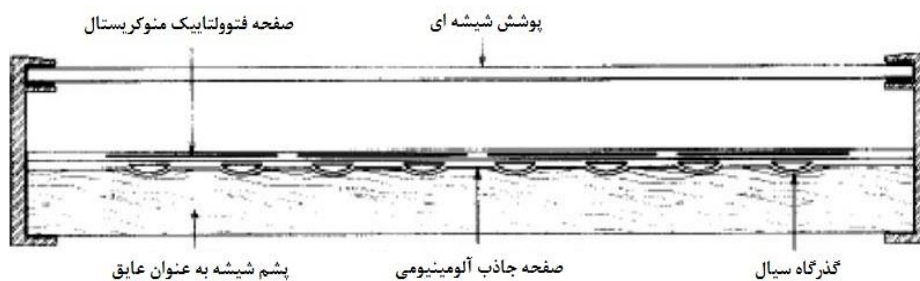
کلکتورهای رایج مورد استفاده برای سیال مایع، از نوع پوسته و لوله می باشد، که لوله ها به دو نوع مدور و مستطیلی تقسیم می شوند.

• جاذب با لوله ی مدور:

ساده ترین نوع مبدل می باشد و بنا بر تحقیق های انجام شده، این نوع مبدل نسبت به سایر مبدل ها تنها دو درصد، بازدهی کمتر دارد [۱۸]. یک مدل فیزیکی از سیستم فتوولتاییک حرارتی توسط برجین و لوئیک^۱ [۱۹]، که با الگوریتم هایی برای پیش بینی مقداری بازده تلفیق شده بود ارائه شده است. مدل ارائه شده بر اساس تحلیل انتقال انرژی در خلال هدایت، جابجایی و تشعشع می باشد. آن ها ادعا کردند که این مدل می تواند برای پیش بینی مقدار حرارت استخراج شده از سیستم و همچنین توان خروجی به کار گرفته شود. آن ها در این تحقیق از مبدل پوسته و لوله برای این سیستم استفاده کردند و نتیجه ی پیش بینی مدل این

1 Bergene and Lovvik

بود که بازدهی انرژی می‌تواند برای این نوع مبدل بین ۶۰٪ تا ۸۰٪ باشد. همچنین یک ارزیابی انرژی^۱ سالیانه روی کلکتور هیبریدی فتوولتاییک حرارتی در دانشکده‌ی فناوری دانشگاه توکیو^۲ انجام شده است [۲۰]. همان‌طور که در شکل (۲-۸) نشان داده شده است آن‌ها به‌طور خاص کلکتور هیبرید با جنس آلومینیوم که مجراهای مدور شکل به‌عنوان جاذب در نظر گرفته شده بود را طراحی و مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها سیستم فتوولتاییک حرارتی را با استفاده از یک سیستم پوششی ارتقاء دادند.



شکل (۲-۸) برش مقطعی از سیستم مورد آزمایش در دانشگاه توکیو [۲۰].

• جاذب با لوله‌ی مستطیلی - مربعی:

سندس و رکستاد^۳ [۲۱]، کاری آزمایشگاهی و مدلی تحلیلی برای کلکتور فتوولتاییک حرارتی با کلکتور دارای کانال‌های مستطیلی انجام دادند. در کار آزمایشگاهی این محققان یک کلکتور جاذب حرارت از جنس پلیمر پلاستیکی PPO^۴، با سطوح سیاه‌رنگ و کانال‌هایی پر شده از ذرات سرامیک، با واحد فتوولتاییک مونوکریستال سیلیکون یکپارچه شده و به‌عنوان سیستم هیبرید تولید انرژی به کار گرفته شده است. سیستم به‌طور هم‌زمان حرارت با دمای پایین و الکتریسیته تولید می‌کند. سیال (آب)، به‌عنوان جاذب حرارت توسط پمپ به کانال‌ها انتقال می‌یابد و در کانال‌ها با استفاده از نیروی جاذبه به پایین منتقل می‌شود. نتایج با

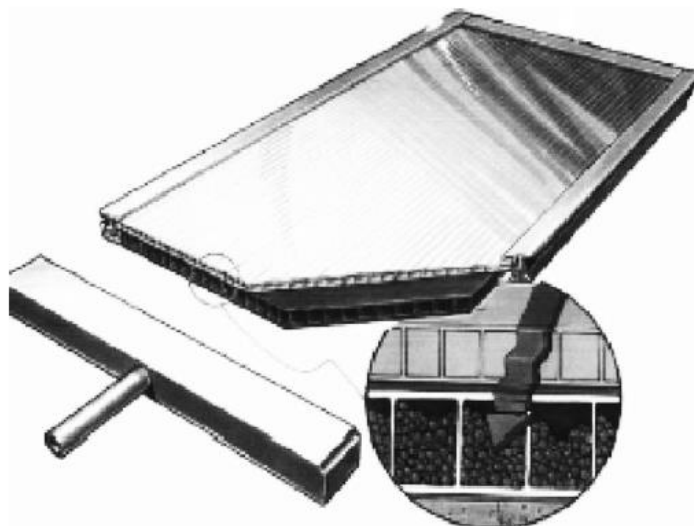
1 Exergy

2 Tokio Technology University

3 Sandnes and Rekstad

4 Polyphenylenoxid

شبهه‌سازی مقایسه شده و نتایج یکسانی به دست آمده است. شکل ۲-۹، مقطع کلکتور ساخته شده توسط آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۹) برش مقطعی از کلکتور ساخته شده از مواد پلیمری [۲۱].

آزمایشی مشابه با استفاده از آلومینیوم آلیاژی مشبک با کانال‌های مستطیلی متصل به صفحه فتوولتاییک سیلیکون تک‌بلوری و استفاده از آب به‌عنوان سیال خنک‌کننده انجام شده است. از این آزمایش نتیجه گرفته شد که میزان بازدهی حرارتی زمانی که دمای ورودی اولیه سیستم با میانگین دمای محیط برابر باشد حدود ۴۰ درصد است [۲۲].

۲-۵- بازدهی از لحاظ قانون اول ترمودینامیک (انرژی)

از دیدگاه قانون اول ترمودینامیک بازدهی کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی می‌تواند با استفاده از تعریف بازده از لحاظ انرژی ارزیابی شود این ارزیابی در حقیقت مهم‌ترین قسمت مطالعات و کارهای سایر محققان را تشکیل می‌دهد. با تعریف دوره زمانی از t_1 تا t_2 خواهیم داشت:

$$\eta_{pvt} \cong \frac{\dot{E}_{th} + \dot{E}_{el}}{\dot{E}_{in}} \Rightarrow \eta_{pvt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (A_c \dot{E}_{th} + A_{pv} \dot{E}_{el}) dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} (G) dt} = \eta_{th} + r \cdot \eta_{el} \quad (1-2)$$

در رابطه فوق \dot{E}_{th} توان حرارتی خروجی بر واحد سطح کلکتور، \dot{E}_{el} توان خروجی فتوولتاییک بر واحد سطح سلول، G شدت تشعشع بر واحد سطح کلکتور، A_c مساحت سطح کلکتور، A_{pv} مساحت سطح سلول‌ها، η_{th} بازده حرارتی فتوولتاییک، η_{el} بازده سلول‌های فتوولتاییک و r ضریب پوشش می‌باشد که عبارت است از مساحت سطح موثر سلول‌های فتوولتاییک به مساحت سطح موثر کلکتور که به صورت $r = \frac{A_{pv}}{A_c}$ تعریف می‌شود.

و مقدار \dot{E}_{th} در این پژوهش از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\dot{E}_{th} = \dot{m}_f \cdot C_{pf} \cdot (T_{f,o} - T_{f,i}) \quad (2-2)$$

نیروگاه‌های حرارتی استفاده کننده از زغال سنگ، با سوزاندن آن، الکتریسیته تولید می‌کنند. زغال سنگ نیز از کربن تشکیل شده است. در هنگام عمل سوختن، این کربن در واکنش با اکسیژن هوا، کربن دی اکسید تولید کرده که دارای ارزش حرارتی بالایی است. از این تعریف برای بیان کیفیت گرمای تولیدی از سوختن زغال سنگ استفاده می‌شود، برای مثال چنانچه گفته شود ارزش حرارتی زغال سنگی 200 kJ/kg است این بدان معناست که با سوزاندن 1 kg از آن زغال سنگ می‌توان 200 kJ گرما تولید کرد. اما برای تحلیل گرمایی یک سیستم فتوولتاییک حرارتی می‌بایست بتوان انرژی گرمایی را به الکتریکی تبدیل کرد و برعکس. بر اساس این واقعیت که 1 kWh الکتریسیته نمی‌تواند به‌طور مستقیم با 1 kWh گرما مقایسه شود و از دیدگاه ترمودینامیکی برابر نیستند. از این رو فاکتوری کلیدی برای این تبدیل در مقالات [۸-۱۰، ۲۰]، گزارش شده است. این فاکتور که کیفیت تبدیل گرمای تولیدی از سوختن زغال سنگ به الکتریسته را نشان می‌دهد در حقیقت معرف میزان قابلیت تبدیل انرژی ذخیره شده (حرارت) به الکتریسیته بوده، بصورت تجربی محاسبه شده و بفرم زیر است:

$$\dot{E}_{el,th} = \frac{\dot{E}_{el}}{c_f} \quad (۳-۲)$$

مقادیر قابل قبول برای c_f بین ۰/۳۵ تا ۰/۴ معرفی شده، در این پژوهش مقدار ۰/۳۸ انتخاب شده است. در این صورت می توان مقدار گرمای کل سیستم را از فرمول زیر محاسبه کرد:

$$\dot{Q}_{overall} = \dot{Q}_{th} + \frac{\dot{Q}_{el}}{c_f} \quad (۴-۲)$$

۲-۶- بازدهی از لحاظ قانون دوم ترمودینامیک (اگرژی)

انرژی حرارتی و انرژی الکتریکی تولیدشده توسط یک سیستم فتوولتاییک حرارتی از لحاظ کیفی یکسان نمی باشند. حتی در صورتی که از لحاظ مقداری نیز یکسان باشند نیز این مساله صادق است. انرژی حرارتی تا زمانی که اختلاف دما بین یک چاه و چشمه حرارتی وجود نداشته باشد نمی تواند کار تولید کند، در صورتی که انرژی الکتریکی می تواند بدون تاثیرپذیری از محیط به طور کامل به کار تبدیل شود. بر این اساس و با توجه به این مساله، رویکرد قانون اول ترمودینامیک در ارزیابی بازده هیبرید انرژی کامل نمی باشد. از این رو تحلیل بازدهی از دیدگاه اگرژی و بر اساس قانون دوم ترمودینامیک پیشنهاد می شود. اگرژی به بیان ساده با کم کردن انرژی غیرقابل دسترس از میزان کل انرژی، مقدار انرژی قابل دسترس یا همان توان انجام کار را بیان می کند. از دیدگاه تحلیلی، اگرژی یک واحد فتوولتاییک حرارتی را می بایست در دو قسمت جداگانه فتوولتاییک و کلکتور حرارتی سیستم مورد بررسی قرار داد. بر اساس مطالعه صورت گرفته توسط فوجیسوار و تانی [۲۰]، با فرض برابری اولیه ی دمای سیال با دمای محیط، بازده کلی از لحاظ اگرژی برای سیستم فتوولتاییک حرارتی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\varepsilon_{pvt} = \varepsilon_{pv} + \varepsilon_{th} = \eta_{pv} + \eta_{th} \left(1 - \frac{T_a}{T_{f,out}} \right) \quad (۵-۲)$$

در رابطه‌ی فوق \mathcal{E}_{pv} بازدهی اگزرژی سلول‌های فتوولتاییک، \mathcal{E}_{th} بازدهی اگزرژی کلکتور حرارتی، T_a دمای محیط، $T_{f,out}$ دمای نهایی سیال خنک‌کننده‌ی سلول‌ها می‌باشند. در صورت هم‌ارز گرفتن \mathcal{E}_{pv} با η_{pv} ، \mathcal{E}_{th} با η_{th} رابطه‌ای به صورت بازدهی کارنو خواهد داشت که در معادله مشخص می‌باشد. در رابطه‌ی ۲-۴۰، دو ساده‌سازی کلی صورت گرفته است: اولاً، فاکتور بسیار مهم ضریب پوشش در نظر گرفته نشده است و ثانیاً، اگزرژی حاصل از تشعشع نیز در رابطه استفاده نشده است. با اصلاح رابطه توسط چاو [۱۳، ۱۴]، رابطه‌ی جدیدی ارائه شد:

$$\mathcal{E}_{pvt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (A_c \dot{E}x_t + A_{pv} \dot{E}x_{pv}) dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} \dot{E}x_{Sun} dt} = \mathcal{E}_t + r \mathcal{E}_{pv} \quad (۶-۲)$$

در این رابطه $\dot{E}x_{pv}$ اگزرژی خروجی فتوولتاییک بر واحد سطح سلول، $\dot{E}x_t$ اگزرژی حرارتی خروجی بر واحد سطح کلکتور و $\dot{E}x_{Sun}$ اگزرژی ورودی تشعشع خورشید می‌باشد. اگزرژی‌های خروجی توسط رابطه‌های زیر به انرژی‌های خروجی مربوط می‌شوند:

$$\dot{E}x_{el} = \dot{E}_{el} \quad (۷-۲)$$

$$\dot{E}x_{th} = \dot{E}_{th} \left(1 - \frac{T_a}{T_{f,out}} \right) \quad (۸-۲)$$

$$\dot{E}x_{overall} = \dot{E}x_{th} + \dot{E}x_{el} \quad (۹-۲)$$

در ارزیابی بازدهی سیستم‌های انرژی خورشیدی از لحاظ اگزرژی، روش‌های مختلفی برای محاسبه اگزرژی تشعشع در طی بیست سال گذشته ارائه شده است. در این بین، سه روش محاسبه‌ی عمومی‌تر که توسط مراجع، ارائه شده است که به ترتیب عبارت‌اند از [۱۳]:

$$\dot{E}x_{sun} = G \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right) \right] \quad (10-2)$$

$$\dot{E}x_{sun} = G \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right) \right] \quad (11-2)$$

$$\dot{E}x_{sun} = G \left[1 - \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right) \right] \quad (12-2)$$

در رابطه فوق T_a دمای محیط و T_{sun} دمای تشعشع خورشید است، خورشید در دمای ۵۷۰۰ کلوین به‌عنوان جسم سیاه در نظر گرفته شده است. اختلاف نتایج سه روش فوق در عمل کمتر از ۲ درصد می‌باشد.

فصل ۳:

مقدمه‌ای بر نانوسیالات

۳-۱- پیشگفتار

یکی از برجسته‌ترین چالش‌های علمی در حوزه صنعت روش‌های ساخت ابزارهای میکروالکترونیک است. پیشرفت‌های فناوری چون عملکرد با سرعت بسیار بالای ابزارهای میکروالکترونیک، موتورها و همچنین ابزارهای نوری با قدرت و توان بیشتر منجر به بار گرمایی افزایش یافته‌ای می‌شوند که متعاقب آن نیاز به روش‌های پیشرفته در خنک کاری آنان خواهد بود. روش‌های مرسوم برای خنک کاری به‌طور کلی نیازمند افزایش سطح بیشتر سیستم خنک‌کننده برای انتقال گرما بهتر می‌باشند. از این رو این رویکرد منجر به افزایش نامطلوب در اندازه سیستم مدیریت گرمایی خواهد شد، بنابراین نیازی اساسی برای ابداع روش یا روش‌هایی موثرتر برای خنک کاری کارآمد تر دیده می‌شود. ایده نوآورانه "نانوسیالات" برای پاسخ به چالش‌های یاد شده از این رو پیشنهاد گردید [۲۳]. ماکسول^۱ اولین فردی بود که در حدود ۱۴۰ سال پیش (۱۸۷۳) پایه‌های تئوری را بنیاد نهاد که به پیش‌بینی رسانندگی گرمایی موثر یک سوسپانسیون می‌پردازد. تئوری وی محدوده ذرات از ابعاد میلی‌متر تا میکرومتر را پوشش می‌دهد و برای اولین بار چوی و استمن^۲ [۲۳]، ایده ابتکاری استفاده از خصوصیات منحصر بفرد نانوسیالات را در گردهمایی سالانه مهندسان مکانیک جامعه امریکا در سال ۱۹۹۵ ارائه کردند. چوی و همکاران وی آزمایش‌هایی را جهت بررسی انتقال حرارت سیستمی همراه با نانوذرات اکسید مس در آب و ذرات اکسید آلومینیم در اتیلن گلیکول و آب انجام داده و دریافتند که ذرات اضافه‌شده انتقال حرارت سیال را در حدود ۲۰٪ افزایش می‌دهد و در نتیجه نتایج خود را به‌صورت رسانندگی گرمایی بهبودیافته k/k_0 با عنوان رسانندگی گرمایی موثر بیان کردند. نانوسیال عبارت است از سیالی که نانوذرات فلزی و غیرفلزی یا نانوفیبرها با اندازه‌ای کمتر از ۱۰۰ نانومتر درون آن پراکنده شدند. نانوسیالات به علت خصوصیات انتقال حرارتی بهبودیافته خود اخیراً توجه بسیاری بخود جلب

¹ Maxwell

² Choi and Eastman

کردند. برای مثال آزمایش‌ها افزایش ۴۰ و حتی ۱۵۰ درصدی را به ترتیب در پراکنده‌سازی نانوذرات مس یا نانولوله‌های کربنی در کسر حجمی کمتر از ۱ درصد در اتیلن گلیکول یا روغن نشان دادند. همچنین این شاخه از سیالات مزایای دیگری را دارا می‌باشند که از جمله آن می‌توان به پایداری و رسانندگی گرمایی بسیار بیشتر آنان در مقایسه با سوسپانسیون ذرات در ابعاد میلی‌متر و یا حتی میکرومتر اشاره کرد همچنین افت فشار و خوردگی کمتر آنان در میکروکانال‌ها نیز نسبت به ابعاد ذرات بزرگ‌تر بسیار کمتر خواهد بود. البته بایستی اشاره کرد که نانوسیالات در مراحل ابتدایی بررسی خود قرار داشته و در حدود یک دهه گذشته، بسیاری از پژوهشگران به بررسی این شاخه نوین سیالات پرداختند. شایان ذکر است که پیش از استفاده نانوسیالات برای انتقال حرارت، دانش حاکم بر خصوصیات ترموفیزیکی آنان چون رسانندگی گرمایی و ویسکوزیته بسیار مورد نیاز است. از این رو بسیاری از پژوهشگران به صورت مستقیم به اندازه‌گیری خصوصیات ترموفیزیکی و برخی دیگر از روابط پیش‌بینی کننده شناخته‌شده نانوسیالات بهره بردند. بررسی‌ها در دو حوزه تجربی و تئوری به‌طور کلی صورت گرفته است [۲۴]. لذا در این بخش توجه و تمرکز ما بر روی مسئله پایداری نانوسیالات می‌باشد. این موضوع بسیار بر استفاده عملی و صنعتی آنان تاثیر گذار است. در این بخش مطالعاتی را که در زمینه نحوه ساخت و تهیه و روش‌های مختلف پایداری نانوسیالات مورد مرور قرار گرفته است.

۳-۲- روش‌های تهیه نانوسیالات

تهیه یک نانوسیال پایدار شرط لازم برای بهره بردن از خصوصیات انتقال حرارتی آن‌ها می‌باشد. از این رو ترکیبات مختلفی از نانوذرات چون: نانوذرات فلزی، اکسید، نیتريد، کاربرد فلزی و دیگر نافلزات با و بدون سورفکتانت پراکنده‌شده در سیالاتی چون آب، اتیلن گلیکول یا روغن در بسیاری از موارد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شرایط سکون، سرعت ته‌نشینی ذرات کروی کوچک در یک سیال از قانون استوکس پیروی می‌کند [۲۴]:

$$Velocity = \frac{2R^2}{9\mu}(\rho_p - \rho_L) \cdot g \quad (۱-۳)$$

در این رابطه $Velocity$ سرعت ته‌نشینی ذره، R شعاع ذره کروی، μ ویسکوزیته متوسط سیال، ρ_p و ρ_L به ترتیب چگالی متوسط ذره و سیال بوده و g شتاب گرانشی می‌باشد. این معادله تعادلی بین گرانش، نیروی شناوری و درگ ویسکوز که بر سوسپانسیون نانوذرات تاثیر می‌گذارد را نشان می‌دهد. بر طبق این معادله با کاهش شعاع نانوذره یا با افزایش لزجت سیال پایه و نیز با کاهش اختلاف چگالی بین نانوذره و سیال پایه می‌توان سرعت ته‌نشینی ذره را کاهش داد و این بدان معناست که می‌توان بهبودی در جهت پایدارسازی نانوسیال به وجود آورد. از رابطه کاملاً روشن است که چون سرعت ته‌نشینی با مربع شعاع نانوذره (R) در رابطه مستقیم است لذا با کاهش در شعاع تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای را می‌توان در پایدارسازی نانوسیال به وجود آورد. بر اساس یک تئوری در شیمی کلوییدی، هنگامی که اندازه ذره کاهش می‌یابد و به حد بحرانی $R_{critical}$ می‌رسد، هیچ ته‌نشینی در نتیجه حرکت بروانی نانوذرات (پخش) به وقوع نمی‌پیوندد. البته لازم به ذکر است که ذرات کوچک‌تر دارای انرژی سطحی بالاتری بوده و این موضوع خود منجر به افزایش احتمال تجمع نانوذرات می‌شود. بنابراین تهیه نانوسیال پایدار قویاً مرتبط با این موضوع است که از تجمع نانوذرات کوچک‌تر جلوگیری شود. با این تفاسیر دو روش مختلف برای ساخت و تهیه نانوسیالات وجود دارد: روش تهیه یک مرحله‌ای و روش تهیه دومرحله‌ای [۲۵].

۳-۲-۲- روش یک مرحله‌ای

در این روش تمام اقدامات لازم برای تهیه سوسپانسیون (سنتر نانوذرات و تهیه نانوسیال) در یک مرحله همزمان صورت می‌گیرد. در این روش نانوسیال از طریق رسوب مستقیم نانوذرات، به وسیله روش رسوب

فیزیکی بخار^۱ با استفاده از روش شیمیایی مایع^۲ (تراکم مستقیم پودرهای نانو از فاز بخار به داخل سیال جاری با فشار بخار کم) تهیه می‌شود [۲۶]. در این روش از مراحل چون خشک کردن، ذخیره‌سازی و پراکنده کردن نانوذرات پرهیز شده از این‌رو تجمع نانوذرات بسیار کاهش یافته و در نتیجه پایداری آن افزایش می‌یابد. از معایب این روش می‌توان به نا کارآمد بودن آن در تهیه نانوذرات در مقیاس بزرگ اشاره کرد که بخصوص برای مصارف صنعتی موردنیاز است و همچنین تنها برای آن دسته از نانوسیالاتی قابل اجراست که سیالات پایه‌ای آن دارای فشار بخار پایینی باشند. این معایب گستره استفاده از این روش را محدود می‌کند.

۳-۲-۳- روش دومرحله‌ای

در این روش ابتدا نانوذرات خشک تولیدشده سپس در یک سیال پایه‌ای مناسب پراکنده می‌گردد اما از آنجاکه نانوذرات دارای انرژی سطحی بالایی هستند، خوشه‌بندی و تجمع ذرات در کنار هم امری است اجتناب‌ناپذیر و به‌سادگی اتفاق می‌افتد. با این اتفاق ذرات کلوخه شده و ته‌نشینی به وقوع می‌پیوندد. از این‌رو تهیه کردن نانوسیالی پایدار به روش تکنیک دومرحله‌ای موضوعی چالش‌برانگیز هست. با این‌وجود روش‌ها و تکنیک‌هایی برای تخفیف دادن این مشکل چون برش شدید^۳ و فراصوتی^۴ بکار گرفته می‌شود. به‌طور کلی نانوسیالات شامل ذرات اکسید و کربن نانوتیوپ‌ها از این روش تهیه می‌شوند. این روش برای کار با نانوذرات اکسیدی بسیار مناسب بوده و بخصوص برای استفاده در صنعت به علت سادگی در تهیه آن بسیار جذاب است. اما از معایب آن می‌توان به توانایی بالای ذرات در تجمع کردن اشاره کرد. روش دومرحله‌ای برای کاربردها با غلظت ذرات بیشتر از ۲۰ درصد حجمی بسیار سودمند است اما در استفاده از نانوذرات فلزی کمتر مفید فایده بوده البته برخی روش‌های اصلاح سطحی وجود دارد که منجر به پراکندگی بسیار عالی می‌شود [۲۷].

1 physical vapor deposition (PVD) technique

2 liquid chemical method (condensing nanophase powders from the vapor phase directly into a flowing low-vapor-pressure fluid is called VEROS).

3 high shear

4 ultrasound

۳-۳- اهمیت پایداری نانوسیالات

تهیه کردن یک سوسپانسیون همگن و یکدست همچنان چالشی بزرگ پیش روی این حوزه است. در حقیقت نیروی قوی و اندروالسی همواره تمایل به ایجاد و شکل‌گیری تجمع نانوذرات در کنار هم و تشکیل یک کلاستر ذرات را دارد. برای جلوگیری از این موضوع و همچنین تهیه سوسپانسیونی پایدار از نانوسیالات چندین روش مورد استفاده قرار می‌گیرد که به‌طور کلی می‌توان این روش‌ها را در دودسته روش‌های فیزیکی یا شیمیایی دسته‌بندی کرد. این روش‌ها می‌توانند شامل اضافه کردن سورفکتانت، اصلاح سطح ذرات و اعمال نیروهای خارجی قدرتمندی برای شکستن کلاسترهای تشکیل‌شده باشد. پراکنده کردن عوامل فعال‌کننده سطحی^۱ برای اصلاح سطحی مواد آب‌گریز و ایجاد قابلیت پراکنده‌سازی در محلول‌های آبی مورد استفاده قرار گرفته است. در غیر این صورت خوشه‌بندی، تجمع و ته‌نشینی ذرات اتفاق خواهد افتاد. برخی از بررسی‌ها نشان می‌دهد خوشه‌ای شدن و تجمع ذرات یکی از علل کلیدی افزایش غیرعادی ضریب هدایت حرارتی است، اگرچه این تئوری ممکن است فقط برای نانوذرات با نسبت ابعادی بالا، مانند نانوتیوب‌های تک جداره، صادق باشد. در این بررسی‌ها ادعا شده است که نسبت ابعادی بالا خوشه‌های فراکتالی عامل اصلی عبور سریع حرارت از روی فواصل زیاد است. از این رو که جریان گرما این قابلیت را پیدا می‌کند که به‌سرعت در مسیرهای طولانی‌تری انتقال پیدا کند. همچنین بیان شده است، مخلوط‌هایی که به‌خوبی عمل پراکنده‌سازی در آن‌ها صورت گرفته افزایش رسانندگی گرمایی کمتری از خود نشان دادند [۲۸]. در نقطه مقابل، تئوری دیگری وجود دارد که نشان می‌دهد تجمع و خوشه‌بندی نانوذرات منجر به کاهش در پایداری نانوسیال و در نتیجه آن افت در رسانندگی گرمایی می‌شود. هنگ^۲ و همکاران [۲۹] ادعا کردند که نانوسیالات Fe که در معرض ارتعاشات التراسونیک (که منجر به شکسته شدن خوشه‌بندی‌های ذرات می‌شود) قرار گرفتند از رسانندگی گرمایی بیشتری برخوردار بودند و همچنین اینکه با گذشت زمان این افزایش صورت گرفته بعد از تهیه سوسپانسیون کاهش می‌یابد.

1 surface-active agents

2 Hong

با توجه به مطالب یادشده در خطوط گذشته برای دسته‌بندی تئوری پایداری نانوسیالات نیازمند پژوهش‌های آزمایشگاهی بیشتری خواهیم بود تا به روشنی از نقش تجمع و خوشه‌بندی ذرات در افزایش رسانندگی بتوان صحبت کرد. اما به‌طور کلی برای به دست آوردن یک سوسپانسیون باکیفیت بالا، ذرات بایستی از دو اصل پیش رو پیروی کنند :

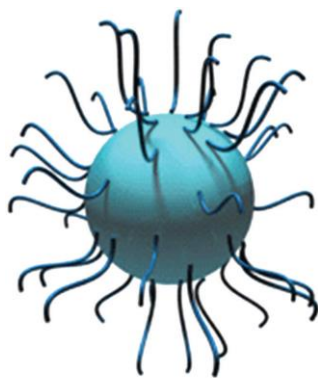
- ۱- اصل نفوذ^۱ : ذرات به‌وسیله واسطه مایع از هم جدا شوند و در آن نفوذ کنند.
 - ۲- اصل پتانسیل زتا^۲ (پتانسیل الکتریکی پیرامون ذرات در محلول): قدر مطلق پتانسیل زتا ذرات بایستی به‌اندازه ممکن و کافی بالا باشد که این موضوع منجر به ایجاد دافعه الکترواستاتیک ذرات خواهد شد.
- بر طبق مقالات و پژوهش‌های صورت گرفته در این حوزه سه شیوه موثر و عملی برای پایداری سازی نانوسیال و جلوگیری از ته‌نشینی ذرات آن مورد استفاده قرار گرفته می‌شود. برخی از پژوهش‌گران تمامی این راه‌کارها و برخی یکی یا دو مورد از آن را با توجه به نیاز خود بکار می‌گیرند. و البته قابل ذکر است که استاندارد وجود ندارد که بهترین نحوه ترکیب کردن را به‌طور کل معرفی کند و این موضوع هم به‌نوبه‌ی خود نیازمند تحقیق و بررسی بیشتر در آینده خواهد بود. روش‌ها به‌صورت زیر خلاصه‌شده‌اند:

۳-۳-۱ - افزودن سورفکتانت یا عامل فعال کننده

کلمه سورفکتانت^۳ مجموعه از کلمات " Surface active agent " می‌باشد. سورفکتانت‌ها معمولاً ترکیباتی آلی هستند که دارای گروه‌های هیدروفوبیک (دافع آب) که نقش دم و دنباله را دارد و گروه‌های هیدروفیلیک (جاذب آب) که نقش سر را دارد می‌باشند، بنابراین به‌تناسب ساختار مولکولی در حلال‌های آلی و آب حل می‌شوند و باعث کاهش کشش سطحی در فصل مشترک هوا- آب و یا روغن- آب می‌شوند. ساختار شیمیایی این مواد اغلب شامل یک مولکول نسبتاً طولانی با یک انتهای آب‌گریز و انتهای دیگر آب‌دوست می‌باشد.

