

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

رساله دکتری مهندسی تبدیل انرژی

بررسی تجربی افزایش راندمان صفحه خورشیدی با استفاده از سیستم خنک کاری جت برخوردی

نگارنده: محمد جاویدان

استاد راهنما

دکتر علی جباری مقدم

اسفند ۱۳۹۹



مدیریت تحصیلات تکمیلی

باسمه تعالی

شماره: ۲۹۹/۱۷۵
تاریخ: ۱۴۰۲/۳/۲۰
ویرایش:

پیوست شماره ۲

دانشکده: مکانیک

گروه: تبدیل انرژی

رساله دکتری آقای محمد جاویدان
تحت عنوان: بررسی تجربی افزایش راندمان صفحه خورشیدی با استفاده از سیستم خنک کاری جت پرخوردی
در تاریخ ۱۳۹۹/۱۲/۲۶ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک رساله دکتری ارزیابی گردید و با درجه خوب.....
مورد پذیرش قرار گرفت.

اعضا	اساتید مشاور	اعضا	اساتید راهنما
---	نام و نام خانوادگی:	علی جباری مقدم	نام و نام خانوادگی: دکتر علی جباری مقدم
---	نام و نام خانوادگی:	---	نام و نام خانوادگی:

اعضا	نماینده تحصیلات تکمیلی	اعضا	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی: دکتر علی سرشته داری		نام و نام خانوادگی: دکتر نوروز محمد نوری
			نام و نام خانوادگی: دکتر محسن نظری
			نام و نام خانوادگی: دکتر علی خالقی

تقدیم به همسر

که سایه مهربانیش سایه سار زندگیم می باشد. او که اسوه صبر و تحمل و همراه و همگام من

بوده و مشکلات مسیر را برایم تسهیل نموده و به آنان که نفس خیرشان و دعای روح

پرورشان بدرقه راهم بود.

تشکر و قدردانی

از استاد کرامی جناب آقای دکتر علی جباری مقدم

که با انتقال معلومات، تجربیات ارزشمند و کوشش‌های مستمر راهنما و راه‌گشای شمر

بخش اینجانب

در اتمام و اکمال پایان نامه بودند.

تعمدنامه

اینجانب **محمد جاویدان** دانشجوی دوره دکتری رشته مکانیک دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تجربی افزایش راندمان صفحه خورشیدی با استفاده از سیستم خنک کاری جت بر خوردی تحت راهنمایی دکتر علی جبّاری مقدم 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 ۹۹/۱۰/۱

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.