1 diffusion principle
2 zeta potential principle
3 surfactant

قسمت آب‌گریز این مواد (یک دنباله هیدروکربنی طولانی) با رزین سازگار بوده و در جهت آن حرکت می‌کند درحالی‌که قسمت آب‌دوست به سمت بیرون جهت‌گیری نموده (به‌سمت فاز آب) و با احاطه نمودن رزین باعث سازگاری آن با آب می‌شود. درواقع سورفکتانت‌ها موادی هستند که می‌توانند انرژی سطحی را بین سطوح به میزان زیادی تغییر دهند خاصیت یک سورفکتانت ناشی از دو شخصیتی بودن ساختمان ملکولی آن است به این معنی که همزمان دارای گروه‌های آب‌دوست و آب‌گریز می‌باشند. این راه یکی از عمومی‌ترین روش‌های جلوگیری از ته‌نشینی نانوذرات می‌باشد. اضافه کردن سورفکتانت می‌تواند منجر به بهبود پایداری نانوذرات در سوسپانسیون‌های آبی شود. علت این امر آن است که با اضافه کردن این قبیل مواد به مخلوط سطوح آب‌گریز نانوذرات یا نانولوله‌ها اصلاح‌شده و تبدیل به سطوحی آب‌دوست می‌شوند و همچنین برای سیالات غیرآبی این عمل به‌صورت وارونه صورت می‌گیرد. با این عمل پتانسیل زتا به علت بار سطحی ذرات پراکنده‌شده در سیال پایه افزایش می‌یابد که این موضوع خود منجر به ایجاد نیروی دافعه الکترواستاتیک بین ذرات می‌شود [۲۴]. با این حال بایستی مراقب بود تا چه مقدار کافی از سورفکتانت اضافه شود چراکه مقدار ناکافی آن قادر به پوشش سطحی مناسبی نخواهد بود و لذا تعادلی بین نیروی دافعه الکترواستاتیک و جاذبه واندروالسی صورت نخواهد گرفت. شماتیک کارکرد سورفکتانت بر روی نانوذره در شکل (۱-۳) نشان داده شده است.



شکل (۱-۳) شماتیک کارکرد سورفکتانت بر روی نانوذره.

سورفکتانت های که در مقالات استفاده شده است عبارت‌اند از سدیم دو دسیل سولفونات^۱ (SDS)، سدیم دو دسیل بنزن سولفونات (SDBS)، نمک و اولئیک اسید^۲، ستیل تری متیل آمونیم برمید^۳ (CTAB)، دو دسیل تری متیل امونیم برمید^۴ و سدیم اوکتانات^۵ (SOCT)، هگزا دسیل تری متیل امونیم برمید^۶ (HCTAB)، پلی ونیل پیرولیدون^۷ (PVP). انتخاب سورفکتانت مناسب مهم‌ترین بخش از این مرحله است و سورفکتانت ها می‌توانند آنیونی، کاتیونی یا غیر آنیونی باشند [۲۴-۲۷].

عیب استفاده از سورفکتانت در کاربردهایی با دمای بالای 60 C است چراکه در این گستره دمایی اتصال بین سورفکتانت و نانوذرات می‌تواند آسیب ببیند. از این رو پایداری خود را از دست می‌دهند و در نتیجه ته‌نشینی نانوذرات اتفاق می‌افتد.

۳-۲-۳ - کنترل pH (اثر شیمیایی سطح)

پایداری یک نانوسیال محلول آبی به‌طور مستقیم به خصوصیات الکتروجنبشی^۸ آن بستگی دارد. به‌وسیله بالا بردن چگالی بار سطحی می‌توان نیروهای دافعه الکترواستاتیک قوی به وجود آورد که بتواند سوسپانسیون را به‌خوبی پایدار سازد. در پژوهشی آمده است که با اصلاح سطح به کمک یک اسید ساده یک سوسپانسیون از کربن نانوتیوپ پایداری خوبی در آب پیدا می‌کند. این موضوع به ماهیت آب‌گریزی به آب‌دوستی سطح نانوذره آن‌هم به دلیل تولید گروه‌های هیدروکسیلی بر می‌گردد. در واقع، در این نقطه ذرات بار الکتریکی سطحی خالصی ندارند. هنگامی که pH محلول از نقطه ایزوالکتریک^۹ (غلظت کنترل‌کننده پتانسیل یون‌ها است که در آن پتانسیل زتا صفر می‌باشد) فاصله می‌گیرد، چگالی بار سطحی ذرات و در نتیجه مقدار مطلق

۱ sodium dodecylsulfate

۲ salt and oleic acid

۳ cetyltrimethylammoniumbromide

4 dodecyl trimethylammonium bromide

5 sodium octanoate

6 hexadecyltrimethylammoniumbromide

7 polyvinylpyrrolidone

8 electrokinetic

9 Isoelectric point (IEP)

پتانسیل زتا افزایش می‌یابد، ذرات کلوئیدی پایداری بیشتری به دست می‌آورند و منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شوند. لازم به ذکر است که مقدار pH بهینه برای نانوذرات مختلف متفاوت است برای مثال برای نانوذرات آلومینا ۸ و برای نانوذرات مس و گرافیت ۵,۹ است [۲۴].

۳-۳-۳ - ارتعاش فراصوتی^۱ (آلتراسونیک)

تمامی روش‌های قبلی که اشاره شد در حقیقت به تغییر در خصوصیات و ویژگی‌های سطح نانوذرات پراکنده شده می‌پردازد. روش‌های آلتراسونیک، روش‌های قدرتمندی هستند که برای کمک به شکستن تجمع ذرات و جلوگیری از تجمع و در نتیجه ته‌نشینی نانوسیال بکار گرفته می‌شود. این روش از توانایی بالاتری برخوردار بوده و در میان پژوهشگران رایج است.

۳-۴-۳ - ابزارهای ارزیابی پایداری نانوسیالات

ابزارهای مختلف و روش‌های متفاوتی وجود دارد که به کمک آن‌ها بتوان میزان پایداری یک نانوسیال را بررسی کرد. از میان این روش‌ها می‌توان به مواردی چون :
روش اسپکتروفوتومتر^۲ ، پتانسیل زتا، عکس‌برداری، TEM^۳ و SEM^۴ ، پراکنش نوری و روش تعادل ته‌نشینی اشاره کرد. در ادامه به توضیح نحوه عملکرد هر یک از این روش‌های یادشده خواهیم پرداخت.

۳-۴-۳-۱ - روش اسپکتروفوتومتر

با توجه به اینکه پایداری نانوسیالات مسئله‌ای کلیدی در کاربردی شدن این شاخه از سیالات دارد اما

1 Ultrasonic

2 Ultra violet visible spectrophotometer

3 Transmission Electron Microscopy

4 Scanning Electron Microscope

همچنان مطالعات اندکی در این زمینه صورت گرفته شده است. روش اسپکتروفتومتر (طیف‌سنجی مریبی - فرابنفش)، روشی است که در جهت کمی سازی پایداری نانوسیال بکار گرفته می‌شود. یکی از برجسته‌ترین ویژگی‌های این روش قابلیت آن برای پیاده‌سازی بر روی تمامی سیالات پایه‌ای می‌باشد. در حالی که روش آنالیز پتانسیل زتا دارای محدودیت‌هایی برای ویسکوزیته سیال پایه است. طیف‌سنجی مریبی - فرابنفش از این حقیقت پیروی می‌کند که شدت نور عبوری از هر سیالی با توجه به تفاوتی که در مقدار و نحوه جذب و پخش کردن هر سیال وجود دارد تغییر می‌کند. در طول موج‌هایی در حدود ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر، روش طیف‌سنجی به اندازه‌گیری مقدار جذب نور توسط سیال پرداخته و جهت آنالیز تنوع پراکندگی در سیال نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مثال پایداری سوسپانسیون با اندازه‌گیری حجم ته‌نشینی در برابر زمان ته‌نشینی قابل اندازه‌گیری است. البته این روش برای نانوسیالات با غلظت بالای نانوذره و به‌طور خاص نانولوله‌های کربنی مناسب نیست چراکه این نوع نانوسیالات بسیار تاریک بوده و عکس‌العمل مناسبی در پراکندگی و مقدار ته‌نشینی نانوذرات از خود نشان نمی‌دهند.

۳-۴-۲ - آزمون پتانسیل زتا

پتانسیل زتا یکی از مهم‌ترین روش‌های صحت‌سنجی پایداری نانوسیالات از طریق بررسی رفتار الکتروفوریتیک آن می‌باشد. بر طبق تئوری پایداری‌سازی، نیروهای دافعه الکترواستاتیک هنگامی که پتانسیل زتا دارای مقدار قدر مطلق بزرگی باشد افزایش می‌یابد که در حقیقت همین موضوع منجر به پایداری خوبی برای یک سوسپانسیون خواهد شد. ارتباط بین پایداری نانوسیال و پتانسیل زتا با دفع متقابلی که بین ذرات باردار به وجود آمده افزایش می‌یابد. از این‌رو، ذرات با بار سطحی بالا تمایلی به تجمع و تشکیل خوشه‌های ذرات ندارند چراکه سطوح ذرات مانع از انجام آن می‌شوند. مقادیر قابل قبول پتانسیل زتا در جدول ۶ به صورت خلاصه آمده است. به‌طور کلی یک سوسپانسیون با قدر مطلق زتا بزرگ‌تر از 30 mV به نظر می‌رسد که دارای پایداری خوبی باشد. قابل ذکر است که روش اندازه‌گیری پتانسیل زتا جهت پایداری نانوسیال یکی از

روش‌های مرسوم و رایج میان پژوهشگران می‌باشد. در شکل (۲-۳) دسته‌بندی پایداری نانوسیال بر اساس مقادیر پتانسیل زتا نشان داده شده است.

Zeta potential and associated suspension stability

Z potential (absolute value [mv])	Stability
0	Little or no stability
15	Some stability but settling lightly
30	Moderate stability
45	Good stability, possible settling
60	Very good stability, little settling likely

شکل (۲-۳) دسته‌بندی پایداری نانوسیال بر اساس مقادیر پتانسیل زتا [۲۴].

۳-۴-۳- روش عکس برداری

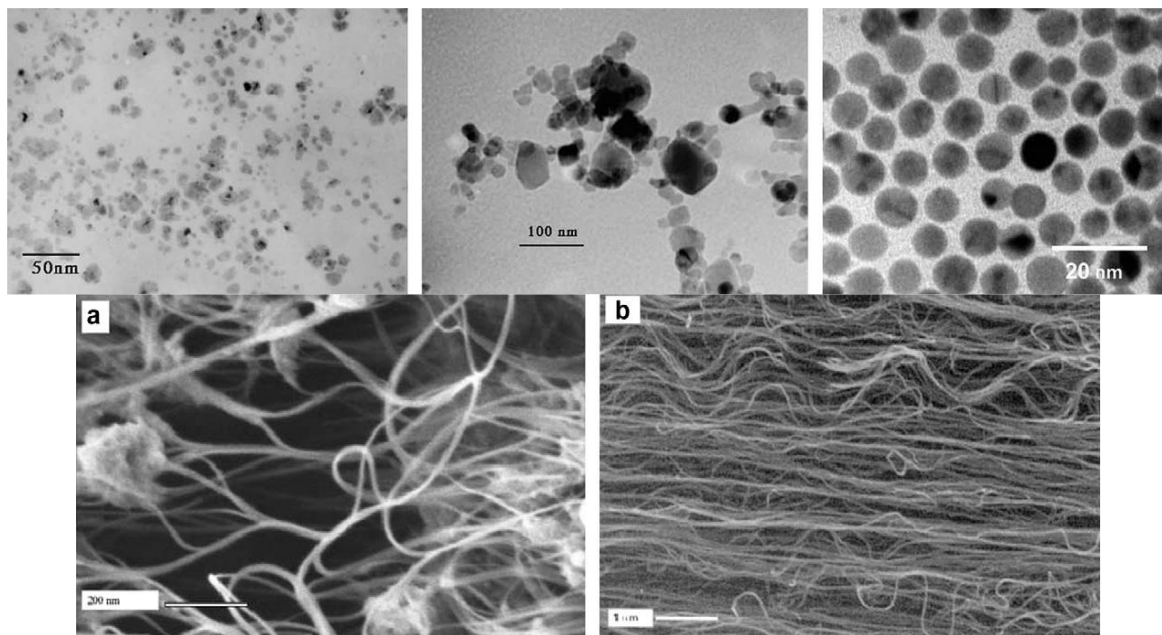
یکی از روش‌های ابتدایی بررسی پایداری نانوسیالات روش عکس برداری از آنان است. در این روش بعد از تهیه نانوسیال نمونه‌ای از آن کنار گذاشته می‌شود تا با عکس برداری از آن طی مدت زمان مشخص به بررسی ته نشینی نانوذرات پرداخت. با مقایسه کردن عکس‌های گرفته شده می‌توان پی به نحوه ته نشینی نانوذرات برد شکل (۳-۳).



شکل (۳-۳) بررسی پایداری نانوسیال اکسید آلومینیم با گذشت زمان به روش عکس برداری [۳۰].

۳-۴-۴ - SEM و TEM

عکس‌های TEM و SEM روشی بسیار کاربردی جهت تشخیص شکل، اندازه و نحوه توزیع ذرات می‌باشد. در این روش ابتدا نانوسیال پایدار تهیه شده سپس یک قطره از آن را بر روی نوار چسبی قرار می‌دهند و سپس با خشک کردن آن با پوشش دهی از جنس Au و Pd به عکس‌برداری از آن می‌پردازند. نمونه‌هایی از این عکس‌ها را در شکل (۳-۴) ملاحظه می‌فرمایید.



شکل (۳-۴) عکس‌های TEM و SEM نانوذرات مختلف

۳-۴-۵ - روش پراکنش نوری

تجزیه و تحلیل ذره مجرد برای مشخص کردن ساختار یک مولکول پلیمری در محلول‌ها یا ذرات کلوییدی در یک سوسپانسیون از طریق تئوری پراکنش نوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. شدت نور پراکنده شده برای یک ذره تنها متناسب با حجم آن ذره خواهد بود. البته که برهم‌کنش تابش الکترومغناطیسی با یک ذره کوچک در پراکنده کردن نور ضعیف است از این رو بخش غالب نور فرودی، عبور کرده و تنها جز کوچکی از نور پخش خواهد شد.

۳-۴-۶- روش تعادل تهنشینی

پایداری سوسپانسیون تشکیل شده از نانوذرات را می‌توان به روشی موسوم به تعادل تهنشینی اندازه‌گیری کرد. در این روش وزن نانو ذراتی که طی مدت‌زمان معینی تهنشین شده‌اند، اندازه‌گیری می‌شود. کسری با عنوان کسر سوسپانسیون (F_s) در زمان مشخصی به کمک فرمول $F_s = (W_0 - W)/W_0$ که در آن W_0 وزن کل تمام نانوذراتی است که در نمونه مورد آزمون وجود دارد و W وزن نانوذرات تهنشین شده در زمان معین است.

۳-۵- مجموعه‌ای از انواع نانوسیالات مورد مطالعه قرار گرفته شده در مقالات

از آنجاکه رسیدن به پایداری قابل قبول در تهیه نانوسیالات از جمله مهم‌ترین مسایل پیش روی این حوزه است و هم‌چنین نحوه پایدار کردن نانوذرات با توجه به نوع نانوذره و سیال پایه آن از نانوسیالی به نانوسیالی دیگر متفاوت است در این بخش مجموعه قابل ملاحظه‌ای از انواع نانوذرات پراکنده شده آورده شده است [۲۷]. در این مجموعه روش‌های گوناگونی که پژوهشگران جهت تهیه و پایداری سازی نانوسیال مورد مطالعه خود انجام دادند با دسته‌بندی بسیار خوبی گردآوری شده است.

۳-۶- نانوفروسیال

نانوسیالات مغناطیسی (نانوفروسیال‌ها) مخلوط کلوییدی شامل نانوذرات سوپراپارامگنتیک پراکنده شده در سیال حامل غیر قطبی بوده که گروه جدیدی از نانوسیالات را تشکیل می‌دهند. این شاخه از نانوسیالات ویژگی‌های سیال و شاخصه‌های مغناطیسی را همزمان از خود نشان می‌دهند. برای جلوگیری از تجمع (که براساس تقابل نیروی واندروالس و برهم کنش مغناطیسی بین ذرات بوجود می‌آید) سوسپانسیون نانوذرات

می‌تواند با لایه ای از یک سورفکتانت چون اولئیک اسید^۱، تترامتیل آمونیوم هیدروکسید^۲ و غیره پوشانده می‌شوند. گستره وسیعی از سیالات پایه مورد استفاده قرار گرفته و برخی نانوسیالات مغناطیسی بصورت تجاری برای استفاده در کاربردهای مختلف در دسترس است. هرچند انتخاب یک سیال پایه مناسب برای نانوسیال مغناطیسی جهت کاربردهای انتقال حرارتی نیازمند ملاحظاتی چون رسانندگی گرمایی بالا، ظرفیت گرمایی بالا و ... است اما بصورت تئوری بایستی قابلیت تهیه سوسپانسیون در هر مایعی وجود داشته باشد و بهبود مسایلی چون ویسکوزیته، کشش سطحی، دما، فشار بخار، پایداری در محیط‌های نامناسب و غیره صورت گیرد. سیالات انتقال حرارتی مرسوم (چون آب، انواع روغن‌ها، اتیلن گلیکول و غیره) می‌توانند اولین انتخاب برای کاربردهای پیش رو باشند. نانوذرات مغناطیسی بکار گرفته شده در نانوسیالات مغناطیسی در اندازه‌ها و خصوصیات متفاوتی از مواد فلزی (مواد فرومغناطیس) چون آهن، کبالت، نیکل و همچنین دیگر اکسیدها (مواد فری مغناطیس) چون آهن مغناطیسی (Fe_3O_4)، فریت‌های نوع اسپینل^۳ و غیره ساخته می‌شوند [۳۱].

نانوسیالات مغناطیسی بعنوان مواد با عملکردی پیشرفته برای قراردادن کلویید در بخش معینی از سیستم بوسیله نیروهای مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به این علت بخش عمده پژوهش شامل افزایش مغناطیس پذیری سیال، خصوصیت ویژه سطح آزاد نانوسیال مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خارجی و اثرات مگنتوویسکوز و مگنتورئولوژیک می‌باشد. بطور ویژه قابلیت تحریک و کنترل فرآیند انتقال حرارت و جریان سیال بوسیله میدان مغناطیسی خارجی پنجره‌ای نوید بخش را به روی طیف کاربردهایی که شامل ترموسیفون‌هایی با قابلیت کنترل مغناطیسی برای مقاصد فنی و تخصصی، افزایش انتقال حرارت برای خنک‌کنندگی ترانسفورماتورهای الکتریکی با توان بالا و بطور کل کنترل انتقال حرارت در فرایند تبدیل انرژی سیستم‌ها بصورت مغناطیسی فراهم می‌آورد. افزایش انتقال حرارت با استفاده از نانوسیال مغناطیسی در حضور میدان می‌تواند بعنوان تکنیک انتقال حرارت ترکیبی با افزودن نانوذرات و میدان خارجی برای افزایش

¹ oleic acid

² tetramethylammonium hydroxide

³ spinel-type ferrite

انتقال حرارت تقسیم بندی شود. در مقایسه با نانوسیالات رایج (نانوسیالات بدون خاصیت مغناطیسی) استفاده از نانوسیال مغناطیسی که در معرض میدان اعمالی خارجی برای افزایش انتقال حرارت قرار دارد دارای مزایای بالقوه ای چون قابلیت تنظیم خصوصیات ترموفیزیکی (رسانندگی گرمایی و ویسکوزیته) نانوسیال مغناطیسی با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی را همراه دارد [۳۲].

نانوذرات مغناطیسی از اکسید فلزی چون $\gamma - Fe_2O_3$, Fe_3O_4 و فریت های نوع اسپینل با فرمول MFe_2O_4 (with $M = Mn, Co, Zn, Ni, etc.$) اکثرا در نانوسیالات مغناطیسی بخاطر پایداری شیمیایی خود مورد استفاده قرار می گیرند. اکسید فلزی نانوذرات مغناطیسی عموما از طریق روش موسوم به رسوب شیمیایی تهیه می شوند [۲۷, ۳۱].

۳-۷- بررسی های آزمایشگاهی بر روی افزایش انتقال حرارت نانوفروسیالات

بررسی های تجربی بر روی بحث انتقال حرارتی نانوسیالات مغناطیسی بطور کل و رسانندگی گرمایی بطور خاص اکثرا در دمای اتاق و با متد های رایج برای نانوسیالات مرسوم (غیرمغناطیسی) صورت گرفته است. بررسی های تجربی بر روی رسانندگی گرمایی نانوسیالات مغناطیسی در غیاب میدان مغناطیسی نشان می دهد که افزایش رسانندگی گرمایی مشابه با دیگر نانوسیالات اساسا تاثیر پذیر از پارامترهای مختلفی چون کسر حجمی نانوذرات مغناطیسی، اندازه ذره/توزیع اندازه ذره، ترکیب شیمیایی نانوذرات مغناطیسی، دما، لایه پوشش دهنده ذره و ... است [۲۶, ۲۸-۳۱, ۳۳]. کارهای اخیر بر کنترل رسانندگی گرمایی نانوسیالات مغناطیسی توجه ویژه ای را به خود معطوف کرده است چراکه رسانندگی گرمایی غیر عادی تحت اعمال میدان خارجی مشاهده شده است. در حضور میدان مغناطیسی گذشته از پارامترهای یاد شده تاثیر گذار بر رسانندگی گرمایی نانوسیالات مغناطیسی بدون میدان مغناطیسی، رسانندگی گرمایی نانوسیالات مغناطیسی می تواند موثر از جهت و شدت میدان اعمالی خارجی نیز باشد [۳۲]. اندازه گیری های رسانندگی گرمایی در حضور میدان مغناطیسی معمولا در دمای اتاق و با استفاده از تکنیک های که در عدم حضور میدان نیز

استفاده می شد صورت گرفته است. میدان مغناطیسی هم به کمک الکترومگنت ها یا میدان های دائمی تولید می شدند.

لی^۱ و همکاران [۳۲]، اثرات قدرت و جهت میدان مغناطیسی خارجی بر روی نانوسیال مغناطیسی را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی مشخص شد که میدان خارجی تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی رسانندگی گرمایی و ویسکوزیته سیال به همراه دارد. حتی صرفنظر از قدرت میدان اعمالی و هم چنین کسر حجمی مورد استفاده تغییر قابل اندازه گیری با اعمال میدان مغناطیسی حتی عمود بر گرادیان دمایی یافته شد. نکته جالب اینجاست که با اعمال میدان موازی با گرادیان دما و افزایش قدرت میدانی رسانندگی گرمایی نانوسیال افزایش می یابد که البته دلیل این امر را به بوجود آمدن میکروساختارهایی نسبت می دهند که تحت تاثیر میدان بوجود می آیند. در حقیقت در این پژوهش به این نکته اشاره شده که میدان خارجی منجر به ایجاد مسیرهایی جهت انتقال سریعتر حرارت درون سیال می شود و بسیار روشن است که بطور قابل ملاحظه ای منجر به افزایش انتقال حرارت خواهد شد. رفتار ویسکوزیته نیز مشابه رسانندگی گرمایی بوده و با اعمال میدان خارجی افزایش یافته و این افزایش تا جایی ادامه می یابد که سیال به سطح اشباع مغناطیسی خود رسیده و از آنجا به بعد ثابت باقی خواهد ماند.

در پژوهشی دیگر لاجوردی^۲ و همکاران [۳۴]، به بررسی انتقال حرارت جابه جایی جریان نانوسیال مغناطیسی آرام و در حضور میدان خارجی درون یک لوله که با اعمال شار ثابت گرم می شود پرداختند. در این پژوهش هم اثرات قدرت میدان خارجی، موقعیت مگنت، غلظت نانو ذره بر انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفت.

قفرانی^۳ و همکاران [۳۵]، آزمایشی را جهت بررسی اثر میدان مغناطیسی متغیر بر مسئله انتقال حرارت جابه جایی اجباری نانوسیال مغناطیسی درون یک لوله طراحی کردند. در این پژوهش ضریب انتقال حرارت جابه جایی برای آب و نانو فروسیال تحت شرایط متنوعی از جمله میدان خارجی متغیر، کسر حجمی و عدد

¹ Li
² Lajvardi
³ Ghofrani

رینولدز اندازه گیری و مورد مقایسه قرار گرفت. گزارش کردند که با اعمال میدان مغناطیسی متغیر با فرکانس ۵۰ هرتز افزایش ۲۷,۶٪ در انتقال حرارت جابه جایی نانو فروسیال با رینولدز ۸۰ مشاهده شده است.

عزیزان^۱ و همکاران [۳۶]، نیز به بررسی اثر میدان اعمالی خارجی بر روی انتقال حرارت جابه جایی و افت فشار نانو فروسیال تحت رژیم جریانی آرام پرداختند. در این بررسی افت فشار در حدود ۷,۵٪ با اعمال میدان خارجی افزایش یافت این در حالی است که ضریب انتقال حرارت محلی نانو فروسیال افزایشی در حدود ۳۰۰٪ داشته است. گزارش شده است که بهبود انتقال حرارت تابعی از دبی جریان سیال و شدت و جهت میدان خارجی است.

۳-۸- اندازه گیری خصوصیات نانوسیالات

با افزودن نانوذرات به سیال میزبان بطور عمده چهار خصوصیت ترموفیزیکی و رئولوژیکی سیال تحت تاثیر قرار خواهد گرفت که از میان این خصوصیات می توان به رسانندگی گرمایی، ویسکوزیته، چگالی و گرمای ویژه اشاره کرد. البته اتفاق نظری میان پژوهشگران این حوزه وجود ندارد که اثر دقیق این افزودن بر روی پارامترهای سیال چگونه است. برای مثال از میان این خصوصیات یاد شده تنها گرمای ویژه است که کاهش یافته و سایر افزایش می یابند. این درصد افزایش نیز بعنوان تابعی از پراکندگی، غلظت حجمی، دما و سیال پایه عمل می کند. از آنجا که استاندارد برای تهیه نانو سیال وجود ندارد ما شاهد اختلاف و تغییرات متعددی در اطلاعات با گذشت زمان خواهیم بود. در ادامه نگاهی به تاثیر افزودن نانوذرات در پارامترهای سیال پایه خواهیم داشت.

¹ Azizian

۳-۸-۱- رسانندگی گرمایی

رسانندگی گرمایی مهمترین فاکتوری است که می تواند برای اثبات افزایش انتقال حرارت یک نانوسیال مورد بررسی قرار گیرد. با مرور و بازبینی مقالات موجود به این نکته دست میابیم که افزایش در مقدار رسانندگی گرمایی نانوسیالات زیاد است در این راستا تنها با افزودن درصد حجمی اندکی از ذرات جامد به افزایش چشمگیری در رسانندگی گرمایی دست خواهیم یافت. روش های مختلفی جهت توضیح و توجیه این افزایش عجیب در رسانندگی گرمایی تا بحال مطرح شده است که از میان آنها می توان به حرکت براونی، لایه بین وجهی و تجمع ذرات اشاره کرد که بطور گسترده ای راجب آنها بحث شده است. البته افزایش رسانندگی گرمایی را می توان به شکل و اندازه نانوذرات و هم چنین درصد حجمی آن نیز نسبت داد. آزمایشات نشان می دهند که رسانندگی گرمایی نانوسیالات به پارامترهای مختلفی از قبیل ترکیب شیمیایی ذرات جامد و سیال پایه، سورفکتانت ها، شکل و اندازه ذرات، غلظت ذرات و ... وابسته است البته همچنان روند تغییرات رسانندگی با این فاکتورها کاملا روشن نیست [۲۶، ۲۸-۳۱، ۳۳، ۳۶].

بصورت خلاصه، فهمیدن مکانیسم و نحوه تاثیر پذیری رسانندگی گرمایی موثر (k_{eff}) نانوسیالات همچنان در حال تحقیق و بررسی بیشتر توسط محققین است. اگرچه که مدلهای بسیاری برای پیش بینی رسانندگی گرمایی نانوسیالات مورد استفاده و توسعه قرار گرفته است، تمامی این مدل ها را می توان به دو دسته کلی چون زیر تقسیم بندی کرد :

۱- مدلهای استاتیکی چون ماکسول و همیلتون کروسر^۱ که در این مدلها نانوذرات در سیال پایه بی حرکت در نظر گرفته می شوند از این رو مدلهایی بر اساس هدایت حرارتی هستند که ویژگی ها و خصوصیات انتقال حرارتی را بررسی می کنند.

۲- مدلهای دینامیکی^۲ که در این مدلها نانوذرات دارای حرکت اختیاری می باشند. حرکت ذره در نتیجه انتقال انرژی بصورت مستقیم از طریق برخورد بین نانوذرات یا بصورت غیرمستقیم از طریق جابه جایی سیال

¹ Maxwell and Hamilton-Crosser

² dynamic models

که انتقال حرارت را افزایش می دهد در نظر گرفته می شود.

مدل ماکسول برای ذرات جامد از اندازه میکرو و میلی صحیح می باشد. این مدل با فرض ذرات جامد کروی شکل بدست آمده است.

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)\phi}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)\phi} k_b \quad (2-3)$$

که در این مدل k_p ضریب انتقال حرارت هدایتی ذره، k_b ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال پایه و ϕ جز حجمی ذره در سیال پایه می باشد. همچنین با فرض ذرات جامد غیرکروی همیلتون و کروسر مدلی برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی مخلوط جامد - مایع ارائه کردند. همانند مدل ماکسول، این مدل نیز برای ذرات جامد با اندازه میلی و میکرو صادق است. در حالتی که نسبت هدایت حرارتی جامد به مایع بزرگتر از ۱۰۰ باشد، می توان نوشت:

$$k_{eff} = \frac{k_p + (n-1)k_b - (n-1)(k_b - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_b - (k_b - k_p)\phi} k_b \quad (3-3)$$

در رابطه فوق n ضریب شکل تجربی است که $n = \frac{3}{D}$ و D کروی بودن ذره است و بصورت نسبت مساحت سطح کره ای هم حجم ذره به مساحت سطح ذره تعریف می شود. یک رابطه ساده پیشنهاد شده توسط وبر^۱ رسانندگی گرمایی سیالات را با دقت معمولاً ۱۵ درصدی نشان می دهد معادله بصورت زیر است [۲۴]:

$$k = 3.59 \times 10^{-9} C_p \rho \left(\frac{\rho}{M} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4-3)$$

این فرمول قبلاً برای محاسبه رسانندگی گرمایی نانوسیالات بصورت زیر توسعه داده شد:

¹ Weber

$$k_{nf} = 3.59 \times 10^{-9} C_{p,nf} \rho_{nf} \left(\frac{\rho_{nf}}{M_{nf}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5-3)$$

چنانچه نانوذرات بخوبی درون سیال پایه پراکنده شوند می توان خصوصیات ترموفیزیکی مخلوط سیال و ذرات را به کمک روابط ۳-۶ تا ۳-۸ تخمین زد. پارامترهایی با اندیس s متعلق به نانوذرات بوده درحالیکه بدون زیرنویس معرف سیال پایه هستند.

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho + \phi\rho_s \quad (6-3)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi)\rho C_p + \phi\rho_s C_{p,s} \quad (7-3)$$

$$M_{nf} = (1-\phi)M + \phi M_s \quad (8-3)$$

رسانندگی گرمایی موثر بصورت نسبت رسانندگی گرمایی نانوسیال به سیال پایه تعریف می شود. از این رو با استفاده از فرمول های ۳-۴ و ۳-۵ فرم بی بعد آن بصورت زیر داده شده است:

$$\frac{k_{nf}}{k} = \left(\frac{C_{p,nf}}{C_p} \right)^a \left(\frac{\rho_{nf}}{\rho} \right)^b \left(\frac{M}{M_{nf}} \right)^c \quad (9-3)$$

در این رابطه a, b, c و بایستی از آزمایشهای صورت گرفته استخراج شود و به ترتیب برابر با ۰,۰۲۳، ۰,۱۲۶ و ۱,۳۵۸ برای نانوسیال اکسید الومینیم - آب هستند [۲۴].

اندازه گیری رسانندگی گرمایی سیالات موضعی چالش برانگیز است و بطور کلی در این راه از قانون هدایت حرارتی فوریه برای اندازه گیری رسانندگی گرمایی بهره می برند. از جمله ابزارهای اندازه گیری رسانندگی می توان به روش سیم داغ گذرا^۱، روش سیم عایق شده^۲، روش liquid metal wire و روش 3w اشاره کرد.

¹ transient hot-wire

² insulated wire

۳-۸-۲- ویسکوزیته

ویسکوزیته دیگر فاکتور اساسی مورد بررسی در نانوسیالات است چرا که افت فشار در سیستم و در نتیجه آن توان پمپاژ به آن وابسته است. در برخی از پژوهش‌های صورت گرفته این موضوع مورد بررسی قرار گرفته است که می‌توان در صورت نیاز به منابع مورد نظر رجوع کرد.

مدلهای تحلیلی: در مورد نانوسیالات با پایه آب، جمع آوری داده‌های ویسکوزیته بایستی همراه با آب مقطر بطوریکه داده‌های اندازه‌گیری شده بایستی با روابط پیش رو مقایسه شود [۲۴]:

$$\mu_{bf} \times 10^4 = \exp \left[\frac{1.12646 - 0.039638 \times T}{1 - 0.00729769 \times T} \right] \quad (۱۰-۳)$$

که $T(K)$ دمای سیال بوده و μ بر حسب CP است.

تعداد محدودی فرمول تئوری برای تخمین ویسکوزیته نانوسیالات وجود دارد که می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. تقریباً تمامی یک چنین فرمول‌هایی از کار اصلی انیشتین^۱ در سال ۱۹۰۶ مشتق شده است.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\phi \quad (۱۱-۳)$$

مشخص شده است که فرمول فوق برای کسرهای حجمی ذرات کوچکتر از ۲٪ قابل استفاده است و فراتر از این مقدار تخمین قابل قبولی از ویسکوزیته موثر نخواهد داد. بعد از نشر این پژوهش انیشتین، محققان بسیاری در جهت اصلاح این فرمول کوشیدند و با این فرض که جریان سیال بسیار آهسته باشد، اثر لختی درون سیال قابل صرف‌نظر کردن است و کار خود را بر این اساس انجام دادند. دو فاکتور جهت نتایج بدست آمده از فرمول انیشتین غالباً بکار گرفته می‌شود: اولین فاکتور این است که ذرات می‌توانند کوچک نباشند و دیگر فاکتور این است که ساختار ذرات درون فاز پیوسته نیز می‌تواند بر ویسکوزیته مخلوط اثر

^۱ Einstein

بگذارد. نگاهی کوتاه بر کارهای مرتبط در زیر داده شده است. برای مثال بسط فرمول های انیشتین برای غلظت متوسط ذرات توسط برینکمن^۱ [۲۴]، بصورت زیر فرض شده است:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (۱۲-۳)$$

فرانکل و آکریوس^۲ [۲۴]، فرمول پیش رو را در نظر گرفتند:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{9}{8} \times \left[\frac{\left(\frac{\phi}{\phi_m}\right)^{\frac{1}{3}}}{1 - \left(\frac{\phi}{\phi_m}\right)^{\frac{1}{3}}} \right] \quad (۱۳-۳)$$

که ϕ_m مقدار آزمایشگاهی برای بالاترین کسر حجمی ذرات است. لاندگرن^۳ معادله جایگزینی را که براساس سری تیلور ϕ می باشد پیشنهاد کرده است [۲۴]:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\phi + \frac{25}{4}\phi^2 + 0(\phi^3) \quad (۱۴-۳)$$

کاملاً روشن است چنانچه عبارت با مرتبه دو و بالاتر آن نادیده گرفته شود ما به معادله انیشتین باز خواهیم گشت. گراهام^۴ فرمول پیش رو را در نظر گرفت این فرمول فرم بی بعد معادله فرانکل و آکریوس بوده که بسیار مشابه با مدلی است که انیشتین ارائه کرده است:

¹ Brinkman
² Frankel and Acrivos
³ Lundgren
⁴ Graham

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\phi + 4.5 \left[\frac{1}{\left(\frac{h}{d_p}\right) \times \left(2 + \frac{h}{d_p}\right) \times \left(1 + \frac{h}{d_p}\right)^2} \right] \quad (3-15)$$

که d_p ، قطر ذره و h فاصله بین ذره ای است.

در حقیقت و بطور عملی، هیچ کدام از مدل‌های یاد شده در بالا نمی تواند ویسکوزیته نانوسیالات را در گستره وسیعی از کسر حجمی ذرات توضیح دهد. از این رو در بسیاری از مقالاتی که در این زمینه بررسی هایی انجام دادند فرمولهایی متناسب با نوع نانوذره و البته متنوع با گستره کسر حجمی ذرات ارائه و بکار گرفته می شود.

۳-۸-۳ - چگالی و گرمای ویژه

خصوصیات مخلوط نانوسیالات عموماً با عبارت کسر حجمی ϕ بیان می شوند در حالیکه کار کردن با درصد جرمی (w) رواج بیشتری دارد. تبدیل بین کسر جرمی (w) و حجمی (ϕ) به کمک فرمول زیر و با استفاده از چگالی بصورت زیر ارائه می شود:

$$\phi = \frac{w \rho_f}{\rho_p (1-w) + w \rho_f} \quad (3-16)$$

در رابطه با گرمای ویژه بایستی به این نکته اشاره کرد که در میان دیگر خصوصیات ترموفیزیکی و رئولوژیکی نانوسیالات توجه بسیاری بدان شده است. گرمای ویژه نانوسیالات در معادلات انرژی وجود دارد و در نتیجه دانستن رابطه ای که بصورت دقیق قابلیت اندازه گیری آن را داشته باشد بسیار مهم است. غالب پژوهشگران یکی از دو رابطه ای که در معادلات ۳-۱۷ و ۳-۱۸ آمده است را بکار می گیرند. اولین مدل براساس کسر

حجمی است درحالیکه مدل دوم براساس مفهوم ظرفیت گرمایی است. مدل پک و چو^۱ [۲۴]:

$$c = (1 - \phi)c_{bf} + \phi c_p \quad (۱۷-۳)$$

و مدل روتزل^۲ [۲۴]:

$$c = \frac{(1 - \phi)(\rho c)_{bf} + \phi(\rho c)_p}{\rho} \quad (۱۸-۳)$$

که در این رابطه c ظرفیت گرمایی، ϕ کسر حجمی نانوذرات و ρ چگالی است. زیرنویس bf معرف خصوصیات سیال پایه و زیرنویس p معرف خصوصیات نانوذرات می‌باشد. کاملاً از معادلات بالا بدست می‌آید که با افزایش غلظت نانوذرات، گرمای ویژه کاهش می‌یابد.

¹ Pak and Cho

² Roetzel

فصل ۴:

سنتز نانو ذره Fe_3O_4 و تهیه نانو فروسیال

۴-۱- سنتز نانوذرات

در این بخش به معرفی فرآیندهای رایج در تولید نانوذرات پرداخته و در نهایت بطور خاص مراحل سنتز و تهیه نانوذرات Fe_3O_4 و هم چنین روش تهیه نانو فروسیال Fe_3O_4 - آب معرفی و تشریح خواهد شد. روش های بسیاری برای تولید نانوذرات توسعه یافته است. این روش ها را می توان به دو دسته فیزیکی و شیمیایی تقسیم بندی نمود. هر چند برخی از فرآیندهای تولید را می توان در دسته جداگانه ای تحت عنوان فرآیندهای مکانیکی - شیمیایی نیز جای داد. در یک دسته بندی دیگر روش های تولید نانوذرات را می توان به فرآیندهای حالت بخار، مایع و جامد نیز تقسیم بندی کرد [۳۷].

• چگالش از یک بخار

روش چگالش از یک بخار شامل تبخیر یک فلز جامد و سپس چگالش سریع آن، برای تشکیل خوشه های نانومتری است که به صورت پودر ته نشین می شوند. مهمترین مزیت این روش میزان کم آلودگی آن است. در نهایت اندازه ذره با تغییر پارامترهایی نظیر دما و محیط گاز و سرعت تبخیر کنترل می شود. روش تبخیر در خلاء بر روی مایعات روان^۱ جزء روش های چگالش از یک بخار محسوب می شود.

• سنتز شیمیایی

استفاده از روش سنتز شیمیایی شامل رشد نانوذرات در یک محیط مایع حاوی انواع واکنشگرها است. روش سل ژل^۲ یا رسوب شیمیایی^۳ نمونه چنین روشی است. در روش های شیمیایی اندازه نهایی ذره را می توان با توقف فرایند هنگامی که اندازه مطلوب به دست آمد یا با انتخاب مواد شیمیایی تشکیل دهنده ذرات پایدار و توقف رشد در یک اندازه خاص کنترل نمود. این روش ها معمولاً کم هزینه و پر حجم هستند، اما آلودگی

¹ Vacuum Evaporation on Running Liquids

² Sol Gel

³ Chemical precipitation

حاصل از مواد شیمیایی می تواند یک مشکل باشد.

• فرایندهای حالت جامد

از روش فرایندهای جامد (آسیاب یا پودر کردن) می توان برای ایجاد نانوذرات استفاده نمود. خواص نانوذرات حاصل تحت تاثیر نوع ماده آسیاب کننده، زمان آسیاب و محیط اتمسفری آن قرار می گیرد. از این روش می توان برای تولید نانوذرات از موادی استفاده نمود که در دو روش قبلی به آسانی تولید نمی شوند.

۴-۲- سنتز نانوذره Fe_3O_4 و تهیه نانوسیال Fe_3O_4 - آب

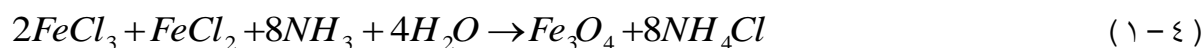
از آنجا که رسیدن به سطح پایداری حداقلی نانوسیال بکار گرفته شده، از جمله اساسی ترین ملزومات پیش رو در این پژوهش و البته دیگر پژوهش های مشابه است، لذا تلاش های بسیاری در این راستا با نانوذرات Fe_3O_4 خریداری شده صورت گرفت و در بهترین حالت ممکن نانوسیال ساخته شده تنها ۱۵ دقیقه پایدار بود. لازم به ذکر است که نانو ذره Fe_3O_4 بطور خاص و غالب نانوذرات اکسید آهن به علت بالا بودن چگالی آنها نسبت به دیگر نانوذرات براحتی ته نشین شده و به علت تمایل شدید این نوع ذرات به تشکیل کلاستر و خوشه بندی، ته نشینی نانو ذرات در سوسپانسیون اتفاق خواهد افتاد. از این رو سرانجام در این پژوهش، برای تهیه نانوسیال پایدار Fe_3O_4 - آب در ابتدا به تولید و ساخت این نانو ذره اکسید آهن اقدام شده است. در این بخش مراحل سنتز نانوذره Fe_3O_4 در ابتدا به تفصیل آورده می شود سپس اقدامات لازم جهت ساخت نانوسیال پایدار شرح داده خواهد شد.

متداول ترین روش تولید نانوذرات مغناطیسی (به ویژه مگنتیت^۱ و مگهمیت^۲) استفاده از روش های شیمیایی به ویژه روش همرسوبی است. در این روش، برای تهیه نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4) معمولا محلولهای دو ظرفیتی و سه ظرفیتی آهن همراه با یک عامل قلیایی مناسب (مانند سود یا آمونیاک) مخلوط شده و با

¹ Magnetite

² Maghemite

کنترل شرایط آزمایش، یک محصول مغناطیسی تیره رنگ آب دوست تولید می شود که شامل ذرات مگنتیت با بار الکتریکی منفی است و به یون های قلیا متصل می باشند. معمولا توزیع اندازه ذرات در این روش در محدوده کوچکی نیست، ولی با کنترل پارامترهای فرایند، می توان اندازه ذرات را در محدوده مناسب (مثلا ۵ تا ۱۴ نانومتر) کنترل کرد. این پارامترها غلظت جزء قلیایی، غلظت و نسبت یون های دو و سه ظرفیتی در محلول، دما، روش افزودن و مخلوط کردن اجزا واکنش و شدت هم زدن محلول است. دمای مناسب برای تولید، دمای اتاق است. از نظر جنس عامل قلیایی، سود سوز آور منجر به ذرات ریزتری نسبت به آمونیاک می شود و برای آن که مگنتیت هر چه ریزتر باشند، لازم است محلول به تدریج و با سرعت کم به ظرف محتوی محلول کلرید دو و سه ظرفیتی آهن اضافه شود و مخلوط حاصل با شدت مناسبی هم زده شود [۳۸، ۳۱]. واکنش شیمیایی شکل گیری Fe_3O_4 می تواند به شکل معادله زیر انجام گیرد :



انتظار می رود رسوب کامل Fe_3O_4 در pH بین ۸ و ۱۴ روی دهد. با این وجود، Fe_3O_4 پایداری زیادی ندارد و به اکسیژن حساس است. بنابراین مگنتیت Fe_3O_4 در حضور اکسیژن به مگهمیت $\gamma-Fe_2O_3$ تبدیل می شود. بنابراین مناسب است که واکنش ها تحت اتمسفر گاز محافظت کننده ی نیتروژن انجام گیرد. حباب های گازی نیتروژن در محلول نه تنها موجب جلوگیری از اکسیداسیون مگنتیت می گردد بلکه کاهش اندازه ذرات را نیز در پی دارد [۳۹، ۳۸].

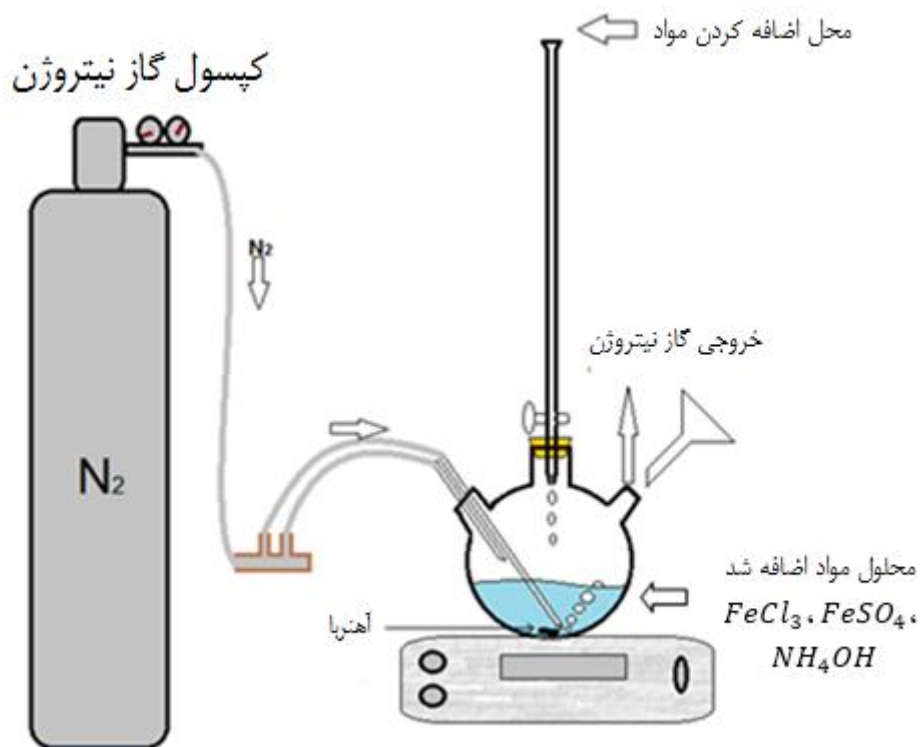
۴-۳- روش سنتز نانو ذره Fe_3O_4

همانطور که پیش از این در این فصل اشاره شد جهت تهیه نانوسیالات بطور کلی دو روش وجود دارد، روش تهیه یک مرحله ای و دو مرحله ای، در این پژوهش روش آماده سازی دو مرحله ای انتخاب شده است. همانطور که می دانیم در این روش می بایست ابتدا نانو ذرات سنتز شده و سپس به کمک روش هایی، آنها

را درون سیال پایه مورد نظر پراکنده کرد. روش سنتز رایج این قبیل نانوذرات با نام رسوب دهی شیمیایی شناخته می شود و در این پژوهش از این تکنیک بهره گرفته شده است. فرآیند سنتز نانو ذره Fe_3O_4 به شرح زیر می باشد: ابتدا بالون (یا ارلن) را بر روی مگنت استیرر^۱ تنظیم می کنیم (بهتر است هنگام تنظیم، بالون در حداقل فاصله ممکن قرار گیرد و اتصال کامل صورت نگیرد این موضوع جهت شکستگی بالون لحاظ شده است البته قابل ذکر است که می توان از حمام روغن یا آب نیز استفاده کرد). 200ml آب مقطر یا آب دیونیزه شده را در ظرف ریخته و جو نیتروژن بمدت حداقل ۱۵ دقیقه بر روی آن اعمال می شود. این جو جهت جلوگیری از واکنش محلول با اکسیژن بوجود آورده می شود. بعد از گذشت زمان مورد نظر ۲ گرم از سولفات آهن ($FeSO_4$) و ۵/۱۲ گرم از کلرید آهن ($FeCl_3$) به محلول مورد نظر اضافه می شود. با اضافه کردن مواد و بعثت گرماگیر بودن واکنش، دمای محلول کاهش می یابد. بایستی کاملا متوجه این موضوع بود و نگذاشت تا دما از محدوده مورد نظر دور شود. حال که دو نمک با یکدیگر ترکیب شدند نوبت به اضافه کردن آمونیاک می رسد. آمونیاک ۱/۵ مولار را بصورت قطره ای به محلول اضافه کرده و این کار آنقدر ادامه می یابد تا رنگ محلول کاملا سیاه شود. در حقیقت تغییر رنگ سیال به رنگ سیاه نشان دهنده تشکیل شدن نانوذرات Fe_3O_4 می باشد. البته اضافه کردن آمونیاک همچنان ادامه می یابد تا pH سیال در حدود ۸ قرار گیرد. اعمال جو نیتروژن و چرخش به محلول بمدت ۲ ساعت ادامه می یابد تا محلول خنک شده و به دمای محیط برسد. شکل ۱ شماتیک نحوه قرار گیری تجهیزات جهت سنتز نانو ذره و شکلهای ۴-۲ تا ۴-۸ عکس های گرفته شده از روند سنتز را نشان می دهند. در ادامه نانوذرات به کمک آهنربا از محلول جدا گشته و چندین بار با آب مقطر شسته می شوند تا عاری از دیگر ترکیبات ناخواسته چون آمونیاک شوند (شکل های ۴ و ۵). در نهایت نانوذرات در فشار اتمسفری و بصورت طبیعی خشک می شوند (شکل های ۶ تا ۸). حال نانوذرات Fe_3O_4 آماده است و نوبت به آماده سازی نانوسیال می رسد. در این مرحله با توجه به درصد جرمی مطلوب، مقدار مورد نظر نانوذره به کمک روش های یاد شده در سیال پایه که در اینجا آب است پراکنده

۱ Magnet stirrer

می‌شوند. در این پژوهش درصدهای جرمی ۱٪ و ۳٪ مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل (۱-۴) شماتیک نحوه قرار گیری تجهیزات جهت سنتز نانو ذره Fe_3O_4



شکل (۲-۴) محل سنتز نانو ذرات



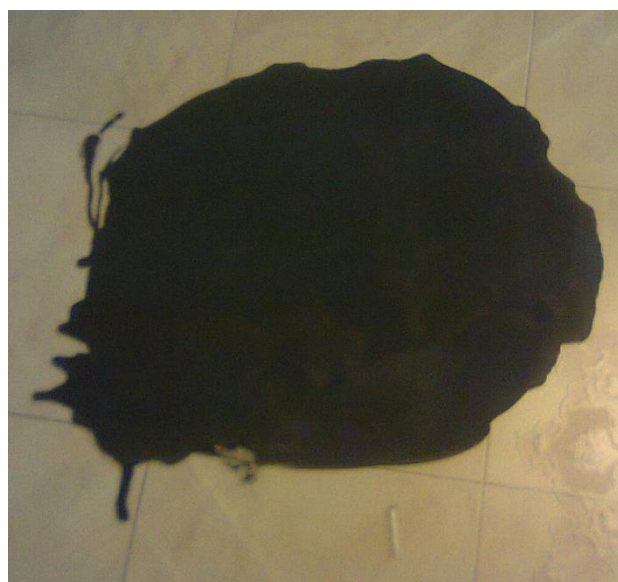
شکل (۳-۴) محل قرار گیری مواد شیمیایی خطرناک در آزمایشگاه



شکل (۴-۴) نانو ذرات سنتز شده به روش هم رسوبی



شکل (۴-۵) جمع آوری نانو ذرات سنتز شده و شستشوی آن



شکل (۴-۶) مرحله خشک کردن نانو ذرات سنتز شده



شکل (۷-۴) مرحله جمع آوری نانو ذرات خشک شده



شکل (۸-۴) نانو ذرات سنتز شده و آماده برای پراکنده کردن در سیال پایه

۴-۴- روش تهیه نانوسیال Fe_3O_4 - آب

اکنون و پس از سنتز نانوذرات که مراحل آن در قسمت پیشین توضیح داده شد، می توان نانوسیال مورد آزمایش را آماده کرد. همانطور که اشاره شد درصدهای جرمی مورد نظر در این آزمایش ۱٪ و ۳٪ جرمی می باشند. برای این منظور با توجه به مقدار سیال مورد استفاده و با توجه به درصد جرمی می بایست مقدار محاسبه شده نانو ذره را وزن کرد و سپس به سیال پایه که در اینجا آب می باشد اضافه نمود. پس از مخلوط کردن نانو ذره در سیال پایه آن را در دستگاه آلتراسونیک قرار می دهیم. لازم به یادآوری است، همانطور که در قسمت پایداری نانوسیالات اشاره شد جهت تهیه نانوسیالات پایدار عموماً از تکنیک هایی بهره گرفته می شود. ممکن است در یک آزمایش بنا بر تشخیص پژوهشگر یکی یا تمامی این تکنیک ها جهت پایداری نانوسیال تهیه شده بکار گرفته شود. شکل ۴-۹ نمونه ای از نانو فروسیال های ساخته شده را جهت بررسی مسئله پایداری آنها نشان می دهد. در این پژوهش با توجه به ارزیابی ها و نتایج بدست آمده از تهیه و پایداری نانوسیال Fe_3O_4 - آب، این نتیجه بدست آمد که استفاده از دستگاه آلتراسونیک به تنهایی جهت پایداری نانوسیال کافی نبوده و می بایست با اعمال تغییراتی دیگر به اصلاح رفتار نانو ذرات در سیال پایه پرداخت. با بررسی های صورت گرفته همانطور که بخشی از آن در جدول ۱ آمده جهت پایداری نانوسیال از تغییر pH سیال به کمک اسید استیک استفاده شده است.



شکل (۴-۹) نمونه ای از نانوفروسیال های ساخته شده و بررسی مسئله پایداری آنها

۴-۴-۱ - اثر اضافه کردن اسید در پایداری نانو سیال

با توجه به ماهیت نانو ذرات اکسید آهن و هم چنین چگالی بالای این ذرات در مقایسه با دیگر نانو ذرات، مسئله پایداری بسیار پیچیده بوده و نمی توان تنها با بهره گرفتن از یک روش ساده به پایداری قابل قبولی دست یافت. همانطور که از جدول (۴-۱)، (۴-۲) و (۴-۳) دیده می شود روش های گوناگونی جهت پایدارسازی نانوسیال بکار گرفته شد. سدیم دو دسیل سولفونات، کربوکسی متیل سلولز، دی متیل اکتون و تگزاپن از جمله دیگر موادی بودند که به سیال پایه اضافه شدند. هر کدام از این مواد با توجه به ماهیت شیمیایی خود هنگام ترکیب با نانوسیال رفتار ویژه ای از خود نشان می دهند که البته بعد از بررسی ها هیچ کدام در مقایسه با اسید استیک از کارایی مناسبی برخوردار نبودند.

اسید استیک یا اتانویک اسید، جوهر انگور یا جوهر سرکه جز اسیدهای آلی (از گروه کربوکسیلیک اسیدها) است. فرمول آن CH_3COOH است. این اسید یک اسید ضعیف بوده و بر اثر حل شدن در آب تعدادی از مولکول های آن پروتون اسیدی خود را به مولکول های آب داده و به سرعت به حالت تعادل می رسد. در

حقیقت هنگامی که نانوذرات اکسید فلزی در تماس با آب قرار می گیرند در سطح آنها هیدروکسیل های رادیکال (OH^-) بوجود می آیند. رفتار کلی و برهم کنش بین ذره و آب به این امر وابسته است که آب خاصیت اسیدی یا قلیایی داشته باشد. برای مثال سطح ذرات در آب اسیدی (که دارای یون های مازاد هیدروژن H^+ است) دارای بار مثبت بوده و در نتیجه یون های هیدروژن از آب اسیدی با هیدروکسیل های رادیکال روی سطح ذرات فلزی ترکیب می شوند. برای مثال معادلات (۲-۴) و (۳-۴) واکنش بین اسید سولفوریک و آب را بطور کلی نشان می دهند:



که M نشان دهنده فلز است. بطور خلاصه، ذرات فلزی خصوصیات خود را در حضور اسیدی قوی نشان می دهند. واکنش ترکیب با یون هیدروژن:



هر چند، در یک مقدار مشخص از pH، مخلوط به نقطه هم پتانسیل^۱ (تعادل) می رسد که در این نقطه تعداد یون های مثبت M^+OH_2 دقیقاً برابر با تعداد یون های با بار منفی هستند. به عبارت دیگر، اگر pH یک سیال با ذرات پراکنده شده نزدیک به نقطه تعادل باشد، تجمع ذرات به وقوع می پیوندد. نقطه تعادل کاملاً به نوع اکسید فلزی ذره وابسته است. در حقیقت در مقادیر pH اسیدی یک لایه دو برابر الکتریکی در سطح نانوذرات اکسید فلزی شکل می گیرد و در نتیجه این ذرات بعلت دافعه بین خود در سیال پایه پراکنده شده و تجمع می تشکیل نمی دهند.

¹ equipotential or equivalence point

در جداول ۱-۴، ۲-۴ و ۳-۴ نتایج استفاده از انواع سورفکتانت ها و دیگر مواد پایدار کننده برای نانو فروسیال با سه درصد جرمی مختلف نانوذره (۱٪، ۳٪ و ۵٪) آورده شده است. برای تمام نمونه ها، دستگاه حمام آلتراسونیک بر روی توان ۱۰۰٪ و دما ۵۰ درجه سانتی گراد تنظیم شده است. لازم به ذکر است وقتی دمای دستگاه بر روی ۵۰ درجه تنظیم می شود دستگاه بعد از گذشت یکساعت دما را حتی بالاتر از ۵۰ درجه نیز برده و برای مثال در پایان ۲ ساعت دما به ۷۵ درجه هم می رسد.

۵٪ جرمی نانو ذره

جدول (۱-۴) بررسی پایداری نانو فروسیال با ۵٪ جرمی نانو ذره در شرایط مختلف

ماده افزودنی	مقدار افزودنی	زمان قرار گیری در دستگاه	وضعیت پایداری	توضیح
-----		3h	ناپایدار	
اسید استیک	0.5ml	2h+30min	ناپایدار	بعد از دو ساعت در دستگاه قرار داشتن مقدار 0.5ml اسید اضافه شده و 30 دقیقه هم در دستگاه قرار داده شد
اسید استیک	0.5ml	2h+1h	ناپایدار	بعد از دو ساعت در دستگاه قرار داشتن مقدار 0.5ml اسید اضافه شده و ۱ ساعت هم در دستگاه قرار داده شد
اسید استیک	5%	1h	پایدار	تقریباً ۲ روز پایدار بود بعد از گذشت ۳ روز ته نشینی کاملاً با چشم قابل دیدن بود
سدیم دو دسیل سولفونات	1%	2h	ناپایدار	
کربوکسی متیل سلولز	1%	2h	ناپایدار	
دی متیل اکتون	1%	2h	ناپایدار	
تگزاین	1%	2h	ناپایدار	

۳٪ جرمی نانو ذره

جدول (۲-۴) بررسی پایداری نانو فروسیال با ۳٪ جرمی نانو ذره در شرایط مختلف

ماده افزودنی	مقدار افزودنی	زمان	وضعیت پایداری	توضیح
-----	----	1h	ناپایدار	
اسید استیک	0.18%	1h	ناپایدار	
اسید استیک	0.5%	30min	ناپایدار	تمامی نمونه ها تحت تست مگنت قرار داده شد و با بررسی انجام شده روشن شد که از لحاظ پایداری : 30min > 1h > (1.30 , 2h) یعنی نمونه 30min در مقایسه با دیگر نمونه ها تحت شرایط یکسان و شدت میدان مشابه دیرتر ته نشین شد.
اسید استیک	0.5%	1h	ناپایدار	
اسید استیک	0.5%	1.30	ناپایدار	
اسید استیک	0.5%	2h	ناپایدار	
اسید استیک	1%	1h	ناپایدار	
اسید استیک	1.5%	30min	پایدار	نمونه 30min در مدت ۲ روزی که نگه داشته شد وضعیت بسیار خوبی داشت و در مورد نمونه 1h می توان گفت صرفا یک روز از شرایط مناسبی برخوردار بود.
اسید استیک	1.5%	1h	ناپایدار	
اسید استیک	1.5%	1.30	ناپایدار	
اسید استیک	1.5%	2h	ناپایدار	
اسید استیک	3%	30min	پایدار	تمامی نمونه ها تحت تست مگنت قرار داده شد و با بررسی انجام شده روشن شد که از لحاظ پایداری : 30min > 1h > (1.30 , 2h) مشاهده شد که بعد از گذشت یک هفته نمونه 30min پایدار بود.
اسید استیک	3%	1h	پایدار	
اسید استیک	3%	1.30	ناپایدار	
اسید استیک	3%	2h	ناپایدار	

۱٪ جرمی نانو ذره

جدول (۳-۴) بررسی پایداری نانو فروسیال با ۱٪ جرمی نانو ذره در شرایط مختلف

ماده افزودنی	مقدار افزودنی	زمان	وضعیت پایداری	توضیح
-----	----	15min	ناپایدار	
-----	----	30min	ناپایدار	
-----	----	45min	ناپایدار	
-----	----	1h	ناپایدار	
اسید استیک	0.01%	1h	ناپایدار	
اسید استیک	0.05%	30min	ناپایدار	
اسید استیک	0.05%	1h	ناپایدار	
اسید استیک	0.05%	1.30	ناپایدار	
اسید استیک	0.05%	2h	ناپایدار	
اسید استیک	0.1%	30min	پایدار	در این مورد مشاهده شد که نمونه 1h و 1.30 پایدارتری داشته و دیگر موارد ته شین شدند. مورد ۳۰ برای چند ساعت پایدار بود.
اسید استیک	0.1%	1h	ناپایدار	
اسید استیک	0.1%	1.30	ناپایدار	
اسید استیک	0.1%	2h	ناپایدار	
اسید استیک	0.3%	30min	پایدار	تست مگنت برای همه نمونه ها صورت گرفت و ته نشینی برای هیچکدام بصورت جدایش فاز نبود صرفاً ۱،۳۰ و 2h کمی کم رنگ تر از 30min و 1h شدند. (30 min , 1h) > (1.30 , 2h)
اسید استیک	0.3%	1h	پایدار	
اسید استیک	0.3%	1.30	پایدار	
اسید استیک	0.3%	2h	پایدار	

۴-۴-۲ - بررسی اندازه ذرات مغناطیسی سنتز شده

به منظور تعیین اندازه ذرات سنتز شده و نحوه توزیع آنها از دستگاه تعیین اندازه ذرات بهره گرفته شد که اساس کار آن با اشعه لیزر است که بر اثر برخورد نور تکفام به ذرات پراکنده نمونه، پدیده ی تفرق روی می دهد. در نتیجه پرتو های پراشیده نوری وارد آشکار ساز می شوند و در آنجا به جریان تبدیل شده وسیگنالها به صورت دیجیتالی به رایانه منتقل و پردازش می شوند.