چکیده

یکی از این تکنولوژی‌هایی که برای تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی مورد توجه قرار گرفته، تکنولوژی فتوولتائیک (PV) است. کارایی یک ماژول فتوولتائیک، به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر دمای سطح آن قرار دارد. مطالعات نشان می‌دهد که کارایی ماژول‌های PV به ازای هر ۱ درجه سانتیگراد افزایش در دمای سطح آن‌ها، ۰/۳ درصد کاهش می‌یابد. پیدا کردن یک روش کارآمد برای خنک کاری ماژول‌های PV، یک مسئله مهم برای بهبود عملکرد و افزایش توان تولیدی آن‌ها است. با بررسی مطالعات انجام شده در مورد سیستم‌های خنک کننده ماژول PV، می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از سیستم خنک کننده برخورد جت سیال (JIC)، می‌توان به توان تولیدی بالایی دست یافت. بهره‌وری و عملکرد الکتریکی سیستم PV/JIC می‌تواند با طراحی هندسه کارآمد آرایه‌های جت، افزایش یافته و با بهینه‌سازی پارامترهای مربوط به نازل‌ها به توزیع دمای یکنواخت ماژول PV دست یافت. در این پژوهش، استفاده از سیستم JIC برای کاهش دمای سطح یک ماژول فتوولتائیک و افزایش توان تولیدی آن مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا آب خالص به عنوان سیال خنک‌کننده مورد استفاده قرار گرفته و بهینه‌سازی هندسه سیستم JIC با استفاده از آب انجام شده است و سپس، نانو سیال SiC/water برای خنک کاری به کار برده شده است. برای بدست آوردن توزیع یکنواخت دما در ماژول PV، پارامترهای اصلی مانند قطر نازل ($d_n=1-2\text{ mm}$)، تعداد و چیدمان‌های مختلف برای نازل‌ها ($N=8-24$)، میزان دبی مایع خنک‌کن ($\dot{m}$) و فاصله نازل‌ها ($H=5-55\text{ mm}$) از سطح پشتی ماژول مورد بررسی قرار گرفته است. اصالت این تحقیق در دو مفهوم یافت می‌شود. در ابتدا با استفاده از خنک کاری با آب خالص، دمای ۱۲ ناحیه کوچک روی سطح یک ماژول PV اندازه‌گیری شده و حداکثر و حداقل دما و همچنین دامنه تغییرات داده‌های دما برای سیستم خنک کاری JIC گزارش شده تا اثر سیستم JIC پیشنهادی بر توزیع یکنواخت دمای سطح ماژول بررسی شود. شاخص یکنواختی دما برای به تصویر کشیدن کارایی خنک‌کنندگی مطلوب در سیستم JIC پیشنهادی، تعریف و بررسی شد. دوماً، روش سطح پاسخ (RSM) برای تعیین شرایط عملیاتی بهینه در سیستم JIC به کار گرفته شده است. با استفاده از JIC و آب به عنوان سیال خنک‌کننده، دمای متوسط ماژول از ۶۴ درجه سانتیگراد در بدترین حالت به ۴۳/۳ درجه سانتیگراد کاهش یافت و توان تولیدی در این شرایط به ۶/۵۸ وات رسید. توان خروجی ماژول فتوولتائیک با افزایش دبی جرمی آب و تعداد نازل‌ها افزایش یافت. بالعکس، با افزایش فاصله نازل از ماژول فتوولتائیک و قطر نازل، توان خروجی ماژول فتوولتائیک کاهش یافت. همچنین، پاسخ‌های پیش‌بینی شده (دما و توان خروجی) در نقطه بهینه ۳۳/۶۸ درجه سانتیگراد و ۸/۶۱۰ وات در دبی ۰/۱۲ kg/s، تعداد نازل ۲۴، قطر نازل ۱/۰۸ میلی‌متر و فاصله نازل تا ماژول برابر ۵/۱ میلی‌متر بودند. پس از استفاده از آب به عنوان سیال خنک‌کننده و به دست آوردن هندسه و چیدمان مناسب برای نازل‌ها، استفاده از نانو سیال SiC/water با غلظت‌های مختلف ($\phi=0.25$) (1.1%wt)، مورد آزمایش قرار گرفته و اثر استفاده از نازل تک سوراخه و نازل چند سوراخه بر عملکرد

الکتریکی و حرارتی ماژول PV بررسی شده است. نتایج نشان داد که استفاده از نازل های چند سوراخه اثر چشمگیرتری در کاهش دمای ماژول PV نسبت به نازل های تک سوراخه دارد. از طرفی، مشاهده شده است که با افزایش غلظت نانو سیال، شاخص یکنواختی دما در حال کاهش بوده که به معنای توزیع یکنواخت تر دمای سطح ماژول به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو سیال و افزایش میزان انتقال حرارت از سطح ماژول به جت برخوردی است. با افزایش غلظت نانو سیال از ۰/۲۵ تا ۱ درصد وزنی منجر به کاهش چشمگیر دمای سطح ماژول شده است. با افزایش غلظت نانوسیال از ۱ به ۱/۱ درصد وزنی، میزان کاهش دمای سطح ماژول کاهش پیدا کرده است که به معنای این است که استفاده از نازل های چند سوراخه و نانو سیال SiC با غلظت ۱ درصد وزنی یک حالت انتخابی مناسب بوده و توانایی بالایی برای توزیع یکنواخت دمای سطح ماژول دارد. بنابراین این حالت به عنوان کارآمدترین حالت، برای خنک کاری با جت برخوردی سیال پیشنهاد می شود.