جهت آماده سازی نمونه، مقدار بسیار ناچیزی از نانو ذره به چند میلی لیتر آب مقطر افزوده شد و به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب تحت همزن فراصوت قرار گرفت. نتایج این آزمون در شکل های ۴-۱۱ تا ۴-۱۳ آمده است. همانطور که از نتایج بر می آید قطر متوسط نانوذرات بین ۴۰ تا ۵۰ نانومتر بوده است. (لازم به ذکر است که اندازه گیری سه ماه بعد از سنتز صورت گرفته است)

SOP

Name	Mr. Ghadiri	Operating mode	Continuous
-------------	-------------	-----------------------	------------

Dispersant / solvent properties		Particles refractive Index	
Refractive Index (nd)	: 1.33	Real Part	: 2.300
Viscosity	: 0.891	Imaginary Part	: 0.10

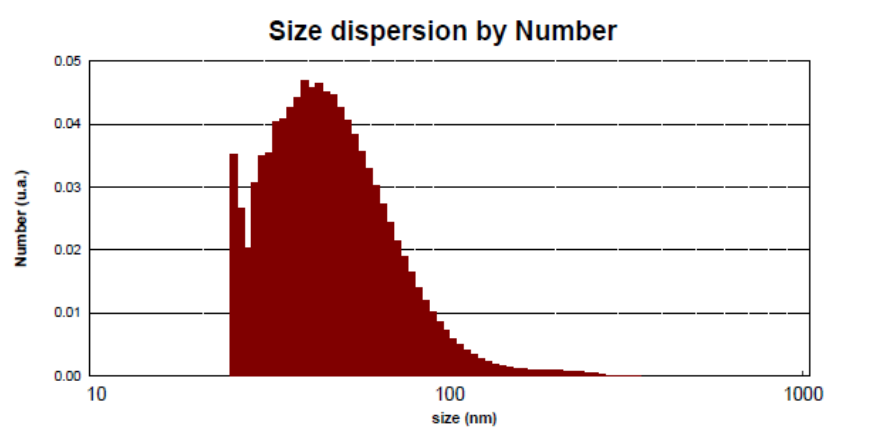
Device settings		SOP comment :
Time interval	: 10.000µs	Default Procedure
Number of channels	: 400	

Analysis mode	<input checked="" type="checkbox"/> Cumulants	Results	<input checked="" type="checkbox"/> Intensity
			<input checked="" type="checkbox"/> Volume
			<input checked="" type="checkbox"/> Number

Measure conditions		Duration	: 0h 0min 46s
Temperature	: 25.0°C	Laser power	: 50%
Acquisitions	: 0	DTC position	: DOWN
Average count rate	: 7 628.64 kcps	Wavelength	: 657.00

Cumulants method					
				Zaverage (nm):	124.67
Dv10:	46.79	Dv50:	102.36	Dv90:	245.54
				PDI:	0.1960
Dmean Intensity:	140.10	Dmean volume:	131.57	Dmean number:	50.41

شکل (۴-۱۱) نتایج دستگاه آنالیز اندازه ذرات



شکل (۴-۱۲) توزیع اندازه ذرات در نمونه آماده شده به روش تعداد

جدول (۴-۴) مقادیر عددی اندازه گیری شده توزیع ذرات به سه روش شدتی، حجمی و عددی توسط دستگاه آنالیز ابعاد نانو ذرات

Size (nm)	Intensity	Number	Volume
24.55	0.00	0.04	0.00
25.71	0.00	0.03	0.00
26.92	0.00	0.02	0.00
28.19	0.00	0.03	0.00
29.52	0.00	0.04	0.00
30.91	0.00	0.04	0.00
32.37	0.01	0.04	0.00
33.89	0.01	0.04	0.01
35.49	0.01	0.04	0.01
37.16	0.02	0.04	0.01
38.91	0.02	0.05	0.01
40.75	0.03	0.05	0.01
42.67	0.04	0.05	0.01
44.68	0.05	0.05	0.01
46.79	0.06	0.04	0.02
48.99	0.08	0.04	0.02
51.30	0.09	0.04	0.02
53.72	0.12	0.04	0.02
56.25	0.14	0.04	0.02
58.90	0.17	0.03	0.02
61.68	0.21	0.03	0.02
64.58	0.25	0.03	0.03
67.63	0.29	0.02	0.03
70.81	0.33	0.02	0.03
74.15	0.38	0.02	0.03
77.65	0.43	0.02	0.03
81.30	0.48	0.01	0.03
85.14	0.54	0.01	0.03
89.15	0.59	0.01	0.03
93.35	0.64	0.01	0.02
97.75	0.68	0.01	0.02

فصل ۵: انجام آزمایش

۵-۱- مقدمه

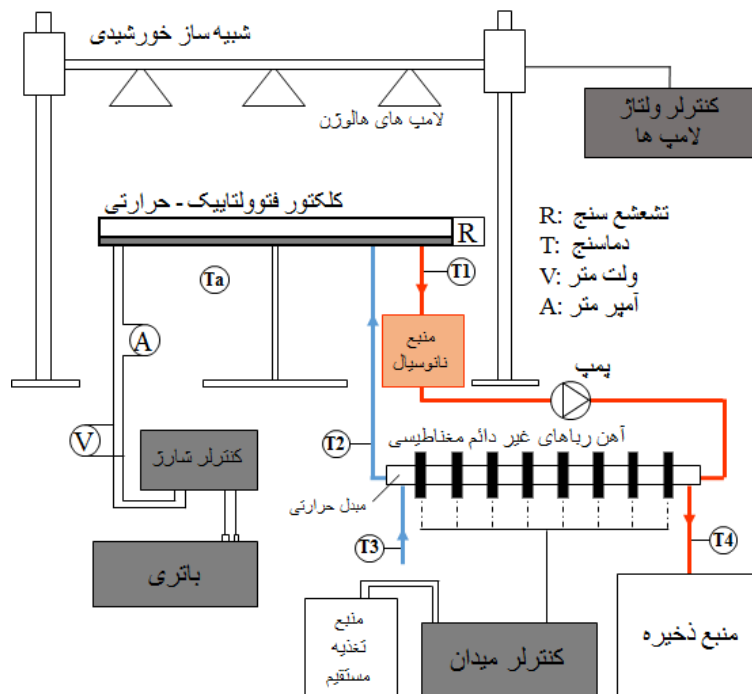
با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش های قبل پیش زمینه ی لازم جهت ساخت سیستم آزمایشگاهی فراهم گردیده است. ساختار سیستم آزمایشگاهی به سه بخش کلی مکانیکی، الکتریکی و شیمیایی تقسیم بندی می شود. از این میان بخش شیمیایی که مراحل سنتز و تهیه نانو فروسیال را شامل می شود در فصل پیشین توضیح داده شد لذا در این فصل به توضیح بخش های مکانیکی و الکتریکی این پژوهش خواهیم پرداخت.

اجزای مکانیکی شامل سازه ی نگهدارنده و قسمت انتقال حرارت شامل کلکتور جاذب حرارت و مبدل دو لوله ای می باشد. واحدهای فتوولتائیک، باتری ها، مدار کنترل شارژ و مصرف، مدار تولید میدان مغناطیسی متغیر و ثابت و شبیه ساز خورشیدی قسمت الکتریکی سیستم آزمایش را تشکیل می دهند که در ابتدای این فصل تشریح می شوند. به منظور صحت گذاری انجام آزمایش ها، محاسبات عدم قطعیت و خطاهای موجود در آزمایش نیز مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در شکل ۱ نمایی از سیستم مورد آزمایش نشان داده شده است. و در شکل ۲ شماتیک اجزای سیستم مورد آزمایش مشاهده می شود.

قسمت حرارتی، شامل دو مدار جریان از سیال می باشد. یک مدار جریان بسته، که سیال با عبور از کلکتور نقش خنک کننده ی صفحات فتوولتائیک را بر عهده دارد و یک مدار جریان باز آب شهر، حرارت را از سیال خنک کننده ی کلکتور، در مبدل دو لوله ای، جذب و آن را برای جریان مجدد خنک می سازد. آب شهر با جذب حرارت می تواند به عنوان یک ماده ی دارای انرژی، نظیر آب پیش گرم در صنایع یا مصارف خانگی مورد استفاده قرار می گیرد. در این آزمایش به منظور ثابت نگهداشتن و تنظیم دبی ها، از مخازن پیش ذخیره سیال به همراه پمپ جریان متناوب استفاده شده و همچنین کار پمپ ها در محاسبات وارد شده است. لازم به ذکر است این پروژه در ادامه ی پروژه ارشد آقای سردارآبادی [۱] و به سرپرستی جناب دکتر محمد پسندیده فرد در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. بخش هایی از سیستم مورد بررسی قبلا ساخته شده و بخش هایی دیگر به سیستم افزوده شده است که در ادامه هرکدام توضیح داده خواهد شد.



شکل (۱-۵) نمایی از سیستم آزمایشگاهی ساخته شده



شکل (۲-۵) شماتیک سیستم آزمایشگاهی ساخته شده

۵-۲- مشخصات فنی تجهیزات مورد استفاده:

جدول (۱-۵) مشخصات تجهیزات استفاده شده در ساخت سیستم آزمایشگاهی

مدار ایجاد میدان مغناطیسی		سلول خورشیدی (تحت شرایط تست استاندارد)	
میکروکنترلر AVR	کنترلر	تک کریستال سیلیکون	نوع
Atmega 32	مدل کنترلر	۶۲/۵×۱۲۵ mm	ابعاد سلول
فریت (پودر زینک)	نوع هسته عامل میدان	۰/۸۳	ضریب پوشش
شکل U	شکل هسته	۲/۵۷ A	جریان مدار کوتاه سلول
۸	تعداد هسته	۲۱/۶ V	ولتاژ مدار باز سلول
۳۰ V	ولتاژ اعمالی	٪۱۶	بازدهی سلول
۳۰ تا ۴۲۰ گوس	شدت میدان متناسب	۱۷/۶ V	ولتاژ ماکزیمم خروجی
تجهیزات اندازه گیری		۶۳۰×۵۴۰×۲۸ mm	ابعاد واحد فتوولتائیک
ترموکوپل تیپ K	سنسور دما	۳۶	تعداد سلول ها
TES-1333	تشعشع سنج	۱	ضریب پوشش کلکتور
UT71C/D/E	مولتی متر	٪۱۵	بازدهی واحد
سایر تجهیزات		۴۰ W	توان ماکزیمم نامی واحد
AC-220V-18W	پمپ آب	کلکتور صفحه تخت	
۷ mph-SLA	باتری	تیوپ در نوع صفحه ای	نوع کلکتور
۲/۵ لیتر	مخزن پیش ذخیره سیال	۰/۳ m ²	مساحت موثر هر کلکتور
Parsonic 7500S	دستگاه آلتراسونیک	تیوپ های مسی	جنس تیوپ
۰/۰۰۱	دقت ترازو دیجیتال	۰/۵ mm	ضخامت صفحه
۱۰ A	شارژ کنترلر	۸ mm	قطر داخلی لوله ها
		۱۰ mm	قطر خارجی لوله ها
		۳۰ mm	ضخامت عایق
		۳ mm	ضخامت شیشه بالای کلکتور
شبه ساز خورشیدی			
		تنگستن هالوزن	نوع لامپ
		۹	تعداد لامپ
		۵۰۰ W	توان ماکزیمم
		متناوب ۱۵۰۰ W	کنترلر ولتاژ

۳-۵- سازه نگهدارنده تجهیزات

مبنای طراحی و ساخت سازه نگهدارنده صفحات فتوولتاییک، براساس توانایی تحمل وزن صفحات (که یک نمونه از آنها شامل کلکتور و مبدل دو لوله نیز می شود) ، استقامت در شرایط محیطی مختلف (باد، رطوبت و ...) قابلیت تعویض صفحات فتوولتاییک و همچنین قابلیت تغییر زاویه در جهات مختلف بوده است. در این پژوهش از سازه نگهدارنده ساخته شده توسط سردارآبادی و همکاران [۴۰] استفاده شده است.

(شکل ۳-۵)



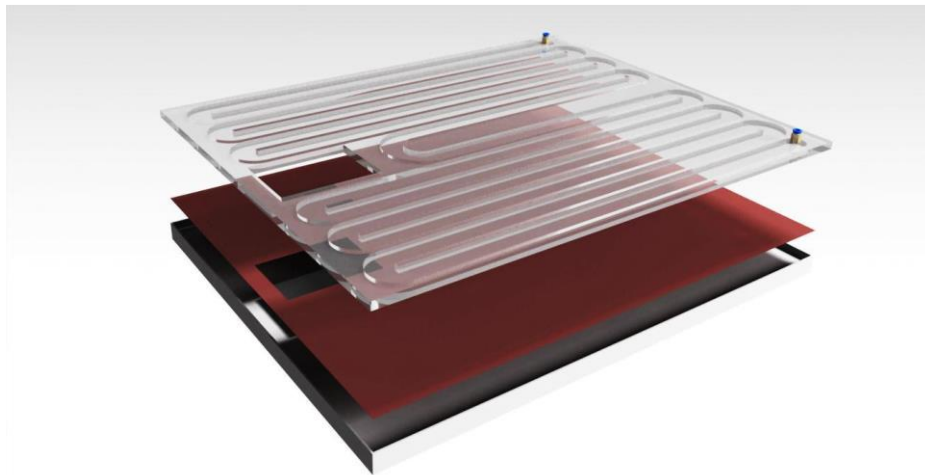
شکل (۳-۵) سازه نگهدارنده تجهیزات فتوولتاییک حرارتی

۴-۵- کلکتور واحد فتوولتاییک

در طراحی اولیه کلکتور، طرح های مختلفی از جمله کلکتور حرارتی صفحه ای، لوله ای و مقطع مستطیلی در پژوهش سردارآبادی [۱] انجام شده و مورد بررسی قرار گرفته است. دو نمونه از این طرح ها برای آزمایش در ادامه معرفی شده اند.

۵-۴-۱- جریان سیال در تماس مستقیم با صفحه فتوولتائیک

در این طرح مقطع کانال ها، مستطیلی و سطح واسطه ی مورد تماس با صفحه فتوولتائیک، صفحه مسی به ضخامت ۰/۵ میلی متر انتخاب شد. مسیر جریان از جنس شیشه های پلکسی و طرح کانال ها با برش لیزر ساخته شد (شکل ۴-۵). مشکل اصلی این طرح مسئله ی پایداری و آب بندی سازه در طولانی مدت و عدم استفاده به عنوان کاربرد گسترده در عمل بوده، زیرا دارای هزینه ی اولیه ی ساخت بالایی بود و همچنین با گرم شدن سیال نشتی را در پی داشت که مسئله ی بسیار مهمی به شمار می رفت. از این رو این طرح در انجام تست اولیه با آب مقطر، در پژوهش سردارآبادی [۱] کنار گذاشته شد.

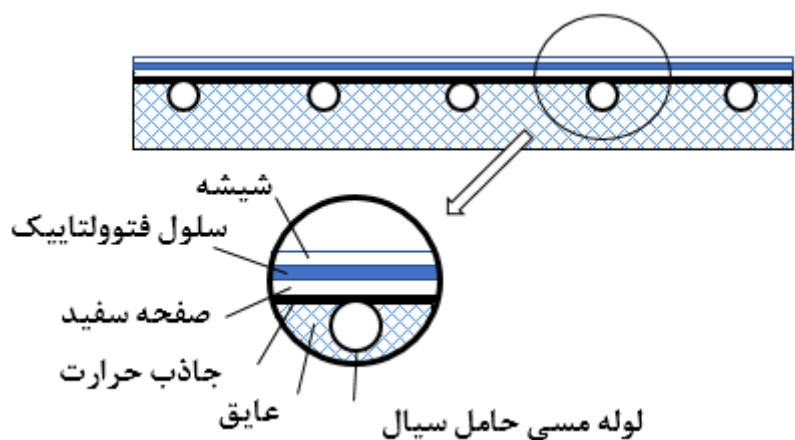


شکل (۴-۵) نمونه ساخته شده از جنس پلکسی به منظور هدایت سیال روی صفحه مسی متصل به پشت کلکتور

۵-۴-۲- جریان سیال در شبکه ی لوله ای

در طرح دوم به منظور ایجاد ساختاری که در عمل نیز بتواند مورد استفاده قرار گیرد و اشکالات طرح اول را برطرف سازد از شبکه ی لوله های مسی به منظور جمع آورنده ی حرارت تولیدی در واحد فتوولتائیک به کار رفته است. در این طرح لوله های مسی روی صفحه ی مسی به ضخامت ۰/۵ میلی متر با جوش نقره و مس (جوش گاز) متصل شده اند و فضای بین لوله و صفحه ی مسی و همچنین بین صفحه ی مسی و سلول های فتوولتائیک با چسب سیلیکون، جهت انتقال حداکثر حرارت ممکن از صفحه به سیال پر شده است

(شکل ۵-۵ و ۶-۵). در این پژوهش نیز از شبکه ساخته شده توسط سردارآبادی و همکاران [۴۰] استفاده شده است.



شکل (۵-۵) برش عرضی از کلکتور فتوولتائیک حرارتی



شکل (۶-۵) کلکتور لوله ای ساخته شده جهت اتصال به پشت صفحه فتوولتائیک

۵-۵- مبدل دو لوله ای

جهت ایجاد سیستم بسته برای سیال خنک کننده نیاز به استفاده از سیال واسطه است. این سیال با توجه به مسایل مختلف طراحی و همچنین نیاز مصرف کننده، می تواند گازی یا مایع باشد. در این آزمایش از آب

شهری برای خنک کردن سیال عامل استفاده شده است که به عنوان آب پیش گرم شده می تواند مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور می توان از طرح های مختلفی بهره برد، به عنوان مثال از کارهای انجام شده می توان به منبع تعبیه شده در مسیر سیال عامل نام برد که در اکثر کارهای آزمایشگاهی، این طرح به چشم می خورد. اما در این طرح مشکلات فراوانی از جمله تحمیل افت فشار به سیستم، مسئله عایق بندی منبع و انتقال حرارت با محیط در نتیجه افت کارایی شدید در فصول سرد سال، تبادل کم انتقال حرارت به دلیل هم دمایی در مسیر طی شده و عوامل متعدد دیگر نام برد. برای رفع قسمتی از مشکلات به وجود آمده از مبدل دو لوله ای با جریان مخالف تک گذر تعبیه شده در زیر واحد فتوولتائیک استفاده شده است. طراحی اولیه مبدل دو لوله براساس نتایج دمایی اولیه بدست آمده از شبیه سازی واحد فتوولتائیک و همچنین نتایج دمایی آزمایشگاهی سایر پژوهشگران صورت گرفته است. از محدودیت های طراحی برای مبدل ایجاد کمترین فضا و همچنین ایجاد حداقل افت فشار برای سیال خنک کننده واحد فتوولتائیک بوده است که می بایست در نظر گرفته شود. (شکل ۵-۷)

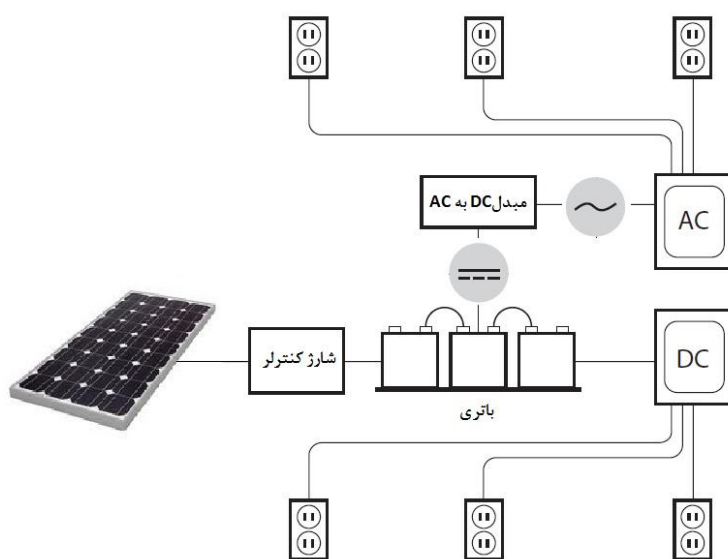


شکل (۵-۷) مبدل دو لوله ای استفاده شده در سیستم آزمایشی

در ورود و خروج از مبدل دو لوله برای سیال گرم (جریان سیال جاذب حرارت) و سیال سرد (جریان آب شهری) اندازه گیری های دما توسط سنسورهای دمایی ترموکوپل تیپ K دارای دقت ۰/۱ درجه سانتی گراد استفاده شده است.

۵-۶- سیستم الکتریکی آزمایش

صفحات فتوولتاییک به عنوان منبع تولید توان الکتریکی، نیاز به ایجاد مدارى جهت تبدیل تشعشع به جریان الکتریکی دارند. به این منظور تجهیزات مورد نیاز جهت ساخت مدار الکتریکی، تهیه و به سیستم اضافه شده است (شکل ۵-۸)، قابل ذکر است که در این آزمایش از تبدیل جریان مستقیم به متناوب به دلیل عدم نیاز، صرف نظر شده است.



شکل (۵-۸) شماتیک سیستم برق سیستم فتوولتاییک

۵-۷- صفحات فتوولتاییک

با مطالعه ی اولیه بر روی انواع سیستم های فتوولتاییک موجود در بازار و با در نظر گرفتن کاربرد، شرایط اقتصادی، شرایط اقلیمی، بازده الکتریکی، طول عمر مفید صفحات فتوولتاییک از نوع تک کریستال با خصوصیات ذکر شده در جدول ۱، انتخاب شده است. با توجه به اینکه سلول تک کریستال سیلیکونی از لحاظ الکتریکی نسبت به انواع دیگر دارای انرژی بالاتر، اما از لحاظ حرارتی انرژی کمتری تولید می کند. ولی به دلیل اینکه انرژی الکتریکی مطلوب است، این نوع سلول انتخاب شده است.

۵-۸- باتری

جهت ذخیره سازی توان تولیدی و همچنین تولید پیوسته توان توسط واحد فتوولتائیک و همچنین ایجاد شرایط ولتاژ و جریان ثابت برای مصرف کننده و مشابه سازی با شرایط واقعی از این واحد ها، نیاز به باتری مناسب است. به این منظور برای هر واحد فتوولتائیک یک باتری ذخیره سازی با ظرفیت ۷ آمپر ساعت، تهیه شده است. البته این ظرفیت در شرایط واقعی برای توان تولیدی این صفحات ظرفیت ایده آل به حساب نمی آید و با توجه به نوع، میزان و زمان نیاز برای مصرف کننده تعیین خواهد شد. برای آزمایش صورت گرفته به منظور استفاده از حداکثر توان تولیدی سلول ها، مصرف کننده با رسیدن شارژ باتری به حداکثر ظرفیت، وارد مدار جریان شده و شرایط ایده آل آزمایش را فراهم می سازد. به این ترتیب همواره سلول ها در حال تولید الکتریسیته می باشند.

۵-۹- شارژ کنترلر

با اتصال باتری به مدار سلول های فتوولتائیک، به دلیل محدودیت ظرفیت باتری و از طرف دیگر تولید پیوسته توان توسط سلول ها، با پر شدن باتری اضافه بار تحمیل شده به باتری، سبب از کار افتادن باتری خواهد شد. بنابراین نیاز به یک مدار فرمان اتوماتیک جهت اتصال سلول ها به باتری می باشد، این وظیفه به عهده شارژ کنترلر است. همچنین شارژ کنترلر، کنترل مصرف کننده را نیز بر عهده دارد، به این صورت که می توان زمانی که نیاز است مصرف کننده وارد مدار شود را توسط این مدار فرمان تنظیم کرد. بنابراین به مدار برق هر واحد فتوولتائیک یک شارژ کنترلر با مشخصات ذکر شده در جدول ۵-۱، اضافه شده است.

۵-۱۰- مصرف کننده

به دلیل اهمیت نداشتن نوع مصرف کننده در مدار سیستم مورد آزمایش و همچنین به منظور کاهش هزینه

ها، از تبدیل توان تولید شده توسط سلول ها به جریان متناوب صرف نظر شده است و لامپ های مقاومتری جریان مستقیم، به عنوان مصرف کننده انتخاب شده اند. مصرف کننده ها همواره توان مصرفی بیش از تولید دارند. بنابراین مشکلی در روند تولید الکتروسیسته ایجاد نمی کنند.

۵-۱۱- مدار ایجاد میدان مغناطیسی

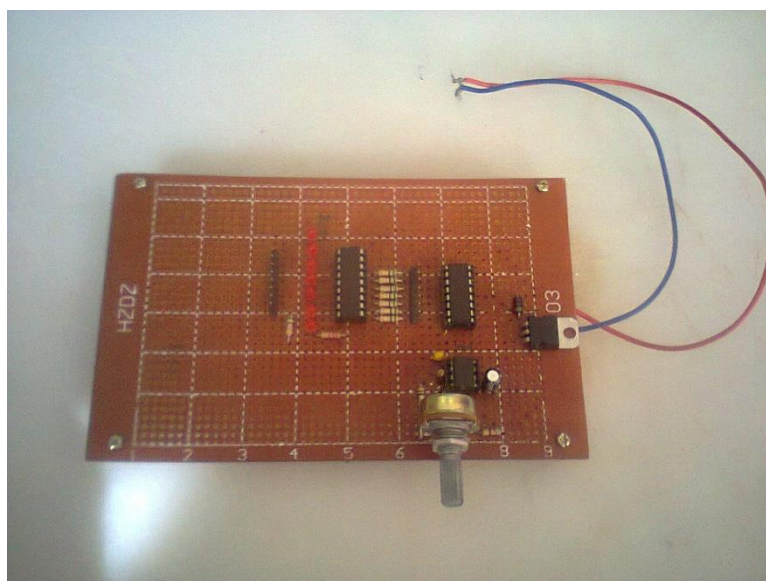
در این پژوهش بررسی قابل ملاحظه ای جهت روش و نحوه تولید میدان مغناطیسی متغیر و ثابت به عمل آمده است. در نهایت تصمیم گرفته شد تا مدار تولید کننده میدان مغناطیسی به کمک میکروکنترلرهای قابل برنامه ریزی چون AVR صورت گیرد علت این موضوع به اهمیت کیفیت میدان مغناطیسی تولید شده در این آزمایش مربوط می شود. از آنجا که مهمترین هدف در این پژوهش بررسی اثر میدان مغناطیسی بر بهبود پارامترهای موثر در بازده سیستم فتوولتائیک حرارتی می باشد. لذا ساخت مدار تولید می بایست دارای کیفیت و عملکرد قابل قبولی باشد تا در نتیجه آن مقادیر عددی بدست آمده در آزمایش از صحت و اعتبار قابل اعتمادی برخوردار باشند.