کلمات کلیدی: ماژول فتوولتائیک، خنک کاری، جت سیال، نانو سیال، انرژی خورشیدی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

1-Experimental Investion On Thermal Management Of a Photovoltaic Module Using Water-Jet impingement Cooling. Energy Conversion and Management, 228 (2021) 113686. (published)

2-“Overall Performance Of a Photovoltaic Module Under The Influence Of a Jet-Cooling System Using Sic/water Nanofluid”. (under review)

فهرست مطالب

فصل ۱ : مقدمه.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۱-۲ اهداف رساله.....	۴
۱-۳ ساختار رساله.....	۵
فصل ۲ مروری بر منابع اطلاعاتی.....	۷
۲-۱ مقدمه.....	۸
۲-۲ انرژی خورشیدی.....	۸
۲-۳ تاریخچه سلول های خورشیدی.....	۱۲
۲-۴ سیستم های فتوولتائیک.....	۱۷
۲-۴-۱ اساس کارکرد سلول های فتوولتائیک.....	۱۹
۲-۴-۲ اثرات افزایش دمای سطح ماژول های فتوولتائیک بر عملکرد آنها.....	۲۱
۲-۴-۳ روش های خنک سازی ماژول های فتوولتائیک.....	۲۲
۲-۵ مروری بر جت های سیال.....	۳۲
۲-۵-۱ جت های برخوردی.....	۳۲
۲-۵-۲ معرفی جت های نوسانی.....	۴۰
۲-۵-۳ معرفی جت های مصنوعی.....	۴۱
۲-۵-۴ کاربرد جت های برخوردی در بهبود انتقال حرارت.....	۴۲
۲-۶ پیشینه تحقیق.....	۴۵
۲-۶-۱ خنک کاری ماژول های فتوولتائیک با استفاده از اسپری آب یا برخورد جت سیال.....	۴۵
۲-۶-۲ کاربرد نانو سیالات در خنک کاری ماژول های فتوولتائیک.....	۵۴
فصل ۳ : مواد و روش ها.....	۶۷
۳-۱ مقدمه.....	۶۸
۳-۲ ست آپ آزمایشگاهی.....	۶۸
۳-۲-۱ دستگاه های آزمایشگاهی و سیستم جمع آوری داده در حضور آب خالص.....	۶۸
۳-۲-۲ دستگاه های آزمایشگاهی و سیستم جمع آوری داده در حضور نانو سیال.....	۷۵

۳-۳	تحلیل عدم قطعیت	۷۷
۳-۴	طراحی آزمایش	۷۹
فصل ۴	بحث و نتیجه‌گیری	۸۳
۴-۱	مقدمه	۸۴
۴-۲	نتایج استفاده از آب خالص به عنوان سیال خنک کننده	۸۴
۴-۲-۱	داده‌های تجربی برای توزیع دما در ماژول PV	۸۴
۴-۲-۲	نتایج دقت مدل	۹۵
۴-۲-۳	خروجی الکتریکی ماژول PV	۱۰۰
۴-۲-۴	تاثیر JIC بر عملکرد حرارتی و توان خروجی ماژول PV	۱۰۲
۴-۲-۵	بهینه‌سازی	۱۱۲
۴-۳	نتایج استفاده از نانو سیال به عنوان سیال خنک کننده	۱۱۴
۴-۳-۱	داده‌های تجربی برای توزیع دما در ماژول PV	۱۱۴
۴-۳-۲	خروجی الکتریکی ماژول PV	۱۱۹
۴-۳-۳	بهینه‌سازی	۱۲۳
فصل ۵	جمع بندی و پیشنهادات	۱۲۹
۵-۱	جمع‌بندی	۱۳۰
۵-۲	پیشنهادهای	۱۳۳
	پیوست ها (محاسبه ضریب جابجایی و عدد ناسلت)	۱۳۴
	مراجع	۱۵۵

فهرست جداول

جدول ۱-۲. خلاصه‌ای از روش‌های مختلف خنک‌کننده کاربردی برای افزایش کارایی ماژول های PV.	۳۱
جدول ۳-۱. ویژگی‌های الکتریکی ماژول پلی کریستالی PV	۷۱
جدول ۳-۲. اجزای سیستم، دقت و ماکزیمم عدم قطعیت مطلق پارامترهای خروجی	۷۸
جدول ۳-۳. سطوح تحقیق شده در متغیرهای آزمایشگاهی	۸۱
جدول ۴-۱. دمای میانگین، ماکزیمم و مینیمم در ماژول PV، و دامنه تغییرات داده‌های دما در $dn = 1 \text{ mm}$	۸۷
جدول ۴-۲. دمای میانگین، ماکزیمم و مینیمم در ماژول PV، و دامنه تغییرات داده‌های دما در $dn = 2 \text{ mm}$	۸۸
جدول ۴-۳. محدوده آزمایشگاهی پارامترهای مستقلى که در طراحی CCD استفاده شده‌اند.	۹۶
جدول ۴-۴. تست ANOVA برای توابع پاسخ $Y1$ (دمای میانگین سطح) و $Y2$ (توان)	۹۷
جدول ۴-۵. مقادیر P_{net} ، PP_{pump} ، $\% P(\max) \text{ increase}$ و COE برای $H = 5 \text{ mm}$ ، $N = 24$ در	
دبیهای جرمی و dn های متفاوت	۱۰۹
جدول ۴-۶. محدودیتهای بهینه سازی، مقادیر بهینه شدهی متغیرها و پاسخهای پیشبینی شده در	
نقطه بهینه	۱۱۳
جدول ۴-۷. مقادیر P_{net} ، PP_{pump} و ضریب COE برای استفاده از جت برخوردی با نازل های چند	
سوراخه	۱۲۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲. تصویر چارلز فریتس و سلول ساخته شده توسط این دانشمند [۱۴]..... ۱۲
- شکل ۲-۲. آزمایشگاه بل در ایالت متحده امریکا [۱۷]..... ۱۳
- شکل ۳-۲. تغییرات بازده سلولهای خورشیدی [۲۸]..... ۱۷
- شکل ۴-۲. جذب فوتون با انرژیهای متفاوت در سلول خورشیدی [۲۴]..... ۱۸
- شکل ۵-۲. فتوولتائیک صفحه تخت ثابت..... ۲۰
- شکل ۶-۲. ایستگاه سلولهای خورشیدی تحت تمرکز با توان ۱۹۰ kW استرالیا [۲۶]..... ۲۱
- شکل ۷-۲. توان بیشینه خروجی پنل بر حسب دما [۳۲]..... ۲۳
- شکل ۸-۲. روش خنککاری با قراردادن ماژول روی نگهدارنده شناور روی آب [۳۶]..... ۲۵
- شکل ۹-۲. روش استفاده از PCM در محفظه پشت ماژول [۳۷]..... ۲۶
- شکل ۱۰-۲. روش غوطه‌ور سازی ماژول خورشیدی در آب [۳۹]..... ۲۷
- شکل ۱۱-۲. روش استفاده از گردش اجباری آب در پشت ماژول به منظور خنککاری [۴۰]..... ۲۸
- شکل ۱۲-۲. روش اسپری کردن آب روی سطح ماژول [۴۱]..... ۲۹
- شکل ۱۳-۲. گردش اجباری هوا در پشت ماژول به منظور خنک سازی آن [۴۱]..... ۳۰
- شکل ۱۴-۲. ساختار جت سیال برخوردی بر روی صفحه تخت [۵۵]..... ۳۳
- شکل ۱۵-۲. شماتیک جت سیال برخوردی بر روی صفحه تخت [۵۸]..... ۳۵
- شکل ۱۶-۲. تشکیل لایه مرزی در سطح برخورد [۵۸]..... ۳۷
- شکل ۱۷-۲. الف) نمایی از جت آزاد، ب) جت محدود [۶۰]..... ۳۸
- شکل ۱۸-۲. الف) نمایی از جت غوطه‌ور، ب) جت سطح آزاد [۶۰]..... ۳۹
- شکل ۱۹-۲. نمایی از یک جت نوسانی [۶۲]..... ۴۱
- شکل ۲۰-۲. نمایی از یک مولد جت مصنوعی [۶۳]..... ۴۲
- شکل ۲۱-۲. عوامل موثر بر انتقال حرارت جت برخوردی..... ۴۳
- شکل ۲۲-۲. پیکربندی مختلف جت برخوردی [۶۴]..... ۴۴
- شکل ۲۳-۲. استفاده از روش اسپری کردن آب بر روی سطح بالایی ماژول فتوولتائیک [۶۶]..... ۴۶
- شکل ۲۴-۲. استفاده از روش اسپری کردن آب بر روی سطوح بالایی و پایینی ماژول فتوولتائیک [۴۸]..... ۴۷