قبل از کار با میکروکنترلر جهت کسب اطمینان لازم برای عملکرد مورد نظر مدار نهایی با میکرو ابتدا مدار دیجیتالی بدون استفاده از میکروکنترلر و با کمک آی سی^۱ های دیگری ساخته شد. در این مدار از آی سی ۵۵۵ استفاده شده است. این آی سی منبع تولید کننده پالس مربعی مدار بوده و خروجی آن به آی سی دیگری به نام ۴۰۱۷ داده می شود. آی سی ۴۰۱۷ یک شیفت رجیستر^۲ است که با پیکربندی آن، هر یک از پایه های خروجی خود را با توجه به فرکانس ورودی به خود تنظیم می کند و یکی پس از دیگری پایه ها خروجی را خاموش و روشن می نماید. لازم به ذکر است آی سی هایی که تا کنون از آنها نام بردیم جریان گذردهی بسیار پایینی (در حدود چند میلی آمپر) دارند و بسیار روشن است که این جریان پایین به هیچ

۱ Integrated Circuit (IC)

۲ Shift register

وجه قابلیت راه اندازی بوبین (سلف) را نداشته بخصوص اگر لازم باشد ولتاژ کاری را بالا ببریم از این رو از آی سی ULN2803 استفاده شده است. این آی سی که معمولا برای درایو استپر موتورها^۱ بکار می رود کارایی عملیاتی در خور اطمینانی را با توجه به وجود کلید زنی بوبین ها و مسئله جریان القایی و مشتق جریان در لحظه ی قطع که باعث ایجاد ولتاژ قابل ملاحظه ای روی خروجی مدار قدرت می گردد ارایه می نماید در ادامه خروجی های پیکربندی شده به آی سی قدرت ULN2803 داده می شود. در انتها هم هر خروجی پس از موازی کردن با یک دیود به بوبین مربوطه می رسد. وجود دیود الزامی است چرا که طبق قانون لنز در فیزیک الکترومغناطیس شار میدان مغناطیسی ناشی از جریان القایی با تغییر شار پدید آمده از جریان القایی مخالفت می کند از این در صورت نبود دیود جریان برگشتی بخصوص در مد عملیاتی میدان متغیر بوجود می آید که فرای تحمل آی سی های واسط بوده و به آنها آسیب می رساند. (شکل ۵-۹)



شکل (۵-۹) مدار فرمان اولیه ساخته شده که یک مدار شیفت رجیستری است

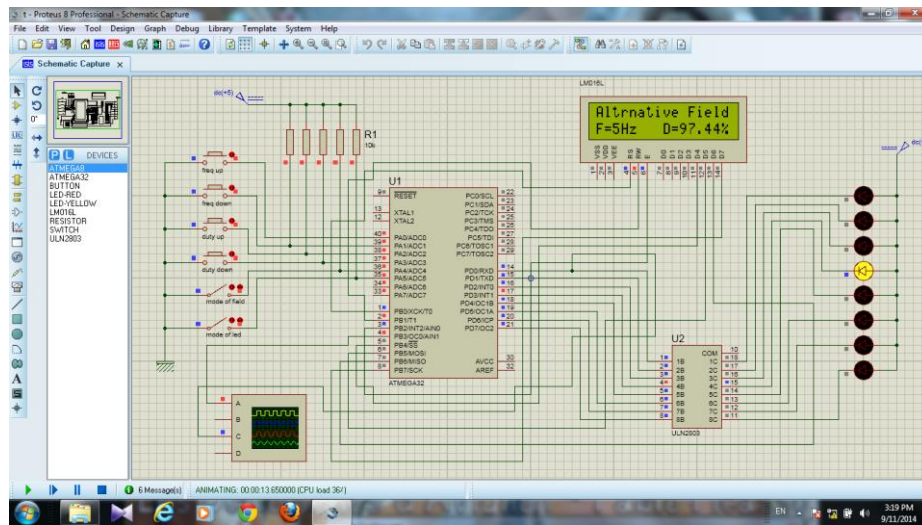
در مدار فوق پتانسیومتر با کنترل شارژ و دشارژ خازن متصل به ۵۵۵ فرکانس ورودی به ۴۰۱۷ را کنترل می کند. این مدار قابلیت اتصال به ولتاژ تا سقف ۵۰ ولت را داراست. در ورودی هم از رگولاتور ۷۸۰۵ برای

^۱ Stepper motors drive

ورودی تغذیه مدار استفاده شده است تا ولتاژ مستقیم مدار در سقف ۵ ولت بسیار صاف و تمیز بوجود آید. در این پژوهش هدف، ایجاد مدار کنترلی بود که به کمک آن بتوان هم زمان هم میدان مغناطیسی متغیر و هم میدان مغناطیسی ثابتی را بوجود آورد، علاوه بر این مدار کنترلی ساخته شده می بایست قابلیت کنترل پارامترهای عامل هر دو نوع میدان مغناطیسی را چون فرکانس، دیوتی سیکل (duty cycle)، شدت میدان مغناطیسی و هم چنین مد عملیاتی مگنت ها فراهم آورد. در مدار اولیه ساخته شده تمامی این قابلیت ها وجود ندارد و صرفاً می توان نوع خاص و محدودی از ملزومات فوق را بوجود آورد. از آنجا که تولید میدان مغناطیسی با حداکثر کیفیت و مانور در این پژوهش از اهمیت بالایی برخوردار است همانطور که قبلاً هم اشاره شد ساخت مدار دیگری به کمک میکروکنترلر قابل برنامه ریزی در دستور کار قرار داده شد. در این آزمایش از میکروکنترلرهای خانواده AVR استفاده شده است. AVR ها میکروکنترلرهای ۸ بیتی با توان مصرفی پایین هستند که براساس ساختار پیشرفته RISC ساخته شده اند. پس از ساخت اولین نسخه های AVR در سال ۱۹۹۶، این سری از میکروکنترلرها توانست نظر علاقه مندان الکترونیک را به خود جذب کند به طوری که امروزه یکی از پرمصرف ترین انواع میکروکنترلرها به حساب می آید.

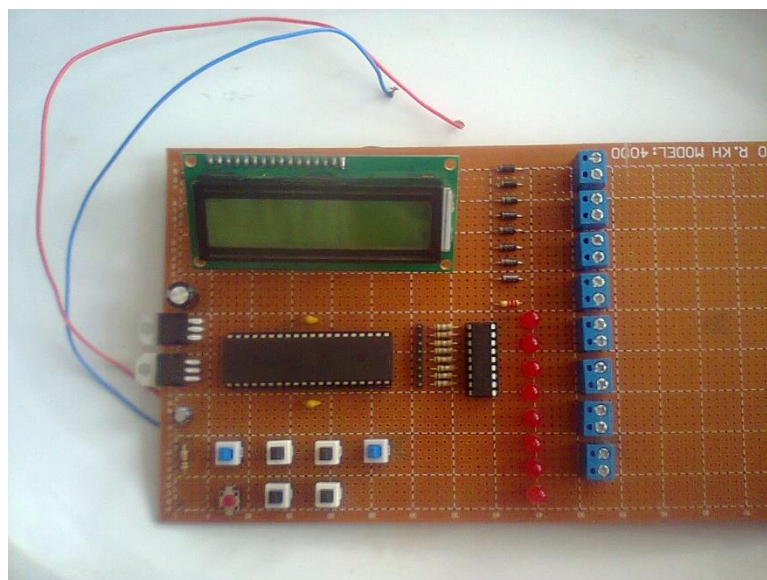
مدار دوم اطلاعات راجب مد عملیاتی اجرایی را بر روی یک LCD نمایش می دهد. این مدار بگونه ای طراحی شده است که بتوان هر دو نوع میدان مغناطیسی متغیر و ثابت را بوجود آورد. به کمک این مدار می توان شدت میدان مغناطیسی را کنترل کرد، می توان فرکانس میدان مغناطیسی متغیر را از ۵ تا ۱۰۰ هرتز تغییر داد، می توان دیوتی سیکل پالس خروجی را در بازه ۰ تا ۱۰۰٪ تغییر داد و هم چنین می توان مد عملیاتی مگنت های خروجی را بین دو حالت مشخص سوییچ کرد بطوریکه یکبار همه مگنت ها همزمان عمل کرده و در حالتی دیگر مطابق با فرکانس تعیین شده یکی پس از دیگری روشن و خاموش شوند.

کد برنامه میکروکنترلر به زبان C نوشته شده و قبل از ساخت مدار به کمک نرم افزار شبیه سازی پرتئوس تمامی اهداف مدار بررسی و اجرا شده اند (شکل ۵-۱۰).



شکل (۵-۱۰) شبیه سازی مدار کنترلی ایجاد میدان مغناطیسی در نرم افزار پرتئوس

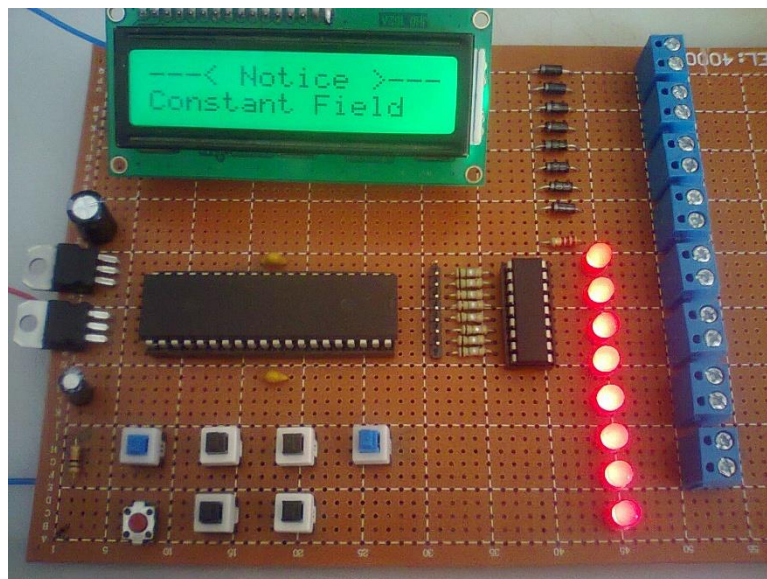
پس از بررسی های نرم افزاری و تایید عملکرد مدار نمونه ای از آن همانطور که در شکل های ۵-۱۱ تا ۵-۱۳ دیده می شود ساخته شد.



شکل (۵-۱۱) مدار میکروکنترلی تولید کننده میدان مغناطیسی متغیر و ثابت



شکل (۵-۱۲) مدار میکروکنترلی تولید کننده میدان مغناطیسی در مد متغیر با فرکانس ۵ هرتز



شکل (۵-۱۳) مدار میکروکنترلی تولید کننده میدان مغناطیسی در مد ثابت

همانطور که می دانیم هر سیم حامل جریان اطراف خودش میدان مغناطیسی بوجود می آورد و همین طور برعکس عامل مغناطیسی می تواند منجر به تولید جریان الکتریکی شود که این علم در قالب دانش

الکترومغناطیس شناخته می شود و با معادلات ماکسول تئوری آن بنا شده است. از دانش الکترومغناطیس می دانیم که هر سیم پیچی اطراف خود میدان مغناطیسی بوجود می آورد و این میدان با حضور هسته (معمولا از جنس آهن) بسیار بیشتر تقویت شده و قوی تر می شود. خروجی مدار مولد میدان مغناطیسی که در این آزمایش طراحی شده می بایست به سیم پیچ های مولد میدان با هسته های از جنس فریت فرستاده شود. فریت یک ترکیب شیمیایی از مواد سرامیکی با اکسید آهن هست که در سال ۱۹۳۰ و توسط دو دانشمند ژاپنی در موسسه تکنولوژی توکیو ژاپن اختراع شد. از فریت به خاطر نفوذ پذیری مغناطیسی بالا و همچنین هدایت الکتریکی خیلی کم بیشتر در ترانسفورماتورهای RF و همچنین به عنوان هسته برای سلف ها استفاده میکنند. هسته های فریت جنسی فرومغناطیس دارند که از جمله امکانات آنها این است که جریان گردابی در آنها ایجاد نمی شود و تلفات فوکر در آنها اتفاق نمی افتد چرا که تلفات فوکر موجب گرم شدن هسته شده و در نتیجه می تواند در ایجاد اشتباه در اندازه گیری خروجی موثر باشد ، تلفات فوکر با توان دوم فرکانس متناسب است و به دلیل اینکه کلید زنی در فرکانس های بالا صورت می گیرد اهمیت این نکته را نمایان می کند. مورد دیگر در این است که هیستریزیس این مواد بسیار کم است از این رو بجای استفاده از هسته های آهنی رایج از اینگونه هسته ها جهت تقویت میدان مغناطیسی اعمالی استفاده شده است. در شکل ۵-۱۴ این هسته را مشاهده می کنید.



شکل (۵-۱۴) هسته های فریت U شکل بکار گرفته شده جهت اعمال میدان مغناطیسی

با توجه به محاسبات انجام داده شده و جهت ایجاد شار مغناطیسی مناسب ۲۰۰۰ دور سیم لاکه شماره ۲۰ (۰/۲۰ میلی متر) استفاده شده است (شکل ۵-۱۵).



شکل (۵-۱۵) ب هسته فریت سیم پیچی شده جهت اعمال میدان مغناطیسی

۸ عدد از این مگنت ها به فاصله مساوی در قسمت مبدل دو لوله سیستم آزمایش قرار داده شد. مجموعه مدار و مگنت ها توانایی ایجاد میدان مغناطیسی ۴۶۰ گوس در هر آهنربا را با اعمال ولتاژ ورودی ۳۰ ولت دارد ولی بعلت وجود فاصله از مگنت، لوله مسی و دیگر موانع بر راه این میدان اندازه آن در داخل مبدل برابر ۳۰۰ گوس می باشد میدان های مغناطیسی ذکر شده توسط یک دستگاه گاوسمتر اندازه گیری شد. (البته این سیستم توانایی این را دارد که با افزایش ولتاژ ورودی نیز به مقادیر گوسی بالاتری از میدان مغناطیسی دست یابد).

۵-۱۲- شبیه ساز خورشیدی

جهت حذف پارامترهای محیطی تاثیر گذار بر آزمایش و حصول دقت قابل قبول، شبیه ساز خورشیدی برای شبیه سازی تابش خورشیدی طراحی و ساخته شد. برای ساخت این شبیه ساز از ۹ عدد لامپ هالوژن ۵۰۰ وات (شکل ۱۷) تنگستن استفاده شده است. این لامپ ها در آرایشی بصورت ماتریس ۳×۳ قرار داده شده و علاوه بر این جهت ایجاد تابشی یکنواخت، به کمک کنترلر ولتاژ تابش هر کدام از لامپ ها در مقداری

مشخص قرار داده شده است. این شبیه ساز قابلیت برقراری شدت تابشی بین 100 W/m^2 تا 2000 W/m^2 را دارد. تابش فرودی به کمک تابش سنج خورشیدی (TES/1333, Taiwan) با دقت 0.1 وات بر متر مربع اندازه گیری می شود.



شکل (۵-۱۶) لامپ تنگستن هالوژن ۵۰۰ وات

ولتاژ و جریان در این آزمایش توسط مولتی متر مدل UT71C/D/E با دقت 0.1 ولت (آمپر) اندازه گیری و ثبت شده است.

۵-۱۳- محاسبات آماری، خطاها و عدم قطعیت^۱

به منظور محاسبه ی عدم قطعیت ها و خطاهای احتمالی [۴۱]، در آزمایش ها انجام شده، سه روز از دوره انجام آزمایش ها به صورت تصادفی انتخاب و محاسبات عدم قطعیت برای تمامی پارامترهای اندازه گیری شده، انجام شده است. به منظور انجام محاسبات عدم قطعیت، مروری بر روابط آماری مورد استفاده در محاسبات به شرح زیر انجام می شود.

میانگین حسابی (\bar{X}):

¹ uncertainty

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (۱-۵)$$

انحراف از میانگین (d): انحراف از میانگین برای هر داده از رابطه ی ۵-۲، بدست می آید و برای سری داده های آزمایشگاهی مجموع کل آن ها مساوی صفر می باشد:

$$\sum_{i=1}^n d_i = 0, \quad d_i = X_i - \bar{X} \quad (۲-۵)$$

انحراف میانگین (D):

$$D = \frac{|d_1| + |d_2| + \dots + |d_n|}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{|d_i|}{n} \quad (۳-۵)$$

انحراف معیار استاندارد:

برای محاسبه ی انحراف معیار استاندارد با توجه به اینکه تعداد داده ها در هر دوره آزمایش کمتر از ۲۰ می باشد خواهیم داشت:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}} \quad (۴-۵)$$

خطای محتمل خوانده: با توجه به محدود بودن داده های اندازه گیری شده، خطای محتمل یک داده از رابطه ی ۵-۵، محاسبه می شود این مقدار برای اطمینان ۵۰٪ از اینکه جواب آزمایش بعدی در این محدوده باشد.

$$PE_1 = 0.6745 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}} = 0.6745 \times S \quad (۵-۵)$$

خطای محتمل متوسط:

با توجه به رابطه ی خطای محتمل متوسط برای یک خواننده خواهیم داشت (اطمینان ۰.۵۰٪)

$$PE_{ave} = \frac{PE_1}{\sqrt{n}} \quad (6-5)$$

عدم قطعیت استاندارد در اثر تکرار آزمایش :

به دلیل محتمل بودن خطا اندازه گیری در انجام آزمایش ها، تلاش شده است تا شرایط محیطی برای انجام آزمایش متفاوت نباشد. از این رو می توان با محاسبه ی عدم قطعیت در اثر تکرار، به میزان صحت گزارش ها از لحاظ قابلیت تکرار پذیری دست یافت. رابطه ی ۵-۷، برای محاسبه عدم قطعیت استاندارد در اثر تکرار ارایه شده است.

$$u_{st} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (7-5)$$

عدم قطعیت در اثر تجهیزات اندازه گیری :

با فرض تغییرات اندک در دقت اندازه گیری تجهیزات در دوره ی انجام آزمایش از توزیع مستطیلی که توسط رابطه ی ۵-۸، بیان می شود، جهت محاسبه عدم قطعیت تجهیزات اندازه گیری استفاده می کنیم.

$$u_{tools} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (8-5)$$

در این رابطه a برابر نصف دقت اندازه گیری دستگاه می باشد.

عدم قطعیت کلی هر یک از پارامترها :

حال با استفاده از عدم قطعیت ابزار و تکرار برای هر یک از پارامترها با استفاده از رابطه ی ۵-۹، عدم قطعیت کلی هر یک از پارامترها را محاسبه می شود.

$$u_{total} = \sqrt{u_{tools}^2 + u_{repetition}^2} \quad (9-5)$$

عدم قطعیت ترکیبی استاندارد :

عدم قطعیت ترکیبی، می تواند با مدلی که توسط کلین و مک کلینتک^۱ ارایه شده است، محاسبه شود. این مدل بیان می کند که اگر R ، یک تابع خطی از n متغیر غیر وابسته که با v_i شناخته می شوند، باشد یعنی $R = R(v_1, v_2, v_3, \dots, v_n)$ ، عدم قطعیت R یعنی δR ، وابسته به عدم قطعیت هر متغیر i یعنی δv_i ، با معادله ی ۱۰، که به عنوان معادله ی توان دوم شناخته می شود، می باشد.

$$\delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial v_1} \delta v_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial v_2} \delta v_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial v_n} \delta v_n\right)^2} \quad (10-5)$$

۵-۱۴ - مقادیر اندازه گیری شده و نتایج محاسبات

قسمتی از داده های ثبت شده در سه روز از انجام آزمایش جهت استفاده در محاسبات تحلیل عدم قطعیت در جداول زیر آمده است. توضیحات روش محاسبه در ادامه آورده خواهد شد.

جدول (۲-۵) داده های واحد فتوولتائیک بدون کلکتور در تکرار اول آزمایش

زمان	T_{amb}	V_{oc}	I_{sc}
۱۵ دقیقه	۲۸,۴	۱۶,۳	۱,۷۱
۳۰ دقیقه	۲۹,۶	۱۵,۶۳	۱,۷۶
۴۵ دقیقه	۲۹,۵	۱۵,۳۳	۱,۷۹
۱ ساعت	۳۰,۴	۱۵,۲۵	۱,۷۹
۱ ساعت و ۱۵ دقیقه	۳۰,۹	۱۵,۲۵	۱,۸

¹ Kline and McClintock (1953)

جدول (۳-۵) داده‌های واحد فتوولتائیک بدون کلکتور در تکرار دوم آزمایش

زمان	T_{amb}	V_{oc}	I_{sc}
۱۵ دقیقه	۲۸,۲	۱۶,۵	۱,۷۳
۳۰ دقیقه	۲۹,۷	۱۵,۶	۱,۷۶
۴۵ دقیقه	۳۰,۲	۱۵,۳	۱,۷۸
۱ ساعت	۳۰,۵	۱۵,۱۹	۱,۸۲
۱ ساعت و ۱۵ دقیقه	۳۰,۷	۱۵,۲۱	۱,۸۳

جدول (۴-۵) داده‌های واحد فتوولتائیک بدون کلکتور در تکرار سوم آزمایش

زمان	T_{amb}	V_{oc}	I_{sc}
۱۵ دقیقه	۲۸,۶	۱۶,۶	۱,۷۲
۳۰ دقیقه	۲۹,۲	۱۵,۴	۱,۸
۴۵ دقیقه	۲۹,۸	۱۵,۲۳	۱,۸۲
۱ ساعت	۳۰,۶	۱۵,۲۳	۱,۸۳
۱ ساعت و ۱۵ دقیقه	۳۰,۵	۱۵,۲۵	۱,۸۵

۵-۱۴-۲- دقت تجهیزات اندازه‌گیری:

در هر آزمایشی، مسئول اندازه‌گیری داده‌ها می‌بایست از دقت تجهیزات اندازه‌گیری در انجام آزمایش خود مطلع باشد. جدول (۵-۵) نشان دهنده دقت تجهیزات اندازه‌گیری در این آزمایش بوده، لازم به ذکر است که این مقادیر از کاتالوگ معرفی کننده هر ابزار نقل شده است. پس از آن که دقت تجهیزات مورد اندازه‌گیری مشخص می‌شود می‌بایست عدم قطعیت در اثر تجهیزات اندازه‌گیری در انجام آزمایش را محاسبه نمود. جدول (۵-۶) محاسبات انجام شده را نشان می‌دهد که از رابطه‌ی ۵-۸ استفاده شده است، بعنوان مثال برای ترمومتر جیوه‌ای که دارای دقت اندازه‌گیری $\pm 0.5^{\circ}C$ می‌باشد؛ داریم:

$$a = \frac{0.5 - (-0.5)}{2} = \frac{1}{2} = 0.5 \quad \text{و} \quad u_{tools} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.288 \cong 0.29$$

مابقی مقادیر آورده شده در جدول (۶-۵) نیز به همین روش محاسبه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود برای محاسبه مقدار a بهتر است حداکثر خطا را بر ۲ تقسیم می‌کنیم (البته در این جا حداکثر خطا با مقدار دقت گزارش شده برابر است).

جدول (۵-۵) دقت تجهیزات اندازه‌گیری در انجام آزمایش

مولتی‌متر - ولتاژ	$\pm (0.5\% + 1)$	ظرف اندازه‌گیری دبی	1ml
مولتی‌متر - جریان	$\pm (0.8\% + 1)$	زمان سنج	0.01s
تشعشع سنج	$\pm 10 \frac{W}{m^2} + 0.38 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	ترمومتر جیوه‌ای	$\pm 0.5^\circ C$
ترموکوپل تیپ K	$\pm 0.15^\circ C \text{ to } \pm 0.25^\circ C$		

جدول (۶-۵) عدم قطعیت در اثر تجهیزات اندازه‌گیری در انجام آزمایش با در نظر گرفتن حداکثر خطا

مولتی‌متر - ولتاژ	0.058V	ظرف اندازه‌گیری دبی	$2.88 \times 10^{-4} \text{ Lit}$
مولتی‌متر - جریان	0.018A	زمان سنج	$2.887 \times 10^{-3} \text{ s}$
تشعشع سنج	$5.77 \frac{W}{m^2}$	ترمومتر جیوه‌ای	$0.29^\circ C$
ترموکوپل تیپ K	$0.14^\circ C$		

۵-۱۴-۳- قابلیت تکرار پذیری

جهت محاسبه عدم قطعیت ابتدا نیاز است که عدم قطعیت کلی و کلی نسبی داده‌ها محاسبه گردد. مقادیر بدست آمده در جدول (۷-۵) آورده شده است. با توجه به توضیحات مقدماتی داده شده جهت محاسبه عدم قطعیت داده‌ها برای محاسبه عدم قطعیت کلی از رابطه ۵-۹ استفاده می‌کنیم، در این رابطه u_{tools} از جدول (۶-۵) و $u_{repetition}$ از رابطه ۷-۵ بدست می‌آید. لازم به ذکر است برای محاسبه $u_{repetition}$ نیاز به

محاسبه انحراف معیار استاندارد یعنی S است. انحراف معیار استاندارد با توجه به جداول (۵-۲) تا (۵-۴) به ترتیب برای سه پارامتر ولتاژ، جریان و دمای محیط محاسبه می شود.

جدول (۵-۷) عدم قطعیت کلی و کلی نسبی برای مدت انجام آزمایش

پارامتر اندازه گیری شده	عدم قطعیت کلی	عدم قطعیت کلی نسبی
ولتاژ	۰,۲۴	۰,۰۱۵۷
جریان	۰,۰۲	۰,۰۱۴۷
دمای محیط	۰,۴۱	۰,۰۱۴۸

۵-۱۴-۴ - عدم قطعیت بازده الکتریکی

حال به مرحله ای رسیدیم که می توان عدم قطعیت نتایج محاسبه شده را بدست آورد. همانطور که پیشتر

گفته شد، بازده الکتریکی از رابطه ی $\eta_{el} = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{A_{cell} G}$ ، محاسبه می شود. با ثابت در نظر گرفتن

ضریب پرکنندگی (FF) ، مساحت سطح سلول و تابش ورودی، توان الکتریکی وابسته به ولتاژ مدار باز و

جریان اتصال کوتاه خواهد بود. بنابراین برای عدم قطعیت بازده الکتریکی از رابطه ی عدم قطعیت ترکیبی

خواهیم داشت:

$$\delta \eta_{el} = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_{el}}{\partial V} \delta V \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{el}}{\partial I} \delta I \right)^2} \quad (11-5)$$

$$\frac{\partial \eta_{el}}{\partial V} = I \quad \text{و} \quad \frac{\partial \eta_{el}}{\partial I} = V$$

با توجه به رابطه داریم:

با جایگذاری حاصل مشتقات بالا در رابطه (۵-۱۱) و تقسیم آن بر η_{el} و ساده سازی خواهیم داشت:

$$\frac{\delta \eta_{el}}{\eta_{el}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\delta I}{I} \right)^2} = \pm 0.019 \quad (12-5)$$

در رابطه فوق بجای δI (δV) عدم قطعیت کلی نسبی جریان از جدول (۷-۵) و بجای I (V) می توان از جداول (۲-۵) تا (۴-۵) نسبت به جریان (ولتاژ) میانگین گیری کرد و یا بیشترین مقدار را گذاشت.

۵-۱۴-۵ - عدم قطعیت اندازه گیری دبی و دماهای سیال کلکتور

اندازه گیری دبی به روش دستی و با اندازه گیری زمان پر شدن حجم مشخص از سیال انجام شده است. بنابراین وابسته به دو کمیت زمان و حجم می باشد:

$$Q = \frac{\nabla}{t} \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad (۱۳-۵)$$

با توجه به اینکه زمان با زمان سنج دیجیتال با دقت اندازه گیری ۰,۰۱ ثانیه و حجم پر شدن ۵۰ میلی لیتر با دقت ۱ میلی لیتر می باشد، برای دبی اندازه گیری شده ۳۰ لیتر در ساعت در یک دوره آزمایش، زمانها در جدول زیر ثبت شده است.

جدول (۸-۵) زمانهای ثبت شده برای دبی حجمی در یک دوره آزمایش

دبی	زمان ثبت شده (ثانیه)			حجم ظرف
$۳۰ \frac{Lit}{hr}$	۶,۰۴	۵,۹۶	۵,۹۵	۵۰ ml

$$\frac{\delta Q}{Q} = \pm \sqrt{\left(\frac{-\delta t}{t} \right)^2 + \left(\frac{\delta \nabla}{\nabla} \right)^2} = \pm 0.0047$$

به منظور محاسبه عدم قطعیت برای بازده حرارتی علاوه بر دبی نیاز به محاسبه عدم قطعیت در دمای سیال ورودی و خروجی کلکتور نیز می باشد که در این قسمت دادهها ارائه می شود.

جدول (۵-۹) دماهای ثبت شده برای یک دوره آزمایش برای تشعشع ۱۱۰۰ وات بر مترمربع.

سومین آزمایش	دومین آزمایش	اولین آزمایش	دمای سیال کلکتور
۳۹,۴	۳۹,۳	۳۹	ورودی
۴۴,۷	۴۴,۶	۴۴,۹	خروجی

۵-۱۴-۶ - عدم قطعیت بازده حرارتی

عدم قطعیت بازده حرارتی با فرض تاثیرات اندک تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه‌ی سیال با تغییرات دما و همچنین ثابت بودن تابش فرودی، وابسته به سه پارامتر دبی جرمی، دمای سیال ورودی و خروجی کلکتور می‌باشد.

$$\frac{\delta \eta_{th}}{\eta_{th}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta \dot{m}}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{out}}{T_{out}}\right)^2 + \left(-\frac{\delta T_{in}}{T_{in}}\right)^2} = \pm 0.008$$

۵-۱۴-۷ - عدم قطعیت در محاسبات انرژی حرارتی و الکتریکی

با توجه به رابطه‌ی انرژی حرارتی و ساده سازی آن خواهیم داشت:

$$\frac{\delta \dot{E}_{x_{th}}}{\dot{E}_{x_{th}}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta \dot{E}_{th}}{\dot{E}_{th}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{out}}{T_{out}}\right)^2 + \left(-\frac{\delta T_a}{T_a}\right)^2} = \pm 0.017$$

به دلیل اینکه عدم قطعیت انرژی الکتریکی دارای مقدار یکسانی با انرژی الکتریکی است بنابراین عدم

قطعیت انرژی الکتریکی مشابه عدم قطعیت بازده الکتریکی است و مقادیر قابل قبولی دارد.

نتیجه‌ی کلی محاسبات عدم قطعیت، نشان از دقت مناسب در انجام آزمایش‌ها چه از لحاظ تکرار و چه از

لحاظ تجهیزات اندازه‌گیری و نیز وسایل مورد استفاده در آزمایش دارند. بنابراین می‌توان به نتایج حاصل با

دقت قابل قبولی اعتماد کرد.

فصل ٦:

نتایج و تفسیر آنها

۶-۱- پیشگفتار

هدف این پژوهش بطور خاص و کلیه پژوهش های صورت گرفته در حوزه سیستم های فتوولتاییک حرارتی یافتن راه و روشی است که در آن بتوان بازده خروجی سیستم را افزایش داد که این بازده ترکیبی از بازده الکتریکی و حرارتی خواهد بود. در حقیقت راه کار های صورت گرفته به دنبال این هدف است که سیستم قابلیت کسب بیشترین انرژی را در واحد سطح داشته باشد. همانطور که در فصل ۲ اشاره شد یکی از این راه کار ها تغییر سیال خنک این سیستم ها می باشد. از این رو در این پژوهش به بررسی تغییر سیال خنک کننده از آب مقطر به نانوفروسیال پرداخته شده است. آزمایش ها برای سه سیال مختلف چون آب مقطر (دوبار تقطیر شده)، نانوفروسیال Fe_3O_4 با پایه آب و درصد جرمی ۰.۱٪ و نانوفروسیال Fe_3O_4 با پایه آب و درصد جرمی ۰.۳٪ صورت گرفته و نتایج بررسی شده است. هم چنین جهت حذف عوامل محیطی تاثیر گذار چون باد، تابش متفاوت و ... شبیه ساز خورشیدی طراحی و آزمایشات تحت شار تشعشی ثابت صورت گرفت و علاوه بر این نانوفروسیال ها تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی قرار گرفتند این میدان در دو نوع متغیر با فرکانس و میدان ثابت اعمال شد. جهت بررسی دقیق تر و هم چنین حذف هرگونه عوامل غیر مرتبط و امکان مقایسه کردن نتایج بدست آمده دو سیستم مجزا از هم ساخته شد یکی سیستم فتوولتاییک حرارتی و دیگری سیستم فتوولتاییک تنها، تمامی آزمایش ها برای هر دو نوع ساخته شده بصورت یکسان و تحت شرایط کاملا مشابه صورت پذیرفت.