- شکل ۲-۲۵. شماتیک سیستم خنک کاری ماژول فتوولتائیک با استفاده از روش برخورد دسته جت سیال [۶۷]. ۴۸
- شکل ۲-۲۶. ست آپ آزمایشگاهی خنک کاری ماژول فتوولتائیک با استفاده از روش برخورد جت سیال [۶۷]. ۴۹
- شکل ۲-۲۷. استفاده از روش برخورد دسته جت سیال برای خنک سازی ماژول فتوولتائیک [۵۴]. ۵۰
- شکل ۲-۲۸. شماتیک سیستم خنککاری ماژول فتوولتائیک با استفاده از روش برخورد جت آب [۶۶]. ۵۱
- شکل ۲-۲۹. شماتیک سیستم آزمایشگاهی استفاده از روش برخورد جت آب برای خنک سازی ماژول فتوولتائیک [۶۹]. ۵۲
- شکل ۲-۳۰. شماتیک سیستم آزمایشگاهی استفاده از روش اسپری کردن آب برای خنک سازی ماژول فتوولتائیک [۷۰]. ۵۳
- شکل ۲-۳۱. عکس واقعی سیستم آزمایشگاهی استفاده از روش اسپری کردن آب برای خنک سازی ماژول فتوولتائیک [۷۰]. ۵۳
- شکل ۲-۳۲. نمایی از سیستم آزمایشگاهی بکه ار گرفته شده توسط یوسفی و همکاران [۷۴]. ۵۵
- شکل ۲-۳۳. عکس واقعی سیستم آزمایشگاهی به کار گرفته شده توسط قدیری و همکاران [۵۲]. ۵۷
- شکل ۲-۳۴. شماتیکی از سیستم آزمایشگاهی به کار گرفته شده توسط قدیری و همکاران [۵۲]. ۵۸
- شکل ۲-۳۵. عکس واقعی سیستم آزمایشگاهی به کار گرفته شده توسط سردارآبادی و همکاران [۷۹]. ۶۱
- شکل ۲-۳۶. شماتیکی از سیستم آزمایشگاهی به کار گرفته شده توسط سردارآبادی و همکاران [۷۹]. ۶۱
- شکل ۲-۳۷. عکس واقعی سیستم آزمایشگاهی به کار گرفته شده توسط آبرومند و همکاران [۸۱]. ۶۳
- شکل ۲-۳۸. شماتیکی از سیستم آزمایشگاهی به کار گرفته شده توسط آبرومند و همکاران [۸۱]. ۶۳
- شکل ۲-۳۹. شماتیکی از سیستم خنککاری ماژول PV پیشنهادی توسط رادوان و همکاران [۸۲]. ۶۵
- شکل ۲-۴۰. برش عرضی از سیستم PV/T بررسی شده توسط آباده و همکاران [۸۳]. ۶۶
- شکل ۳-۱. شماتیک (الف) و عکس واقعی (ب) ست آپ آزمایشگاهی طراحی شده ۶۹
- شکل ۳-۲. (الف) عکس واقعی ماژول PV، (ب) عکس پشت صفحه ماژول PV، (ج) ابعاد ماژول PV و مکان نمایی ترموکوپل ها ۷۰