از این رو با توجه به مطالب بالا آزمایش های صورت گرفته را می توان بصورت زیر طبقه بندی کرد :

(۱) تغییر در نوع سیال خنک کننده از آب مقطر به نانوفروسیال که اساس کار صورت گرفته را شکل می دهد.

(۲) انجام آزمایش برای دو سیستم فتوولتاییک حرارتی و فتوولتاییک تنها، در دو تشعشع ثابت ۱۱۰۰ و ۶۰۰ وات بر متر مربع به کمک شبیه ساز خورشیدی جهت حذف عوامل محیطی تاثیر گذار و به

دست آوردن حداکثر و حداقل کارایی سیستم.

۳) اعمال میدان مغناطیسی متغیر و ثابت بر نانوفروسیال جهت بررسی اثر میدان بر بازدهی سیستم.

۶-۲- بررسی تغییرات بازده الکتریکی و گرمایی سیستم

نانوفروسیال در این آزمایش در قسمت مبدل دو لوله تحت تاثیر دو نوع میدان مغناطیسی همانطور که قبلا اشاره شد قرار دارد. میدان مغناطیسی متغیر اعمالی با اعمال سه فرکانس ۵، ۲۵ و ۵۰ هرتز تغییر می کند. با توجه به نتایج بدست آمده در این آزمایش و به جهت جلوگیری از ناخوانا بودن نتایج، نمودارها برای ۵ دسته تعریف شده بصورت زیر ارائه می گردد :

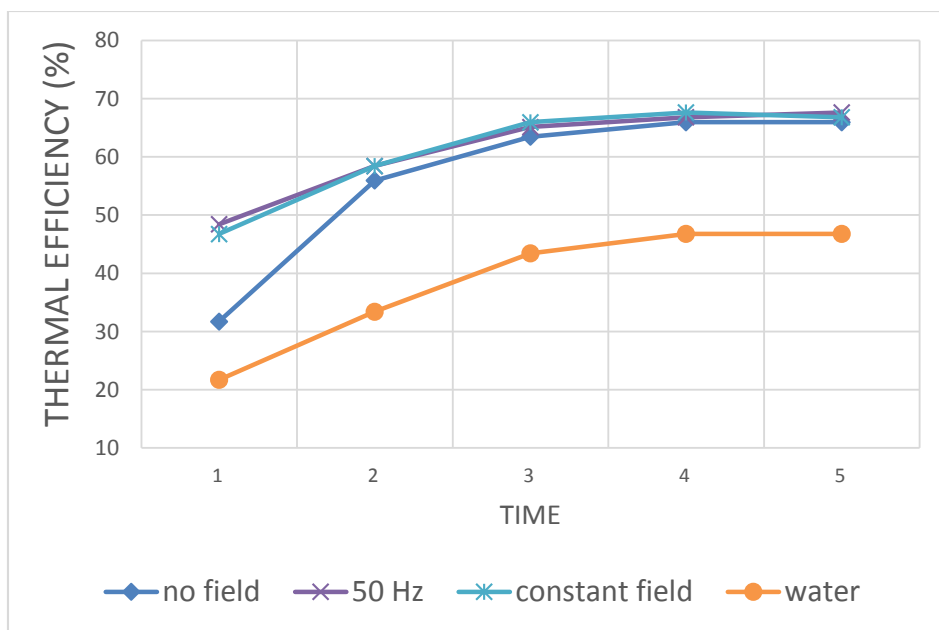
- ۱) مدل اول : نتایج حاصل از بکار گیری آب مقطر جهت خنک کاری سیستم فتوولتاییک حرارتی.
- ۲) مدل دوم : استفاده از نانوفروسیال جهت خنک کاری سیستم فتوولتاییک حرارتی بدون اعمال میدان مغناطیسی خارجی.
- ۳) مدل سوم : استفاده از نانوفروسیال جهت خنک کاری سیستم فتوولتاییک حرارتی همراه با اعمال میدان مغناطیسی ثابت و قدرت ۳۰۰ گوس.
- ۴) مدل چهارم : استفاده از نانوفروسیال جهت خنک کاری سیستم فتوولتاییک حرارتی همراه با اعمال میدان مغناطیسی متغیر با فرکانس ۵۰ هرتز و قدرت ۳۰۰ گوس.
- ۵) مدل پنجم (سیستم مبنا) : سیستم فتوولتاییک بدون استفاده از کلکتور حرارتی.

۶-۲-۱- تغییرات بازده گرمایی سیستم

در شکل ۶-۱ نمودار تغییرات بازدهی گرمایی سیستم فتوولتاییک حرارتی تحت تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع نشان می دهد. اطلاعات هر ۱۵ دقیقه ثبت گردیده و این کار تا زمانی ادامه می یابد که سیستم به

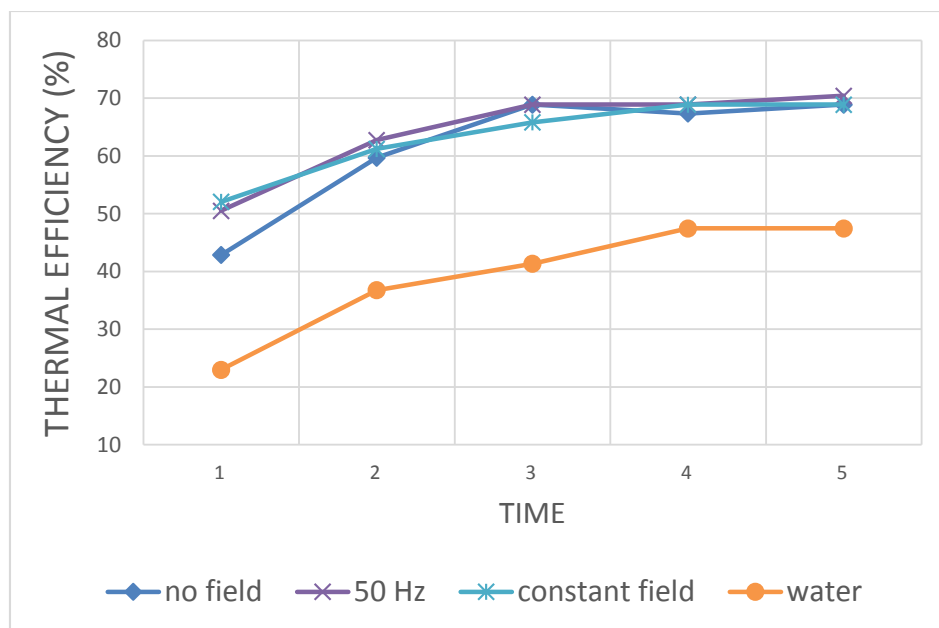
حالت پایدار خود برسد (تقریباً بعد از گذشت ۱ ساعت سیستم به حالت پایدار خواهد رسید). اطلاعات ارائه شده در این آزمایش همگی بر این اساس می باشند. همانطور که از شکل پیداست مدل اول (آب مقطر) هنگامیکه سیستم به حالت پایدار می رسد بازدهی گرمایی به بیشترین مقدار خود یعنی ۴۶،۷۷٪ خواهد رسید. جهت اطمینان از صحت اطلاعات بدست آمده جدای از تمهیدات ویژه ای که نسبت به اندازه گیری ها در این آزمایش انجام داده شده است مقادیر بدست آمده نیز با آزمایشات دیگر پژوهشگران که در مقالات معتبر ارائه شده نیز مقایسه می شود. در همین راستا در آزمایش مشابه ای که توسط فودهلی^۱ و همکاران [۴۲] انجام شده بازده سیستم فتوولتاییک حرارتی با تابش ۸۰۰ وات بر متر مربع چیزی در حدود ۵۰٪ گزارش شده است. البته لازم به ذکر است که بازده گرمایی یک سیستم فتوولتاییک حرارتی بنابر گزارشات معتبر علمی منتشر شده وابسته به مسایل متنوعی از جمله شرایط آزمایش، شدت تابش فرودی بر سیستم و هم چنین نوع و روش خنک کاری آن بین ۲۵٪ تا ۷۵٪ می تواند باشد. همانطور که از نمودار ملاحظه می شود اضافه کردن ۱٪ جرمی نانوذره به سیال پایه (در اینجا آب مقطر) و بدون اعمال میدان خارجی (مدل ۲) تاثیر چشمگیری بر بازدهی گرمایی سیستم خواهد داشت و مقدار آن را به ۶۵،۹۶٪ می‌رساند. از این رو روشن است که استفاده از نانوفروسیال بجای آب تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی بازدهی حرارتی سیستم فتوولتاییک حرارتی خواهد داشت (افزایشی در حدود ۴۱٪ قابل مشاهده است). این نمودار همچنین نشان می دهد که با اعمال میدان مغناطیسی خارجی چه از نوع ثابت یا متغیر آن و با توجه به درصد جرمی بکار گرفته شده، بر روی بازدهی گرمایی سیستم فتوولتاییک حرارتی نسبت به حالتی که صرفاً نانوفروسیال ۱٪ جرمی بدون اعمال میدان خارجی بکار گرفته می شود تاثیر محسوسی دیده نمی شود.

¹ Fudholi



شکل (۶-۱) بازده گرمایی سیستم فتوولتاییک حرارتی با استفاده از آب مقطر و ۱٪ جرمی نانوذره Fe_3O_4 تحت تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و نرخ جریان جرمی ۳۰ لیتر بر ساعت با و بدون تاثیر میدان خارجی ۳۰۰ گوس.

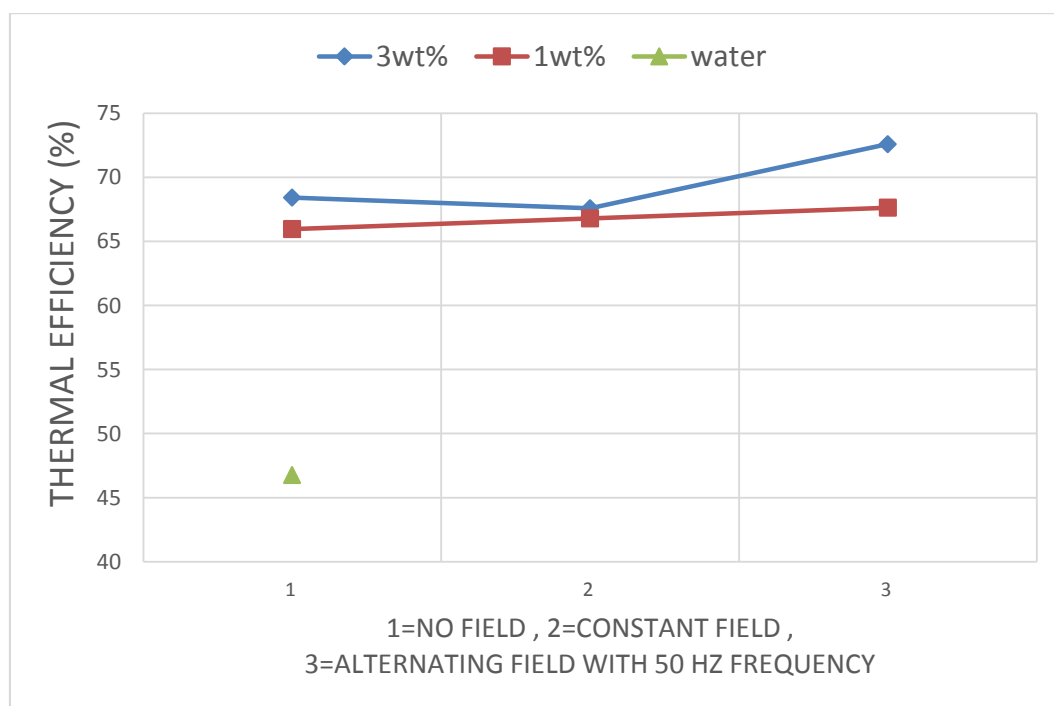
شکل ۶-۲ تغییرات بازدهی گرمایی سیستم فتوولتاییک حرارتی را برای مدل های ۱ تا ۴ تحت تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع و ۱٪ جرمی نانوذره اکسید آهن نشان می دهد. تحت این تابش بازدهی گرمایی سیستم برای نانوفروسیال ۱٪ جرمی بدون اعمال هیچگونه میدان خارجی (مدل ۲) به مقدار ۶۸،۸۸٪ رسیده در حالیکه همین پارامتر برای مدل ۱ یعنی آب مقطر در حدود ۴۷،۴۷٪ بدست آمده است. از این رو و با ملاحظه به مقادیر حاصل شده در حدود ۴۵٪ افزایش در بازدهی گرمایی سیستم با بکارگیری نانوفروسیال ۱٪ جرمی نسبت به آب مقطر خواهد بود. هم چنین دوباره مشاهده شد که میدان مغناطیسی خارجی بر روی بازده سیستم تاثیری ندارد.



شکل (۶-۲) بازده گرمایی سیستم فتوولتاییک حرارتی با استفاده از آب مقطر و ۱٪ جرمی نانوذره Fe_3O_4 تحت تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع و نرخ جریان جرمی ۳۰ لیتر بر ساعت با و بدون تاثیر میدان خارجی ۳۰۰ گوس.

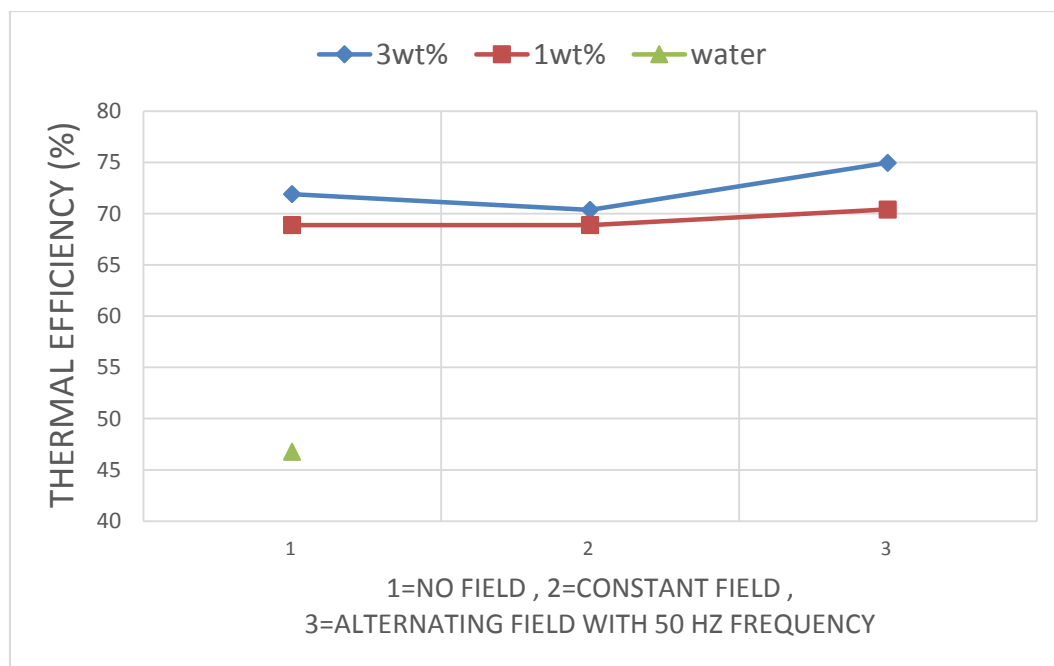
همانطور که از نتایج آزمایشگاهی بدست می آید، بازده گرمایی سیستم فتوولتاییک حرارتی برای ۱٪ جرمی نانو ذره اکسید آهن تحت دو تابش بکار گرفته شده ۱۱۰۰ و ۶۰۰ وات بر متر مربع در حدود ۴۰٪ بیشتر از حالتی است که آب مقطر بعنوان سیال خنک کننده استفاده می شود. مکانیزم های متعددی از سوی پژوهشگران در این زمینه بابت این افزایش در انتقال حرارت به کمک نانوسیالات معرفی شده است و از این میان می توان به حرکت نانوذرات در سیال پایه، تجمع و خوشه بندی ذرات و بخصوص حرکت براونی اشاره کرد. از این موارد بعنوان مهمترین دلایل ممکن بابت این بهبود قابل ملاحظه یاد می شود [۳۱، ۳۲، ۳۴، ۳۵]. در شکل ۶-۳، بازدهی گرمایی ۳٪ جرمی در مقایسه با ۱٪ جرمی نانوذره و آب مقطر برای مدل های ۱ تا ۴ تحت تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع نشان داده شده است. برای مدل ۲ (نانوفروسیال بدون اعمال میدان مغناطیسی)، بازده گرمایی ۳٪ نانوذره ۶۸،۴۲٪ بدست آمد این موضوع نشان می دهد که با سه برابر کردن کسر جرمی نانوذره در سیال پایه، در حدود ۴٪ افزایش در بازده گرمایی سیستم مشاهده شده است. بازده

گرمایی برای مدل ۳ و مدل ۴ نیز به ترتیب برابر با ۶۷،۵۹٪ و ۷۲،۵۹٪ است. از این رو می توان نتیجه گرفت که به کمک اعمال میدان مغناطیسی متغیر با فرکانس ۵۰ هرتز (مدل ۴) به مقدار ۶٪ بازده گرمایی سیستم در مقایسه با حالتی که میدان خارجی اعمال نمی شود (مدل ۲) افزایش می یابد. هم چنین از نتایج ملاحظه می شود که میدان مغناطیسی ثابت بسیار نزدیک به حالتی رفتار می کند که میدان مغناطیسی اعمال نمی شود و به عنوان یک نتیجه می توان گفت که میدان ثابت تقریباً تاثیری بر سیستم ندارد.



شکل (۳-۶) بازده گرمایی سیستم فتوولتاییک حرارتی با استفاده از آب مقطر و ۱٪ و ۳٪ جرمی نانوذره Fe_3O_4 تحت تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و نرخ جریان جرمی ۳۰ لیتر بر ساعت با و بدون تاثیر میدان خارجی ۳۰۰ گوس.

مشابه با مدل های ارائه شده در شکل ۳، بازده گرمایی نانوفروسیال ۳٪ جرمی اما تحت تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل ملاحظه می شود بازده گرمایی سیستم برای مدل ۴ در حدود ۷۴،۹۶٪ بوده، این در حالی است که این مقدار برای مدل ۲ و ۳ تقریباً در حدود ۷۱٪ می باشد. مشابه با تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع، اعمال میدان مغناطیسی متغیر با فرکانس ۵۰ هرتز بازدهی گرمایی سیستم را اندکی بهبود بخشیده است.



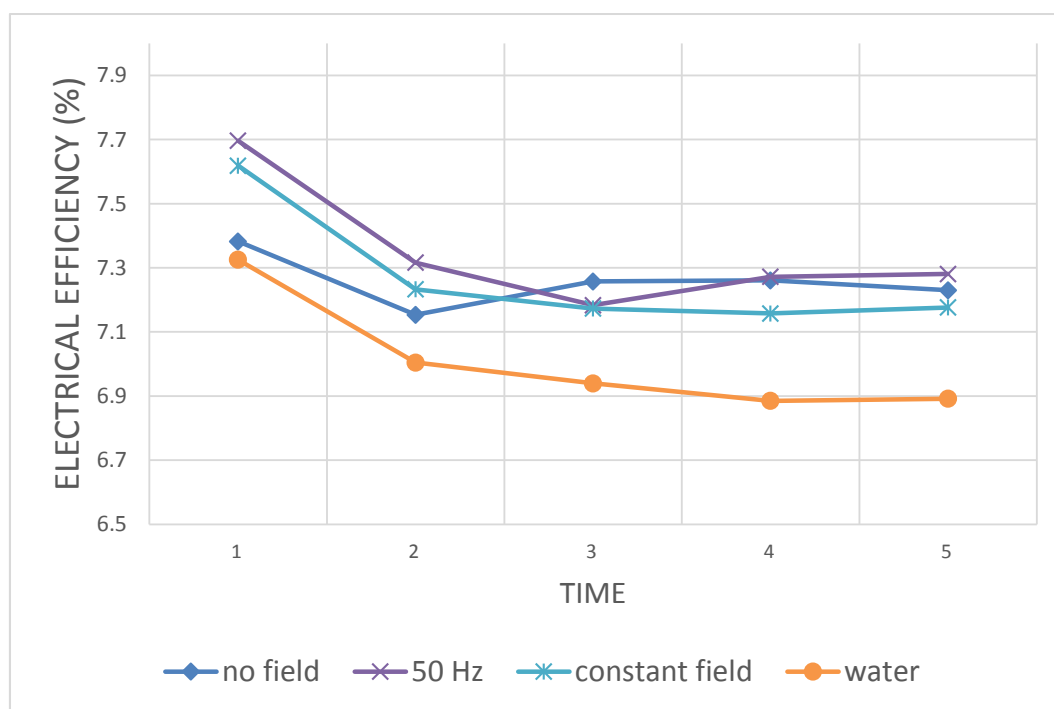
شکل (۴-۶) بازده گرمایی سیستم فتوولتاییک حرارتی با استفاده از آب مقطر و ۱٪ و ۳٪ جرمی نانوذره Fe_3O_4 تحت تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع و نرخ جریان جرمی ۳۰ لیتر بر ساعت با و بدون تاثیر میدان خارجی ۳۰۰ گوس.

از نمودارهای ۳-۶ و ۴-۶ کاملاً مشخص است که با افزایش کسر جرمی نانوذره از ۱٪ به ۳٪ بازدهی گرمایی سیستم فتوولتاییک حرارتی در حدود ۴٪ افزایش می یابد. این یافته قابل انتظار بوده و مشابه نتایج گزارش شده در دیگر مقالات بوده است [۳۱]. با این حال اختلاف بین نتایج بدست آمده برای دو نوع میدان خارجی اعمالی ثابت و متغیر جالب توجه است. در این آزمایش بدست آمده است که میدان مغناطیسی ثابت اثر چندانی بر روی بازدهی گرمایی سیستم نداشته است در حالیکه با اعمال میدان مغناطیسی متغیر بازده گرمایی سیستم افزایش یافته است. این پدیده را می توان به توزیع و پخش نانوذرات فرو و ایجاد کلاسترهای نانوذراتی درون سیال پایه نسبت داد. در حقیقت حضور کلاسترهای نانوذرات و جهت گیری رشته های تشکیل شده ای از ذرات در جهت میدان مغناطیسی خارجی منجر به افزایش بیشتری در انتقال حرارت خواهد شد. علاوه بر این نیز می توان به نقش میدان در اختلال بوجود آمده در لایه مرزی حرارتی نیز اشاره کرد، بدین صورت که با اعمال میدان مغناطیسی متغیر خارجی این لایه مرزی تحلیل رفته و در نتیجه آن

انتقال حرارت بیشتری مشاهده شده است [۳۴-۳۶].

۶-۲-۲- تغییرات بازده الکتریکی سیستم

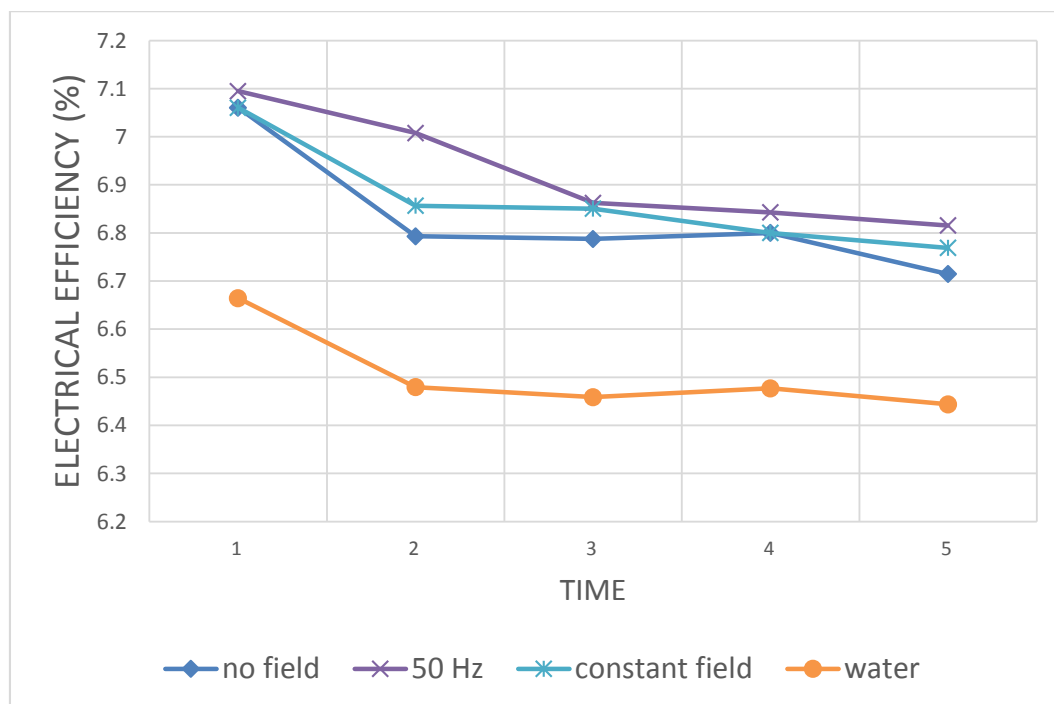
در نمودار ۵-۶ بازده الکتریکی نانوفروسیال ۳٪ جرمی تحت تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع برای مدل های ۱ تا ۴ آورده شده است. همانطور که از نمودار دیده می شود، بازده الکتریکی برای سیستم فتولتاییک حرارتی به مقدار ۶،۸۹٪ برای مدل ۱ و مقدار ۷،۲۳٪ برای مدل ۲ رسیده است. این مقادیر نشان می دهد که بازده الکتریکی سیستم فتولتاییک حرارتی با استفاده از نانوفروسیال در حدود ۴،۸٪ نسبت به حالتی که آب مقطر بعنوان سیال خنک کننده بکار گرفته می شود (مدل ۱) افزایش یافته است.



شکل (۵-۶) بازده الکتریکی سیستم فتولتاییک حرارتی با استفاده از آب مقطر و ۳٪ جرمی نانوذره Fe_3O_4 تحت تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و نرخ جریان جرمی ۳۰ لیتر بر ساعت.

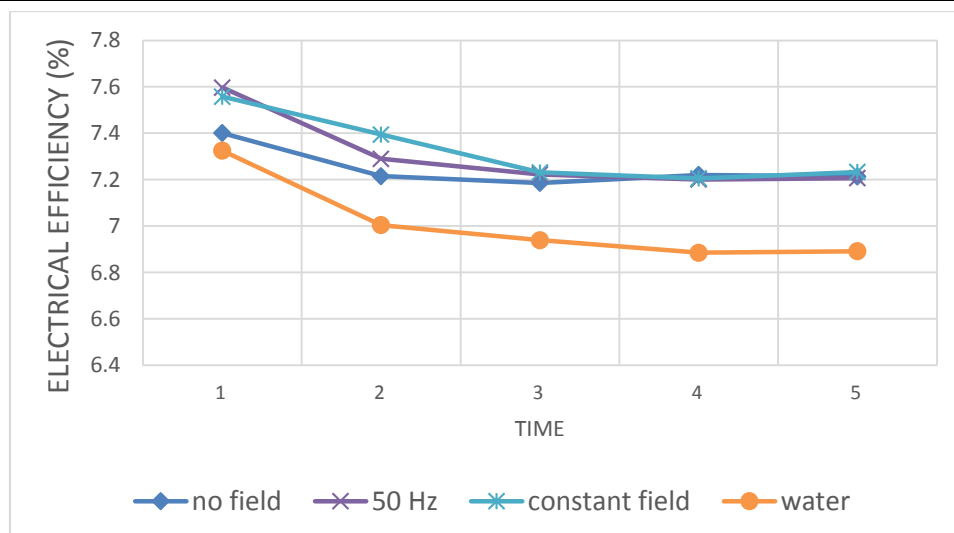
نمودار ۶-۶ بازده الکتریکی را برای نانوفروسیال ۳٪ جرمی مشابه با شرایط نشان داده شده در شکل ۵ ارایه

می دهد با این تفاوت که سیستم تحت تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع قرار دارد. از نمودار دیده می شود که برای مدل ۲، بازده الکتریکی مقداری برابر با ۶،۷۱٪ دارد در حالیکه برای مدل ۱ این مقدار در حدود ۶،۴۴٪ است. این مقادیر تاکید می کند که استفاده از نانوفروسیال بعنوان سیال عامل در بهبود بازدهی سیستم موثر تر از آب مقطر است.



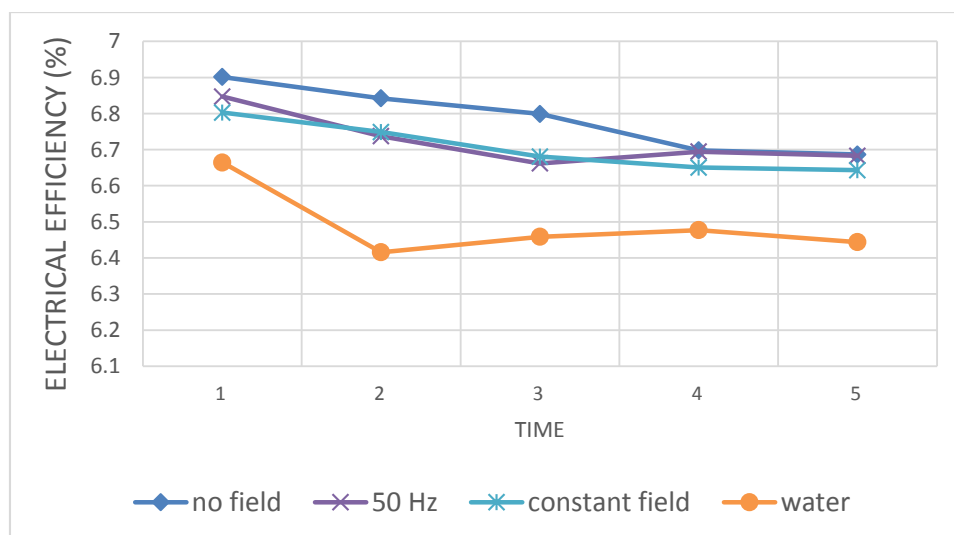
شکل (۶-۶) بازده الکتریکی سیستم فتولتاییک حرارتی با استفاده از آب مقطر و ۳٪ جرمی نانوذره Fe_3O_4 تحت تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع و نرخ جریان جرمی ۳۰ لیتر بر ساعت.

از نمودارهای ۵-۶ و ۶-۶ مشخص است که میدان مغناطیسی اعمالی بر نانوفروسیال تاثیری بر روی بازدهی الکتریکی سیستم ندارد البته این نتیجه قابل انتظار است چرا که میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت سیال عامل در بخش خنک کننده نانوفروسیال یعنی مبدل دو لوله سیستم فتولتاییک حرارتی اعمال می شود.



شکل (۷-۶) بازده الکتریکی سیستم فتولتاییک حرارتی با استفاده از آب مقطر و ۱٪ جرمی نانوذره Fe_3O_4 تحت تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و نرخ جریان جرمی ۳۰ لیتر بر ساعت.

بازده الکتریکی نانوفروسیال ۱٪ جرمی تحت تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع برای مدل های ۱ تا ۴ در شکل ۶-۷ آورده شده است. همانطور که از شکل دریافت می شود حداکثر بازده الکتریکی در حدود ۷،۲٪ برای مدل های ۲، ۳ و ۴ بدست آمده است و برای مدل ۱ در حدود ۶،۹٪ حاصل شد. برای این آزمایش افزایشی در حدود ۴٪ از تغییر سیال عامل از آب مقطر به نانوفروسیال ۱٪ جرمی مشاهده می شود. در شکل ۶-۸ نیز بازده الکتریکی نانوفروسیال ۱٪ جرمی اما تحت تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع نمایش داده شده است.



شکل (۸-۶) بازده الکتریکی سیستم فتولتاییک حرارتی با استفاده از آب مقطر و ۱٪ جرمی نانوذره Fe_3O_4 تحت تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع و نرخ جریان جرمی ۳۰ لیتر بر ساعت.

با توجه به مقادیر بدست آمده کاملاً مشخص است که با تغییر سیال عامل از آب مقطر به نانوفروسیال با کسر جرمی ۱٪ و ۳٪، بازده الکتریکی سیستم افزایش می‌یابد. هم چنین مشخص شد که اعمال میدان مغناطیسی اعم از ثابت و متغیر تغییر چندانی در بازده الکتریکی بوجود نمی‌آورد، البته این موضوع قابل پیش بینی بود چراکه میدان خارجی در قسمت خنک کاری نانوفروسیال در مبدل دو لوله‌ای اعمال شده است و تاثیر اعمالی از میدان بر نانوفروسیال به اندازه کافی بزرگ نیست تا توانایی ایجاد تغییر محسوس در محاسبات بازده الکتریکی بوجود آورد (برای درک بهتر به جداول (۶-۱) و (۶-۲) نیز رجوع شود).

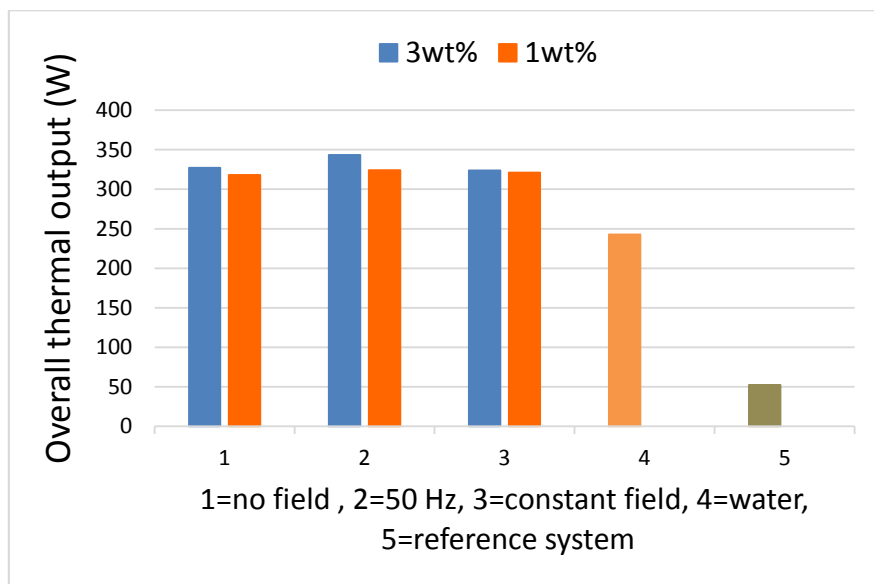
۶-۳- گرمای کل و انرژی کل خروجی سیستم فتوولتاییک حرارتی

۶-۳-۱- گرمای کل خروجی سیستم

گرما کل و انرژی کل سیستم به کمک فرمول های آورده شده برای تمامی مدل های این آزمایش محاسبه شده است. شکل ۶-۷ تغییرات گرمای کل خروجی سیستم را برای تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل پیداست گرمای کل خروجی سیستم برای سیستم مبنا (مدل ۵) برابر با ۵۲،۴۴ وات، برای آب مقطر بعنوان سیال عامل (مدل ۱) ۲۴۲،۹۰ وات، برای مدل ۲ با کسر جرمی ۱٪ مقدار ۳۱۷،۸۸ وات و برای کسر جرمی ۳٪ مقداری برابر با ۳۲۷،۲۵ وات را دارد. با توجه به این مقادیر بدست آمده نتیجه می‌شود که استفاده از نانوفروسیال بجای آب مقطر گرما کل خروجی سیستم را بطرز چشمگیری افزایش می‌دهد. این افزایش در حدود ۳۵٪ برای نانوفروسیال با ۳٪ جرمی نانوذره در مقایسه با آب مقطر است. گرمای کل خروجی مدل ۳ برای ۱٪ و ۳٪ جرمی تقریباً برابر با مدل ۲ است که این موضوع خود دوباره تاکید بر این نکته دارد که میدان مغناطیسی ثابت تاثیر چندانی بر خروجی سیستم ندارد.

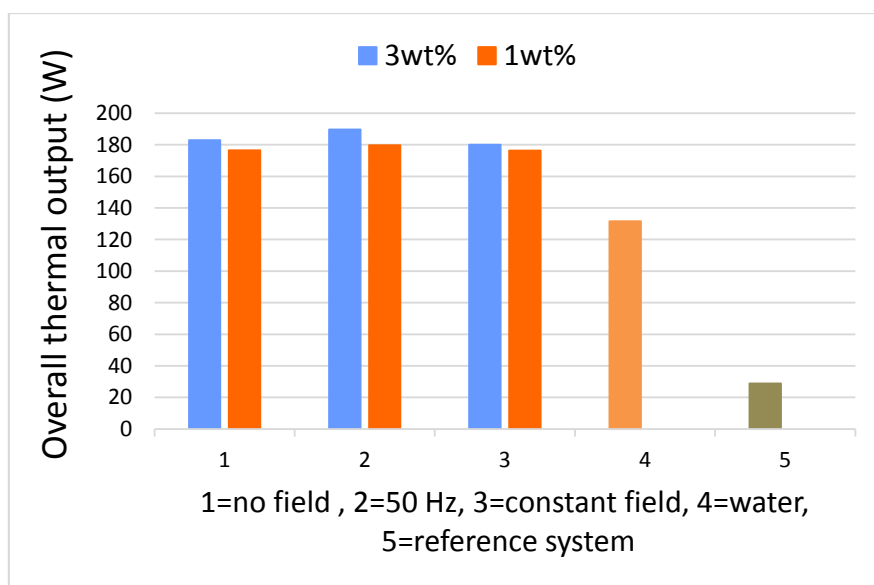
اما با اعمال میدان مغناطیسی متغیر با فرکانس ۵۰ هرتز (مدل ۴)، گرمای کل خروجی سیستم برای

نانوفروسیال ۳٪ جرمی مقداری برابر با ۳۴۳،۳۶ وات می یابد که در حدود ۵٪ بهبود در مقایسه با مدل ۲ که میدان مغناطیسی اعمال نمی شود، نشان می دهد.



شکل (۶-۹) گرمای کل خروجی برای نانوفروسیال ۱٪ و ۳٪ جرمی، تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و میدان مغناطیسی.

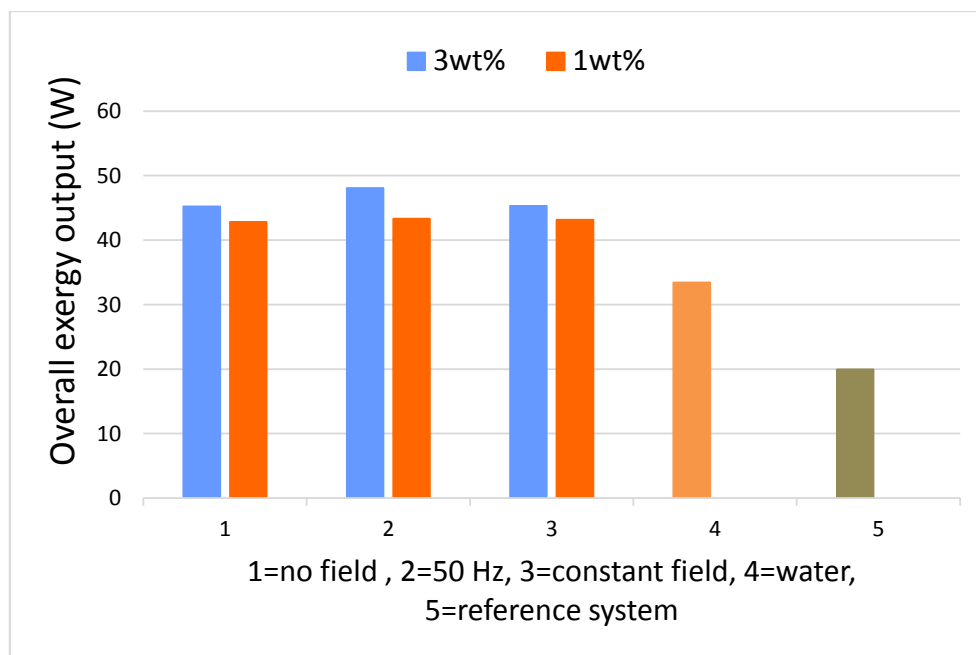
در شکل ۶-۸ گرمای کل خروجی سیستم تحت تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع نشان داده شده است. از شکل هویداست که بکارگیری نانوفروسیال گرمای کل خروجی سیستم را در مقایسه با مدل ۱ و ۵ افزایش داده است. با توجه به شکل گرما کل خروجی برای مدل ۵ برابر ۲۸،۸۵ وات، برای مدل ۱ برابر ۱۳۱،۵۱ وات و برای مدل ۲ با درصد جرمی ۱ و ۳ درصد نانوذره به ترتیب برابر با ۱۷۶،۵۲ وات و ۱۸۲،۸۳ وات می باشد.



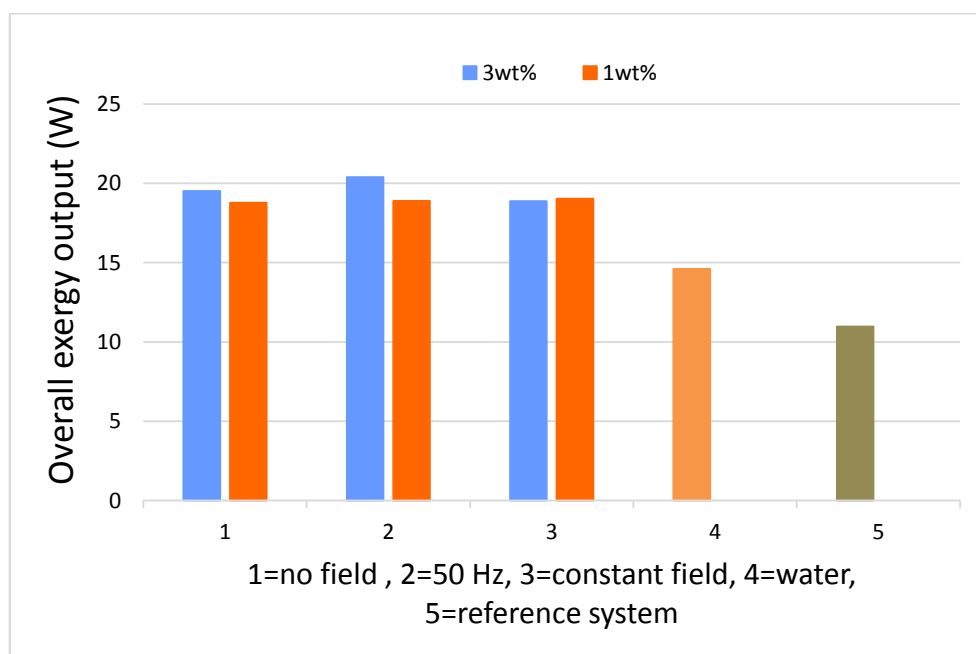
شکل (۶-۱۰) گرمای کل خروجی، نانوفروسیال ۱٪ و ۳٪ جرمی، تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع و میدان مغناطیسی.

۶-۳-۲- اگزرژی کل خروجی سیستم

در شکل ۶-۹ اگزرژی کل سیستم فتوولتائیک حرارتی تحت تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع نمایش داده شده است. همانطور که از این شکل ملاحظه می شود در مدل ۲ اگزرژی خروجی سیستم برای نانوفروسیال ۱٪ جرمی، ۴۲،۸۱ وات و برای نانوفروسیال ۳٪ جرمی ۴۵،۲۳ وات می باشد. این در حالی است که این مقدار برای مدل ۱ مقداری چون ۳۳،۴۴ وات و برای مدل ۵ برابر با ۱۹،۹۳ وات را اختیار کرده است. از این رو مشاهده می شود که استفاده از نانوفروسیال در مقایسه با آب مقطر (مدل ۱) حداکثر بهبودی برابر با ۳۹٪ را بوجود می آورد. لازم به ذکر است که اگزرژی خروجی برای مدل ۳ (اعمال میدان مغناطیسی ثابت) و برای هر دو نوع درصد جرمی بکار گرفته شده نزدیک به مقادیر بدست آمده در مدل ۲ می باشد. در مدل ۴ که میدان مغناطیسی متغیر ۵۰ هرتزی بر نانوفروسیال اعمال می شود، افزایشی در حدود ۶٪ در مقایسه با حالت ۲ برای ۳٪ جرمی نانوذره دیده می شود.



شکل (۶-۱۱) اگزرژی کل خروجی برای نانوفروسیال ۱٪ و ۳٪ جرمی، تابش ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و میدان مغناطیسی



شکل (۶-۱۲) اگزرژی کل خروجی برای نانوفروسیال ۱٪ و ۳٪ جرمی، تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع و میدان مغناطیسی.

شکل ۶-۱۰ بیانگر تغییرات اگزرژی کل خروجی سیستم برای تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع است. در این تابش نیز بیشترین اگزرژی خروجی در حدود ۲۰،۳۹ وات و مربوط به مدل ۴ و برای کسر جرمی ۳٪ می‌باشد. در این تابش اگزرژی کل خروجی برای آب مقطر تقریباً برابر با ۱۴،۶ وات بدست آمده است.

۶-۴-۲ - دسته بندی نتایج بدست آمده

برای ارزیابی بهتر نتایج بدست آمده در این آزمایش داده های آزمایشگاهی بدست آمده در جدول ۱ و ۲ به ترتیب برای نانوفروسیال ۱٪ و ۳٪ جرمی نشان داده شده و جهت مقایسه مدل های مختلف یاد شده در این آزمایش مقادیر مربوط به آب مقطر، سیستم مبنا و فرکانس های ۵ و ۲۵ هرتز نیز آورده شده است. همانطور که از جدول ۱ دیده می شود، بیشترین بازدهی کل سیستم فتوولتاییک حرارتی برابر با ۷۱،۹۱٪ و ۷۴،۴٪ برای نانوفروسیال ۱٪ جرمی و به ترتیب برای تابش ۱۱۰۰ و ۶۰۰ وات بر متر مربع است. همچنین در حدود ۴۰٪ بهبود در بازدهی کل برای مدل ۴ در مقایسه با مدل ۱ مشاهده شده است.

جدول (۱-۶) مقادیر بدست آمده برای نانوفروسیال ۱٪ جرمی و آب مقطر

	Radiation (W/m ²)	$\Delta T_{collector}$ (°C)	η_{th} (%)	η_{el} (%)	η_{pvt} (%)	Overall thermal output (W)	Overall exergy output (W)
No field	1100	7.9	65.96	7.21	71.91	317.88	42.81
	600	4.5	68.88	6.68	74.40	176.52	18.78
5 Hz	1100	8.0	66.80	7.21	72.75	320.96	43.14
	600	4.5	68.88	6.64	74.36	176.29	18.43
25 Hz	1100	8.0	66.80	7.20	72.75	320.88	43.25
	600	4.5	68.88	6.69	74.40	176.52	19.17
50 Hz	1100	8.1	67.63	7.21	73.58	324.06	43.33
	600	4.6	70.41	6.68	75.93	179.63	18.88
Constant Field	1100	8.0	66.80	7.23	72.77	321.20	43.15
	600	4.5	68.88	6.64	74.36	176.29	18.65
Distilled water	1100	5.6	46.77	6.89	52.46	242.90	33.44
	600	3.1	47.47	6.44	52.79	131.51	14.60
PV with no collector	1100	---	---	5.32	4.39	52.44	19.93
	600	---	---	5.37	4.43	28.85	10.96

با نگاهی دقیق تر به جدول ۱ ملاحظه می شود که سه فرکانس مختلف ۵، ۲۵ و ۵۰ هرتز برای میدان مغناطیسی متغیر انتخاب شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده برای نانوفروسیال ۱٪ جرمی تغییرات در بازده گرمایی و کلی سیستم قابل صرف نظر کردن است.

در جدول ۲ تمامی مقادیر بدست آمده برای نانوفروسیال ۳٪ جرمی آورده شده است. بر خلاف نانوفروسیال ۱٪ جرمی افزایش جزئی در بازدهی گرمایی و کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی با تغییر فرکانس از ۵ تا ۵۰ هرتز مشاهده می شود. این موضوع می تواند منجر به این نتیجه شود که فرکانس میدان مغناطیسی متغیر نقش محسوس تری برای کسرهای جرمی بزرگتر از ۱٪ می تواند ایفا کند.

جدول (۶-۲) مقادیر بدست آمده برای نانوفروسیال ۳٪ جرمی و آب مقطر

	Radiation (W/m ²)	$\Delta T_{collector}$ (°C)	η_{th} (%)	η_{el} (%)	η_{pvt} (%)	Overall thermal output (W)	Overall exergy output (W)
No field	1100	8.2	68.42	7.23	74.39	327.25	45.23
	600	4.7	71.90	6.71	77.44	182.83	19.51
5 Hz	1100	8.3	69.26	7.18	75.19	329.93	45.66
	600	4.8	73.43	6.74	79.00	186.08	19.54
25 Hz	1100	8.6	71.76	7.18	77.69	339.30	47.25
	600	4.8	73.43	6.78	79.03	186.31	20.00
50 Hz	1100	8.7	72.59	7.28	78.60	343.36	48.08
	600	4.9	74.96	6.81	80.58	189.62	20.39
Constant Field	1100	8.1	67.59	7.18	73.52	323.60	45.32
	600	4.6	70.37	6.77	75.96	180.00	18.88
Distilled water	1100	5.6	46.77	6.89	52.46	242.90	33.44
	600	3.1	47.47	6.44	52.79	131.51	14.60
PV with no collector	1100	---	---	5.32	4.39	52.44	19.93
	600	---	---	5.37	4.43	28.85	10.96

فصل ۷:

جمع بندی و پیشنهادها

۷-۱- جمع بندی

در این تحقیق ابتدا مقدمه‌ای از واحدهای فتوولتاییک و اصول کار آن‌ها به طور کامل مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که کنترل دمای سلول‌ها می‌تواند به عنوان راه موثری جهت بهبود بازده این واحدها پس از ساخت باشد. بنابراین با افزودن یک بازیاب حرارت می‌توان با حصول انرژی حرارتی اتلافی و افزایش انرژی الکتریکی بهبود مناسبی از لحاظ بازده انرژی در این واحدها ایجاد کرد. این واحدها با عنوان واحدهای فتوولتاییک حرارتی شناخته می‌شوند.

در فصل دوم این پایان نامه واحدهای فتوولتاییک حرارتی، تحلیل و خلاصه‌ای از کارهای متفاوت انجام شده توسط سایر پژوهشگران بیان گردید و در فصل سوم مقدمه‌ای از نانوسیالات، روشهای تهیه و پایداری سازی و روابط ترموفیزیکی موجود در آن‌ها ارائه گردید.

از آنجا که نانوذرات بکار گرفته شده در این آزمایش سنتز شده و روند پایداری سازی آن از ابتدا تا انتها در این پژوهش انجام شده است در فصل چهارم به توضیح و تفسیر روند سنتز و پایداری سازی نانوفروسیال Fe_3O_4 با پایه آب پرداخته شده است.

در فصل پنجم یعنی فصل انجام آزمایش، تجهیزات و وسایل مورد استفاده در انجام آزمایش معرفی و مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش یک واحد فتوولتاییک حرارتی ساخته شده و به منظور بررسی اثر استفاده از نانوفروسیال از سه سیال متفاوت چون آب مقطر و نانوفروسیال با درصد جرمی ۰.۱٪ و ۰.۳٪ مورد استفاده قرار گرفت. همچنین به عنوان ایده‌ای نوین نانوفروسیال در قسمت خنک کاری سیستم یعنی مبدل حرارتی دو لوله تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی از نوع ثابت و متغیر با فرکانس قرار گرفت. جهت حذف عوامل غیر مرتبط و جهت سنجش دقیق تر مقادیر بدست آمده سیستم شبیه‌ساز خورشیدی نیز طراحی و ساخته شد. در نهایت هم به منظور مشخص کردن میزان صحت آزمایش‌ها محاسبات کاملی از عدم قطعیت و میزان خطاها در پارامترهای اندازه‌گیری شده نیز مورد بررسی قرار گرفت.

با بررسی نتایج آزمایشگاهی بدست آمده، با افزودن کلکتور حرارتی به واحد فتوولتائیک، شاهد افزایش چشمگیری در مقدار کل انرژی برای واحد سطح هستیم. نتایج نشان داد که چنانچه سیال عامل آب مقطر باشد بازده کلی سیستم در حدود ۵۲٪ خواهد بود در حالیکه این مقدار برای سیستم مینا تنها در حدود ۴,۴٪ بدست آمد.

تغییر سیال خنک کننده از آب مقطر به نانوفروسیال ۳٪ جرمی اکسید آهن با پایه آب منجر به افزایش بازده کلی سیستم در حدود ۷۶٪ گردید. نتایج نشان دادند که اعمال میدان مغناطیسی متغیر با فرکانس ۵۰ هرتز در حدود ۴ الی ۵٪ افزایش در بازدهی کل سیستم نسبت به حالتی که میدان خارجی اعمال نمی‌شود تاثیر گذاشته است. شایان ذکر است در این پژوهش داده‌ها بیانگر عدم تاثیر محسوس میدان مغناطیسی ثابت بر نانوفروسیال داشته و مقادیر بدست آمده نزدیک به حالتی است که میدان خارجی اعمال نمی‌شود. اگزرژی کل سیستم برای حالتی که میدان خارجی متغیر با فرکانس ۵۰ هرتز اعمال می‌شود ۴۸ وات محاسبه شد. این مقدار برای حالتی که آب مقطر به عنوان سیال عامل بکار گرفته شده در حدود ۳۳ وات و برای حالتی که کلکتور حرارتی وجود ندارد (سیستم مینا) در حدود ۱۹ وات می‌باشد.

۷-۲- ارایه‌ی پیشنهاد

با توجه به گسترش روزافزون کاربرد انرژی‌های نو و نانوسیالات در زمینه‌های مختلف، زمینه‌ی تحقیقات بسیار وسیعی فراهم است که به برخی از آنها به عنوان پیشنهاد برای شروع، ادامه و یا گسترده سازی که به علت محدودیت زمانی و گستردگی بحث‌ها فرصت انجام آن پیش نیامده است، اشاره خواهد شد تا علاقه‌مندان با داشتن ایده‌ای مناسب به این زمینه‌ی تحقیقی وارد شوند.

- استفاده از نانوسیالات مختلف با کسر جرمی‌های متفاوت در چنین سیستمی می‌تواند دید جامع و کاربردی از استفاده دیگر نانوسیالات در چنین سیستم‌های ارایه دهد.

همچنین می‌توان با تغییر در طراحی کلکتور حرارتی و بررسی انواع هندسه‌های موجود بر بازدهی سیستم پرداخت.

- استفاده و بکارگیری نانوسیالات مختلف در سایر سیستم‌های خورشیدی چون متمرکز، کلکتورهای صفحه تخت و ... جهت بررسی اثر این نوع جدید سیالات در بازدهی سیستم.
- اعمال میدان مغناطیسی بصورت موازی و عمود بر گرادیان دمایی و همچنین بررسی شدت‌های مختلف میدان، فرکانس‌های مختلف و بررسی تاثیر آن‌ها بر سیستم آزمایش شده در این پژوهش و همچنین دیگر سیستم‌ها می‌تواند دید بهتر و عمیق‌تری از برهمکنش سیال و میدان ارائه دهد.
- بررسی عددی یک چنین سیستم‌های جهت کاهش هزینه‌های ساخت و پیش‌بینی رفتار سیستم در حالت‌های مختلف خود نیز می‌تواند زمینه‌ی پژوهشی دیگر باشد.

مراجع

- [۱] سردارآبادی م، (۱۳۹۱)، پایان نامه ارشد: " بررسی تجربی اثر نانوسیال سیلیکا در سیستم های فتوولتاییک حرارتی"، دانشکده مهندسی (گروه مهندسی مکانیک)، دانشگاه فردوسی مشهد
- [۲] Ren21, *Renewables global status report from the Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*. 2014.
- [۳] Hu, C. and R.M. White, (1983), *Solar cells: from basic to advanced systems*.
- [۴] Messenger, R.A. and J. Ventre, (2010), *Photovoltaic systems engineering*. CRC press.
- [۵] Houssamo, I., F. Locment, and M. Sechilariu, (2010), *Maximum power tracking for photovoltaic power system: Development and experimental comparison of two algorithms*. *Renewable Energy*, **35**(10): p. 2381-2387.
- [۶] Gang, P., et al., (2011), *A numerical and experimental study on a heat pipe PV/T system*. *Solar energy*, **85**(5): p. 911-921.
- [۷] Tripanagnostopoulos, Y., T. Nousia, and M. Souliotis. (2000). *Low cost improvements to building integrated air cooled hybrid PV-Thermal systems*. in *Proceeding of the 16th EPSE conference, Glasgow, UK*.
- [۸] Kumar, R. and M.A. Rosen, (2011), *Performance evaluation of a double pass PV/T solar air heater with and without fins*. *Applied Thermal Engineering*, **31**(8): p. 1402-1410.
- [۹] Dubey, S. and G. Tiwari, (2009), *Analysis of PV/T flat plate water collectors connected in series*. *Solar Energy*, **83**(9): p. 1485-1498.
- [۱۰] Tiwari, A. and M. Sodha, (2006), *Performance evaluation of solar PV/T system: an experimental validation*. *Solar Energy*, **80**(7): p. 751-759.
- [۱۱] Dehra, H., (2009), *A two dimensional thermal network model for a photovoltaic solar wall*. *Solar Energy*, **83**(11): p. 1933-1942.
- [۱۲] Boubekri, M., A. Chaker, and A. Cheknane, (2009), *Numerical approach for performance study of hybrid PV/Thermal collector*. *Revue des Energies Renouvelables*, **12**(3): p. 355-368.
- [۱۳] Chow, T.T., et al., (2008), *Computer modeling and experimental validation of a building-integrated photovoltaic and water heating system*. *Applied Thermal Engineering*, **28**(11): p. 1356-1364.
- [۱۴] Chow, T.T ,et al., (2009), *Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover*. *Applied Energy*, **86**(3): p. 310-316.
- [۱۵] Dubey, S., G. Sandhu, and G. Tiwari, (2009), *Analytical expression for electrical efficiency of PV/T hybrid air collector*. *Applied Energy*, **86**(5): p. 697-705.

- [16] Jones, A. and C. Underwood, (2001), *A thermal model for photovoltaic systems*. Solar energy, **70**(4): p. 349-359.
- [17] Zondag, H., et al., (2003), *The yield of different combined PV-thermal collector designs*. Solar energy, **74**(3): p. 253-269.
- [18] Daghigh, R., M. Ruslan, and K. Sopian, (2011), *Advances in liquid based photovoltaic/thermal (PV/T) collectors*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, **15**(8): p. 4156-4170.
- [19] Bergene, T. and O.M. Løvvik, (1995), *Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells*. Solar energy, **55**(6): p. 453-462.
- [20] Fujisawa, T. and T. Tani, (1997), *Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector*. Solar energy materials and solar cells, **47**(1): p. 135-148.
- [21] Sandnes, B. and J. Rekstad, (2002), *A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model*. Solar Energy, **72**(1): p. 63-73.
- [22] He, W., et al., (2006), *Hybrid photovoltaic and thermal solar-collector designed for natural circulation of water*. Applied energy, **83**(3): p. 199-210.
- [23] Chol, S., (1995), *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*. ASME-Publications-Fed, **231**: p. 99-106. USA
- [24] Ghadimi, A., R. Saidur, and H. Metselaar, (2011), *A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions*. International Journal of Heat and Mass Transfer, **54**(17): p. 4051-4068.
- [25] Hwang, Y., et al., (2008), *Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids*. Powder Technology, **186**(2): p. 145-153.
- [26] Wang, X.-Q. and A.S. Mujumdar, (2007), *Heat transfer characteristics of nanofluids: a review*. International journal of thermal sciences, **46**(1): p. 1-19.
- [27] Haddad, Z., et al., (2014), *A review on how the researchers prepare their nanofluids*. International Journal of Thermal Sciences, **76**: p. 168-189.
- [28] Philip, J., P. Shima, and B. Raj, (2007), *Enhancement of thermal conductivity in magnetite based nanofluid due to chainlike structures*. Applied Physics Letters, **91**(20): p. 203108.
- [29] Hong, K., T.-K. Hong, and H.-S. Yang, (2006), *Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles*. Applied Physics Letters, **88**(3): p. 031901.
- [30] Saidur, R., K. Leong, and H. Mohammad, (2011), *A review on applications and challenges of nanofluids*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, **15**(3): p. 1646-1668.
- [31] Nkurikiyimfura, I., Y. Wang, and Z. Pan, (2013), *Heat transfer enhancement by magnetic nanofluids—A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, **21**: p. 548-561.