- شکل ۳-۳. (الف) شماتیک سیستم JIC با ماژول PV، (ب) طراحی نازل‌ها و ظرف شیشه‌ای جمع آوری آب، (ج) طراحی سیستم JIC با طرح‌های متفاوت از تعداد نازل‌ها ۷۳
- شکل ۳-۴. عکس واقعی نازل‌های طراحی شده ۷۴
- شکل ۳-۵. (الف) چیدمان سیستم جت با نازل‌های تک سوراخه (ب) چیدمان سیستم جت با نازل‌های ۸ سوراخه ۷۵
- شکل ۴-۱. (الف) دمای محلی برای حالتی که سیستم سرمایشی وجود ندارد، (ب) دمای میانگین ماژول PV بر حسب زمان برای سیستم JIC و سیستمی که سرمایش ندارد ($dn = 2\text{mm}$, $N=8$) ۸۵
- شکل ۴-۲. تغییرات شاخص یکنواختی دما (TU_i) بر حسب دبی جرمی در $dn = 1\text{mm}$ و سه فاصله متفاوت از نازل تا هدف. (الف) $N = 8$ ، (ب) $N = 24$ ۹۳
- شکل ۴-۳. تغییرات شاخص یکنواختی دما (TU_i) بر حسب دبی جرمی در $dn = 2\text{mm}$ و سه فاصله متفاوت از نازل تا هدف. (الف) $N = 8$ ، (ب) $N = 24$ ۹۴
- شکل ۴-۴. نمودار مقادیر پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی (الف) دمای میانگین و (ب) توان سطح ۹۹
- شکل ۴-۵. تاثیر دبی جرمی آب بر مشخصات (الف) توان-ولتاژ و (ب) جریان-ولتاژ در ماژول PV ($N = 8$, $dn = 2\text{mm}$, $H/dn = 15$) ۱۰۱
- شکل ۴-۶. نمودار پاسخ سطح برای بررسی تاثیر dn و H بر (الف) دمای سطح و (ب) توان خروجی ماژول PV ($N=16$) ۱۰۳
- شکل ۴-۷. نمودار پاسخ سطح در بررسی تاثیرات N و H بر روی (الف) دمای سطح و (ب) توان خروجی ماژول PV ($dn = 1.5\text{mm}$ و $\dot{m} = 0.07 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$) ۱۰۶
- شکل ۴-۸. نمودار پاسخ سطح در بررسی تاثیرات N و دبی جرمی بر روی (الف) دمای سطح و (ب) توان خروجی ماژول PV ($dn = 1.5\text{mm}$ و $H = 30\text{mm}$) ۱۰۷
- شکل ۴-۹. تاثیر استفاده از جت نانو سیال با نازل‌های تک سوراخه بر تغییرات $T_{s,av}$ نسبت به زمان ۱۱۵
- شکل ۴-۱۰. تاثیر استفاده از جت نانوسیال با نازل‌های چند سوراخه بر تغییرات $T_{s,av}$ نسبت به زمان ۱۱۶
- شکل ۴-۱۱. اثر استفاده از جت نانوسیال با نازل‌های تک سوراخه بر روی TU_i ۱۱۷
- شکل ۴-۱۲. اثر استفاده از جت نانوسیال با نازل‌های چند سوراخه بر روی TU_i ۱۱۸

- شکل ۴-۱۳. تاثیر غلظت نانوسیال بر مشخصه های (الف) ولتاژ- توان و (ب) جریان-ولتاژ ماژول PV برای برخورد جت نازل های تک سوراخه ($H = 5.1 \text{ mm}$, $G =$, $d = 1.08 \text{ mm}$, $\dot{m} = 0.12 \text{ kg/s}$).
 ۱۲۰..... 1000 W/m2
- شکل ۴-۱۴. تاثیر غلظت نانوسیال بر مشخصه های (الف) ولتاژ- توان و (ب) جریان-ولتاژ ماژول PV برای برخورد جت نازل های ۸ سوراخه ($H = 5.1 \text{ mm}$, $G =$, $d = 1.08 \text{ mm}$, $\dot{m} = 0.12 \text{ kg/s}$).
 ۱۲۲..... 1000 W/m2
- شکل ۴-۱۵. تاثیر شدت تشعشع بر مشخصه های توان تولیدی ماژول برای (الف) برخورد جت نازل های تک سوراخه و (ب) برخورد جت نازل های ۸ سوراخه ($H =$, $d = 1.08 \text{ mm}$, $\dot{m} = 0.12 \text{ kg/s}$).
 ۱۲۳..... 5.1 mm
- شکل ۴-۱۶. تاثیر دبی جریان بر توان تولیدی ماژول برای برخورد جت نازل های ۸ سوراخه..... ۱۲۴
- شکل ۴-۱۷. HTi برای آب و نانوسیال $\varphi = 1.1 \text{ wt}\%$ با نازل های چند سوراخه. ۱۲۷
- شکل ۴-۱۸. ETi برای آب و نانوسیال $\varphi = 1.1 \text{ wt}\%$ با نازل های چند سوراخه. ۱۲۸