- [۳۲] Li, Q., Y. Xuan, and J. Wang, (2005), *Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids*. Experimental Thermal and Fluid Science, **30**(2): p. 109-116.
- [۳۳] Zhu, H., et al., (2006), *Effects of nanoparticle clustering and alignment on thermal conductivities of Fe₃O₄ aqueous nanofluids*. Applied Physics Letters, **89**(2): p. 3123.
- [۳۴] Lajvardi, M., et al., (2010), *Experimental investigation for enhanced ferrofluid heat transfer under magnetic field effect*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **322**(21): p. 3508-3513.
- [۳۵] Ghofrani, A., et al., (2013), *Experimental investigation on laminar forced convection heat transfer of ferrofluids under an alternating magnetic field*. Experimental Thermal and Fluid Science, **49** :p. 193-200.
- [۳۶] Azizian, R., et al., (2014), *Effect of magnetic field on laminar convective heat transfer of magnetite nanofluids*. International Journal of Heat and Mass Transfer, **68**: p. 94-109.
- [۳۷] Irannano. *Iran nanotechnology initiative council*. Available from: www.nano.ir.
- [۳۸] Es' hagh, Z., T. Heidari, and E. Mazloomi, (2014), *In situ pre-concentration and voltammetric determination of trace lead and cadmium by a novel ionic liquid mediated hollow fiber-graphite electrode and design of experiments via Taguchi method*. Electrochimica Acta, **147**: p. 279-287.
- [۳۹] Lopez, J.A., et al., (2010), *Synthesis and characterization of Fe₃O₄ magnetic nanofluid*. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, p. 60-66.
- [۴۰] Sardarabadi M., Passandideh-Fard, M., Zeinali HS, (2014), *Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units)*. Energy, **66**: p. 264-72.
- [۴۱] Taylor, J.R. and E. Cohen, (1998), *An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements*. Measurement Science and Technology, **9**(6): p. 1015.
- [۴۲] Fudholi, A., et al., (2014), *Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors*. Energy Conversion and Management, **78**: p. 641-651.
- [۴۳] Alamdari, P., O. Nematollahi, and A.A. Alemrajabi, (2013), *Solar energy potentials in Iran: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, **21**: p. 778-788.

پیوست‌ها

پیوست الف : پتانسیل سنجی انرژی خورشیدی در کشور عزیزمان ایران

الف-۱ مقدمه

کشور عزیزمان ایران با مساحتی در حدود ۱۶۴۸ کیلومتر مربع، هیجدهمین کشور پهناور در دنیاست که توسط کشورهای آذربایجان، ارمنستان، ترکمنستان و دریای کاسپین (خزر) در شمال، افغانستان و پاکستان در شرق، عراق و ترکیه در غرب و خلیج همیشگی پارس و خلیج عمان از جنوب محدود شده است در شکل زیر تقسیم بندی های دولتی کشورمان را مشاهده کرده و در جدول ۱ نام استان ها مطابق با شماره گذاری در شکل ۱ آمده است.

Names of the provinces of Iran.

1. Tehran	12. Kermanshah	23. Yazd
2. Alborz	13. Ilam	24. Isfahan
3. Markazi	14. Lorestan	25. Semnan
4. Qazvin	15. Khuzestan	26. Mazandar
5. Gilan	16. Chahar Mahaal and Bakhtiari	27. Golestan
6. Ardabil	17. Kohkiluyeh and Buyer Ahmad	28. North Khc
7. Zanjan	18. Bushehr	29. Razavi Kh
8. East Azarbaijan	19. Fars	30. South Khc
9. West Azarbaijan	20. Hormozgan	31. Qom
10. Kurdistan	21. Sistan and Baluchistan	
11. Hamadan	22. Kerman	



شکل (الف-۱) تقسیمات کشوری، استان‌ها

وضعیت آب و هوایی ایران در میان همسایگان خود منحصر به فرد است. اختلاف دمایی بین گرم ترین مناطق و سردترین آن در حدود ۴۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد در طول سال است. در حالیکه شهرکرد دمایی در حدود ۳۰- درجه سانتی گراد را در شب های زمستان طی می کند احواز دمایی در حدود ۵۰+ درجه سانتی گراد را تجربه می کند. در سال ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ کویر لوت ایران گرم ترین نقطه زمین بود. از لحاظ بارندگی، ایران جزو مناطق خشک و نیمه خشک دسته بندی می شود که تحت تاثیر مناطق سیبری، مدیترانه ای و مناطق فشار پایین جنوبی قرار دارد. میزان بارندگی سالیانه بسیار متغیر بوده و از بارش بالای

2113mm در شمال تا مقدار ناچیز 15mm در مناطق بیابانی دچار تغییر است. برخلاف تنوع آب و هوایی ایران بیشتر مناطق در این کشور بجز مناطق ساحلی شمالی تابش بسیار زیادی از خورشید دریافت می کنند که در وضعیت های مختلف آب و هوایی ثبت و اندازه گیری شده است [۴۳].

الف-۲ اطلاعات آب و هوایی

۶۳ ایستگاه بصورت یکنواخت در سرتاسر کشور برای جمع آوری داده ها برای هر وقفه ۱۰ دقیقه ای بوجود آمده اند. مقادیر داده بدست آمده (که شامل تابش و پارامترهای آب و هوایی چون دما و جهت باد) به اندازه کافی وجود داشته و وسعت کشور به اندازه کافی بزرگ است که بتوان تخمین های قابل قبول و قابل اعتمادی از سطوح تابش در مناطق مختلف زد. داد های فتوولتاییک و پارامترهای مشخصه تحت شرایط استاندارد تاکید میکند که مناطقی با تابش افقی در حدود 1000 W/m^2 از لحاظ اقتصادی برای کاربردهای فتوولتاییک مقرون به صرفه هستند. تابش مورد نیاز برای پیاده سازی منطقه های فتوولتاییک در حدود 500 W/m^2 است. دلگان(در استان سیستان و بلوچستان)، ماهشهر(در استان خوزستان)، شوشتر(در استان خوزستان)، آباد(در استان فارس)، فدشک(در استان خراسان همیشه بزرگ)، دارای مقادیر تابش متوسط بالاتری از کمترین مقدار مورد نیاز هستند که خود دلالتی بر این است که این ها مناطقی مناسب برای پیاده سازی حوزه های فتوولتاییک هستند. دیگر کاراکتری که بیانگر مناطق مناسب برای ساخت واحد های فتوولتاییک بوده، مناطقی هستند که اختلاف کمی بین بیشترین و کمترین مقادیر تابش افقی اختیار می کنند. در حقیقت زمانیکه این اختلاف کاهش یابد مقادیر بیشترین و کمترین به مقدار میانگین نزدیکتر خواهند شد. مقدار میانگین ممکن است بعنوان تخمین پیشنهادی برای تابش در مناطق انتخاب شود.

الف-۳ شاخص پاکی هوا

هنگامی که تابش خورشید از اتمسفر زمین می گذرد، بخشی از آن جذب شده و بخشی بازتاب می شود. این تضعیف در تابش تحت تاثیر رطوبت، گرد و غبار و ابرها یا حتی اختلافات دمایی میان لایه های اتمسفریک

می باشد. در میان همه این‌ها ابرها مهمترین نقش را بازی می کنند. تغییرات ممکن است با عنوان شاخص پاکی (تمیزی) (\overline{KT}) بیان گردد که معرف تابش خورشیدی کلی بر سطح زمین تقسیم بر تابش بیرون از محیط زمین در لایه بالایی اتمسفر است. بر طبق مقادیر گزارش شده، ایستگاه ماهشهر در استان خوزستان دارای بالاترین شاخص پاکی در حدود ۰,۹۳۴ در ماه جون است. بعبارت دیگر، ایستگاه بناب در استان آذربایجان شرقی دارای کمترین شاخص پاکی ماهیاه در حدود ۰,۲۷۶ در ماه می است. براساس میانگین سالیانه شاخص پاکی، بیشترین و کمترین مقادیر سالیانه برای این پارامتر ۰,۸۳۹ و ۰,۴۷۷ در ایستگاه‌های ماهشهر و سنار (در استان مازندران) به ترتیب هستند. میانگین شاخص پاکی برای تمام ایستگاه‌ها در ایران در حدود ۰,۶۳۰ می باشد [۴۳].

الف-۴ مقدار ساعات تابش خورشید

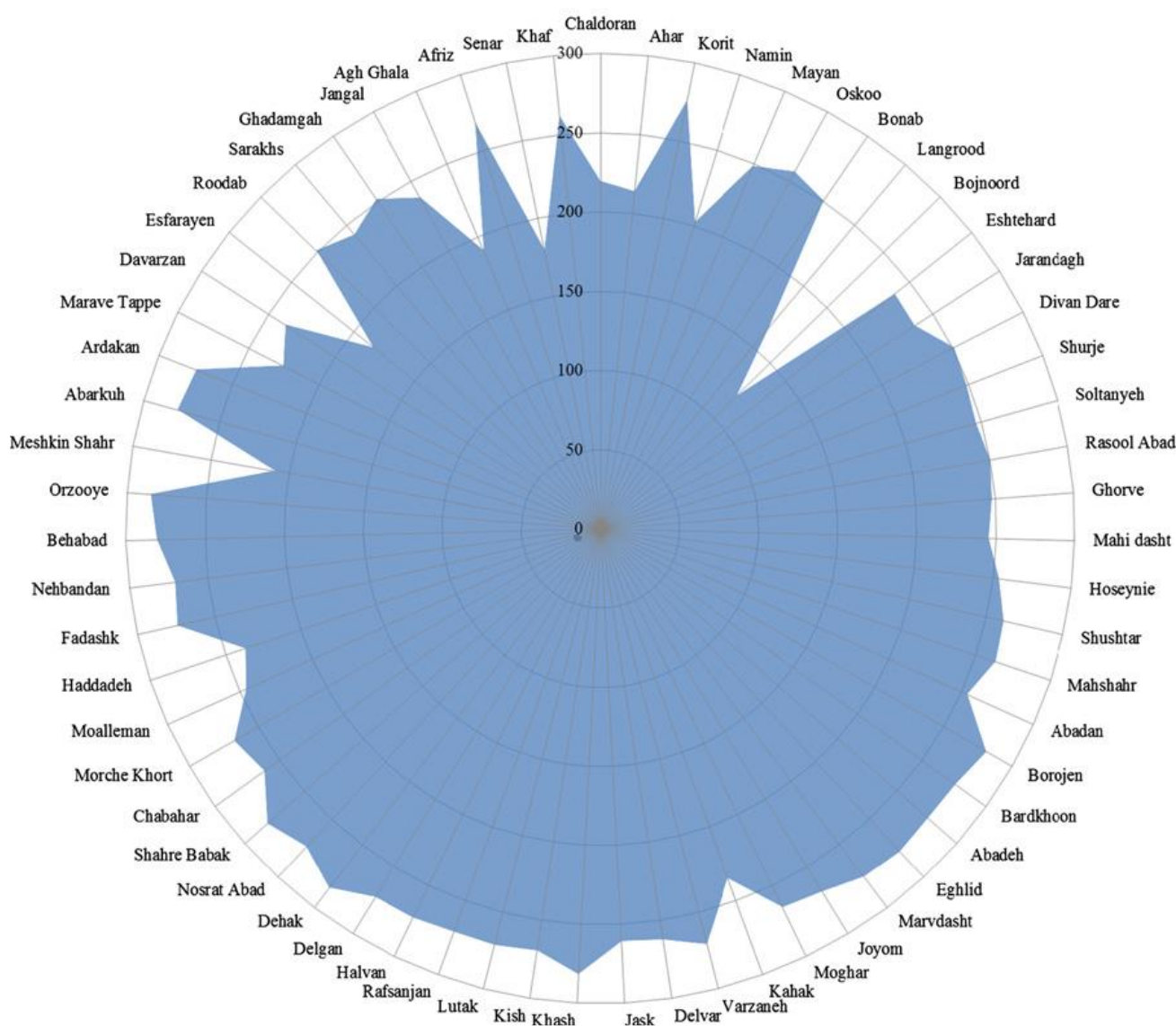
بررسی‌های منطقه ای لازم است تا اطلاعات جزئی درباره تابش خورشیدی در مناطق داده شده بدست آید. پارامتر تعیین کننده درگیر در تشخیص مناطق با پتانسیل لازم برای نصب تجهیزات خورشیدی و ژنراتورهای قدرت استفاده کننده از انرژی خورشید ساعات تابش خورشیدی است، که بصورت مدت زمانی که خورشید قابل رویت است تعریف شده است. مقدار ساعات تابش خورشیدی در ایستگاه‌های مطالعاتی با استفاده از ثبت کننده تابش آفتاب کمپل-استوکس اندازه گیری شده و بصورت میانگین سالیانه ساعات تابش آفتاب ماهیانه در شکل الف-۲ برای مناطق تحت مطالعه گزارش شده است [۴۳].

روشن است، ایستگاه آرزویه در استان کرمان دارای بالاترین میانگین سالیانه ساعات کل تابش خورشیدی در هر ماه (در حدود ۲۸۵ ساعت) است در حالیکه ایستگاه بجنورد در استان "خراسان همیشه بزرگ" دارای کمترین (در حدود ۱۲۰ ساعت) است. میانگین سالیانه کل ساعات تابش خورشیدی ماهیانه در ایران در حدود ۲۵۰,۷۹ ساعت بدست آمده است.

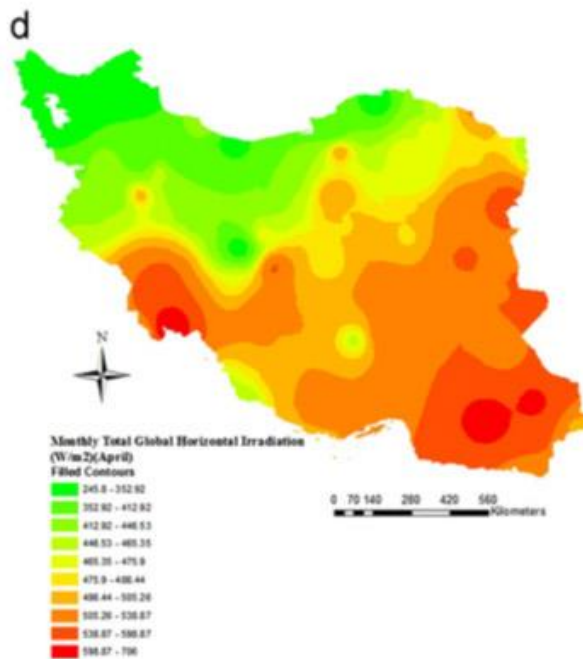
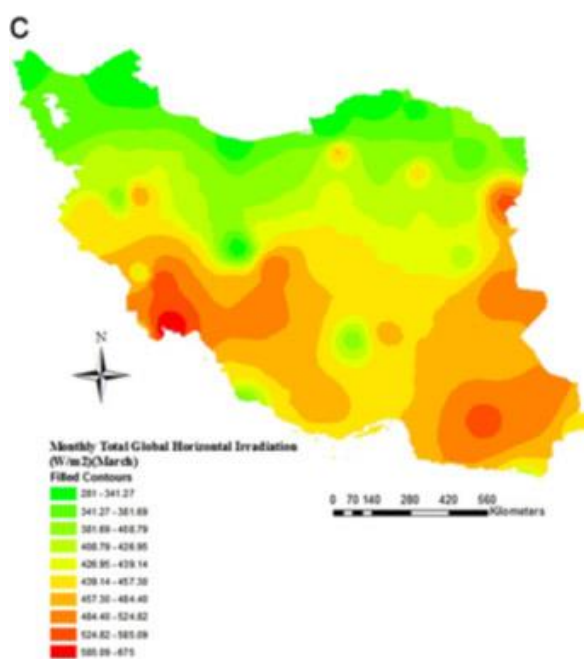
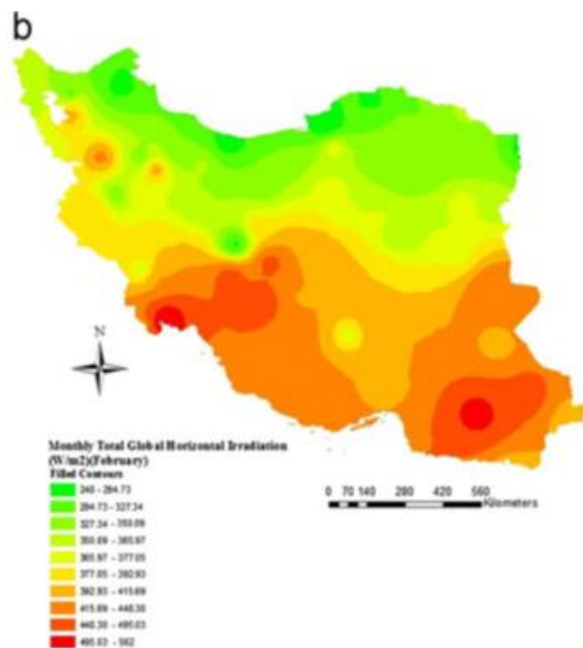
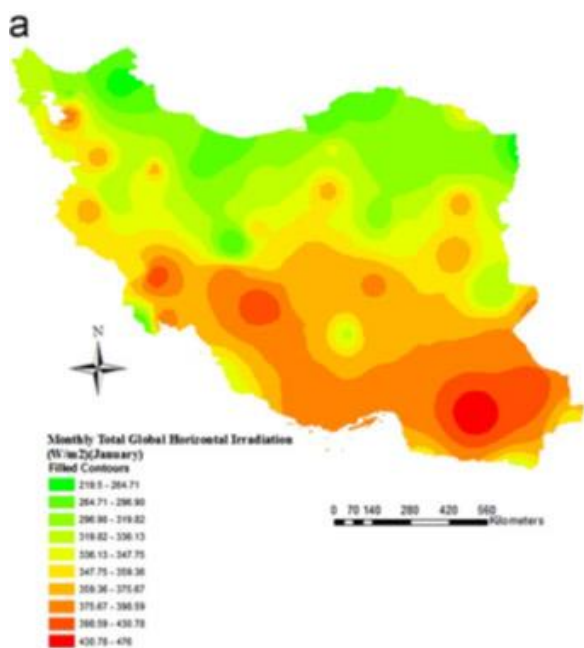
الف-۵ نقشه های GIS تابش خورشیدی در ایران

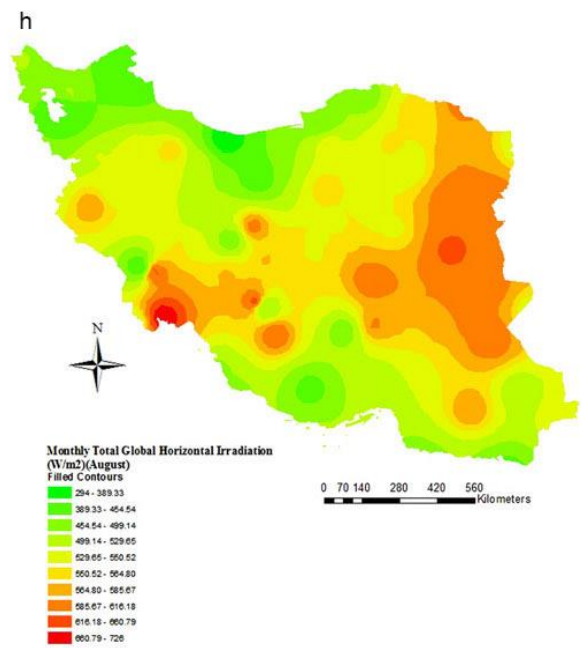
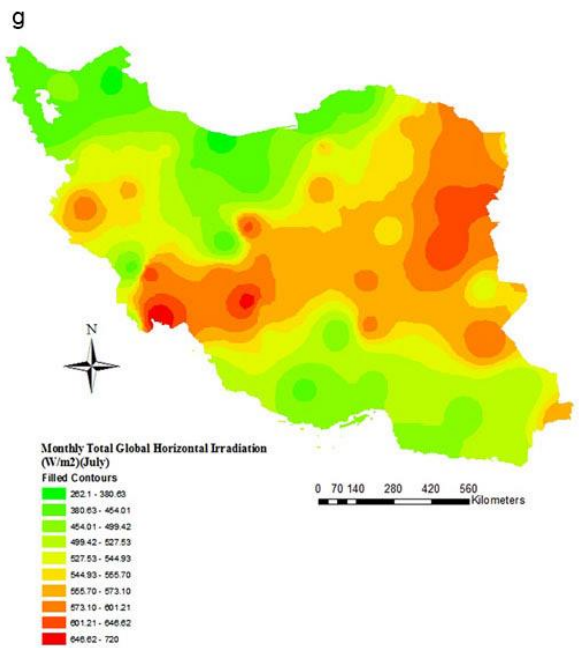
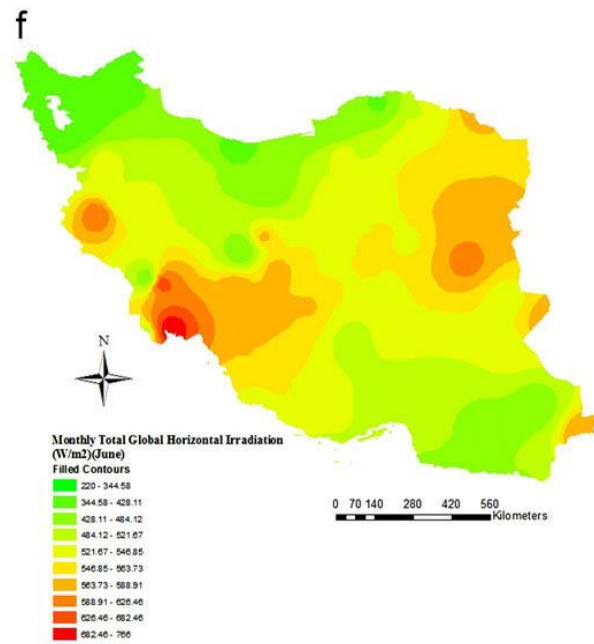
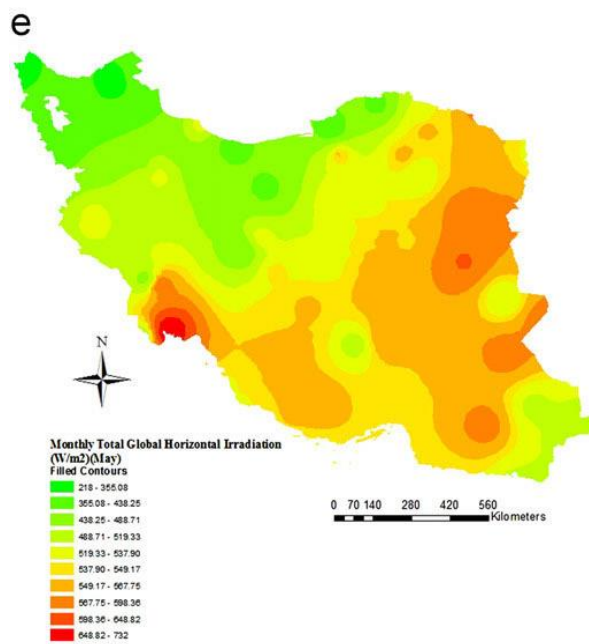
نقشه های GIS در زمینه های مختلفی بکار گرفته می شود. این نقشه ها حاوی اطلاعات بسیاری است چون جاده ها و پوشش های شهری و غیرشهری اعم از منابع طبیعی را نشان می دهند و می تواند انواع دیگری از اطلاعات چون ارتفاع، دما و ... نیز دربر بگیرد. نقشه های GIS می تواند در جهت بررسی و ارزیابی تابش فرودی در نقاط مختلف و ماه های متفاوت نیز مورد استفاده قرار گیرد.

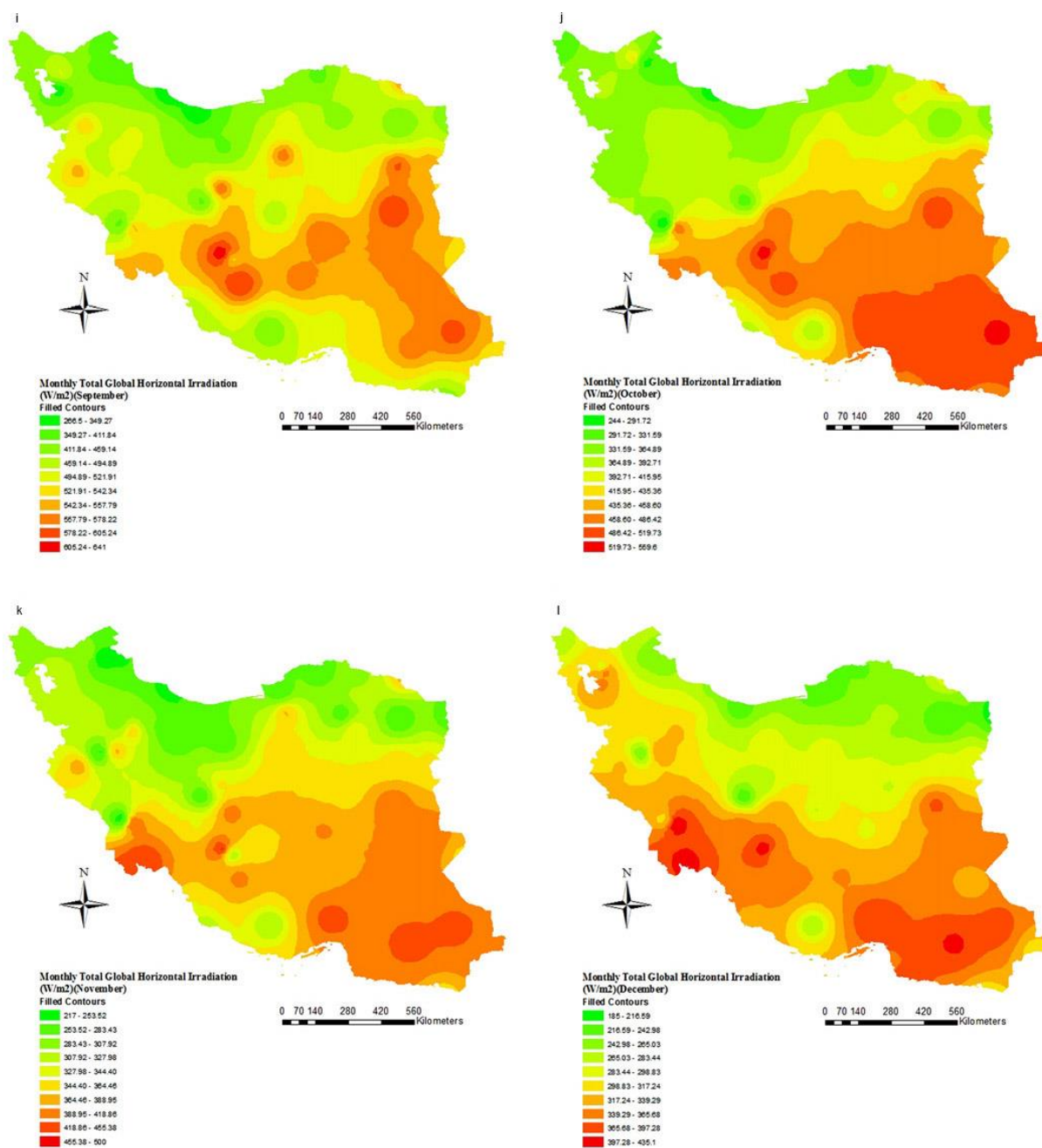
Annual average monthly sunshine hours



شکل (الف-۲) ساعات تابش خورشیدی در ایستگاه های هواشناسی کشور







شکل (الف-۳) نقشه های GIS تابش خورشیدی در ایران

با توجه به نقشه های GIS نشان داده شده در صفحات قبل می توان دید که با حرکت از شمال به جنوب کشور سطح تابش فرودی افزایش می یابد. نقاط شمالی کشور به دلیل داشتن آسمان ابری در بیشتر فصول سال، تابش کمتری دریافت می کند. هم چنین نقاط غربی کشور نیز در مقایسه با نقاط جنوبی و شرقی تابش کمتری را دریافت می کند. این مناطق بعلت وجود رشته کوه زاگرس و جو مدیترانه ای حاکم بر این نقاط در فصول سرد سال نیز تابش کمتری را در مقایسه با بهار و تابستان دریافت می کند. مناطق شرقی و جنوبی ایران از تابش فرودی بسیار بالایی به نسبت دیگر مناطق برخوردار هستند. از این رو بهره‌گیری از سیستم های خورشیدی می تواند در این مناطق با بازده بالایی همراه باشد. براساس نقشه های GIS بیشترین تابش خورشیدی در این مناطق در ماه آپریل (اردیبهشت و خرداد) اتفاق می افتد. در مناطق جنوبی، استان خوزستان بیشترین سطح از تابش را نسبت به دیگر مناطق دریافت می کند. البته همانطور که از شکل ها پیداست مناطق جنوبی استان خراسان در شرق نیز دارای سطح تابش بسیار بالایی بعلت وجود کویر لوت می باشد.

با توجه به این نقشه ها می توان اظهار داشت که مناطق مرکزی و جنوبی ایران (بجز مناطق ساحلی) و هم چنین مرکز و جنوب استان خراسان از قابلیت بسیار بالایی جهت راه اندازی سایت ها و نیروگاه های خورشیدی برخوردار بوده چرا که این مناطق سهم بسیار بالایی از تابش فرودی بر ایران را دریافت می کنند.

Abstract:

Photovoltaic cells consist of semiconductor materials which directly convert the solar radiation into electricity. All of the incident radiation could not be converted to the electricity and change into the heat. Increasing the cell temperature decreases the open circuit voltage which causes a drop of electricity conversion efficiency. One remedy to avoid the temperature increase of the PV system is the use of a photovoltaic-thermal hybrid solar system (or PVT) where the unfavorable absorbed heat from the cells is collected through an additional thermal unit. Therefore, a PVT system consists of photovoltaic and solar thermal components which produce both electricity and heat from one integrated component and improve the overall efficiency of the system. In this study, the effects of ferrofluids as a coolant on the overall efficiency of a PVT (photovoltaic thermal unit) system are experimentally investigated. The fluids considered in the experiment are distilled water and a ferrofluid (Fe_3O_4 -water) with 1% and 3% concentrations by weight (wt%). The experiments were performed in indoor conditions under two constant solar radiations (1100 W/m^2 and 600 W/m^2) using a solar simulator. Due to the unique characteristic behavior of ferrofluids, their rheological and thermophysical properties can be changed under an external magnetic field. The ferrofluids in this study were placed under constant and alternating magnetic fields in the cooling section in order to investigate the effect of both types of magnetic fields on the overall efficiency of a PVT system. The results show that by using a 3 wt% ferrofluid, the overall efficiency of the system improved by 45% and when an alternating magnetic field with 50 Hz frequency was applied, the overall efficiency increased to about 50% compared to that of the distilled water as coolant fluid. It is also observed that using a constant magnetic field for a ferrofluid has almost no effect on the system performance and is very close to that of the system when no field is applied. It was observed that by adding a thermal collector to a PV system and using a 3 wt% ferrofluid under an alternating magnetic field with frequency of 50 Hz, the total exergy can be increased as high as 48 W while this amount for distilled water and PV system with no collector were 33 W and 20 W, respectively.

Keywords: Photovoltaic thermal (PVT), Fe_3O_4 -water nano ferrofluid, nano ferrofluid, Heat transfer enhancement, Alternating and constant magnetic field



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

**Experimental investigation of the effect of magnetic
nanofluid on the efficiency of a PVT system in
presence of a magnetic field**

Matin Ghadiri Yazdi

Supervisor:

Dr. Mohammad Jabari Moghadam

Dr. Mohammad Passandideh-Fard

September 2015