فهرست علائم

علائم	معادل انگلیسی	معادل فارسی
β	Module temperature change coefficient	ضریب تغییرات دمایی ماژول
η	Electrical efficiency at module operating temperature	بازده الکتریکی در دمای عملکرد ماژول (T)
η_{ref}	Electrical efficiency at reference temperature	بازده الکتریکی در دمای مرجع (T_{ref})
ρ_{nf}	Nanofluid density	دانسیتة نانو سیال
ρ_n	Density of nanoparticles	دانسیتة نانو ذرات
ρ_f	Base fluid density	دانسیتة سیال پایه
φ	Weight fraction of nanoparticles in suspension	جزء وزنی نانو ذرات در سوسپانسیون
ϕ	Volumetric component of nanoparticles in suspension	جزء حجمی نانو ذرات در سوسپانسیون
μ_f	Base fluid viscosity	ویسکوزیتة سیال پایه
μ_{nf}	Effective viscosity of Nanofluid	ویسکوزیتة موثر نانو سیال
k_p	Thermal conductivity of nanoparticles	ضریب هدایت حرارتی نانو ذرات
k_f	Fluid thermal conductivity	ضریب هدایت حرارتی سیال
k_{nf}	Effective thermal conductivity of Nanofluid	ضریب هدایت حرارتی موثر نانو سیال
m_n	Mass of nanoparticles	جرم نانو ذرات
m_f	Mass of fluid	جرم سیال
Nu_0	Nusselt number of rest point	عدد ناسلت نقطه‌ی سکون
Nu_{ave}	Average Nusselt number	عدد ناسلت متوسط
Re	Reynolds number	عدد رینولدز
Re_{dn}	Jet Reynolds number	عدد رینولدز جت
Pr	Prandtl number	عدد پرانتل
Z/B	Dimensional distance of the nozzle to the plane	فاصله‌ی بی بعد نازل تا صفحه‌ی برخورد
R	Dimensionless radius from rest point	شعاع بدون بعد از نقطه سکون $R=r/d$
a, b, c	Polynomial functions of R in the equation of Hong and Wall	توابع چند جمله‌ای از R در معادله هانگ و وال
H	Height to width ratio of the jet R in the equation of Hong and Wall	نسبت ارتفاع به عرض جت
P_{max}	Maximum power	توان ماکزیمم

P_{Pump}	Pumping power	توان پمپاژ
P_{net}	Net power	توان خالص
V_{max}	Maximum voltage	ولتاژ ماکزیمم
V_m	Voltage at maximum power	ولتاژ در توان ماکزیمم
V_{oc}	Open circuit voltage	ولتاژ مدار باز
I_{max}	Maximum current intensity	شدت جریان ماکزیمم
I_m	Electrical current at maximum power	جریان در توان ماکزیمم
I_{sc}	Short circuit current	جریان اتصال کوتاه
JIC	Jet Impingement Cooling	سیستم سرماساز با برخورد جت
PV	Photovoltaic	فتوولتائیک
H	Jet distance to PV module	فاصله جت تا ماژول PV
N	Number of nozzles	تعداد نازل
d_n	Nozzle diameter	قطر نازل
$\dot{m}$	Mass flow (Kg/S)	دبی جرمی
T	Temperature	دما
T_{ref}	Reference temperature	دمای مرجع
$T_{s,av}$	verage module surface temperature	میانگین دمای سطح ماژول
TU_i	Temperature uniformity index	شاخص یکنواختی دما
A_t	Total Area	مساحت کل
U	Jet Velocity	سرعت جت
ΔP	Pressure drop	افت فشار
Q	Volumetric flow	دبی حجمی
Cd	Nozzle discharge coefficient	ضریب تخلیه نازل
δR	Uncertainty of the R function	عدم قطعیت تابع R
δv_i	Uncertainty of the parameter v_i	عدم قطعیت پارامتر v_i
$\delta R / \delta v_i$	Partial deviation of R from v_i	انحراف جزئی R از v_i
x_j و x_i	Variables in Design of experiments	متغیرها در طراحی آزمایش
Y	Response in Design of experiments	پاسخ در طراحی آزمایش
b_0 و b_i های دیگر	Adjustment parameters Design of experiments	پارامترهای تنظیم در طراحی آزمایش
e_i	Error rate in Design of experiments	میزان خطا در طراحی آزمایش
DOE	Design of experiments	طراحی آزمایش
RSM	Response Surface Methodology	روش پاسخ سطح
CCD	Central-composite design	طراحی ترکیب مرکزی

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ مقدمه

توافقات بین المللی با هدف کاهش سطح آلودگی در سال‌های اخیر بسیار اهمیت یافته و افزایش جهانی دمای هوا باعث حرکت به سوی محدود شدن انتشارات دی اکسید کربن شده است. در آینده نه چندان دور، منابع سوخت‌های زیرزمینی تمام شده و قبل از آن بشر باید منابع جدیدتری را جستجو کند و از کارآیی آن‌ها مطمئن شود. در سال‌های اخیر، تقاضای رو به رشد انرژی در سراسر جهان نشان می‌دهد که جایگزینی منابع انرژی ارزان، فراوان و تجدید پذیر اجتناب ناپذیر است. انرژی خورشیدی به عنوان یکی از امیدوار کننده ترین منابع انرژی تجدید پذیر محسوب می‌شود [۱-۳]. انرژی نوری که از جانب خورشید در هر ساعت به زمین می‌تابد، بیش از کل انرژی است که ساکنان زمین در طول یک سال مصرف می‌کنند. با وجود گسترده بودن این انرژی، چگالی آن بسیار پایین است. خورشید نه تنها خود منبع عظیم انرژی است بلکه سرآغاز حیات و منبع تمام انرژی‌های دیگر است. این مسائل باعث جایگزین نمودن روش‌های قدیمی تولید انرژی با روش‌های جدید می‌شود. برای بهره‌گیری از این منبع، باید راهی جست تا انرژی پراکنده آن با راندمان بالا و هزینه کم به انرژی قابل مصرف الکتریکی تبدیل شود.

یکی از کاربردهای مهم انرژی خورشیدی تبدیل آن به انرژی الکتریکی است. یکی از این تکنولوژی‌ها که خیلی مورد توجه قرار گرفته، تکنولوژی فتوولتائیک است. کلمه فتوولتائیک از دو کلمه فتو به نور معنی و ولتائیک و به معنی الکتریسیته تشکیل شده است. تولید جریان الکتریسیته از پرتوهای خورشیدی به دو صورت گرمایی و سیستم‌های فتوولتائیک (PV)^۱ امکان‌پذیر است. در روش اول که از طریق فرایند ترموالکتریک می‌باشد، ابتدا انرژی نور خورشید توسط کلکتورهای خورشیدی جذب شده و از گرمی حاصل برای گرم کردن مایعی که بخار آن یک توربین را به حرکت در می‌آورد، استفاده می‌شود که در نهایت انرژی الکتریکی توسط توربین تولید می‌شود. در روش دیگر انرژی خورشید به طور مستقیم در سلول‌های خورشیدی^۲ به انرژی

^۱ Photovoltaic system

^۲ Solar cell

الکتریکی تبدیل می‌شود. به طور کلی سیستم‌های فتوولتائیک نسبت به سیستم‌های ترموالکتریکی از راندمان پایین‌تری برخوردار هستند.

همان‌طور که ذکر شد، سیستم‌های فتوولتائیک (PV) برای تولید مستقیم برق از تابش و انرژی خورشیدی استفاده می‌شوند. بازده تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی در یک ماژول فتوولتائیک، به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر دمای سطح آن قرار دارد [۴ و ۵]. ماژول‌های فتوولتائیک تنها ۷ تا ۲۲ درصد از انرژی نور خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. در حدود ۵۵٪ از انرژی خورشیدی دریافت شده، جذب ماژول شده و منجر به افزایش دمای آن می‌شود، ما بقی نیز بصورت تابش به فضا باز می‌گردد. در ماژول‌های خورشیدی بیشتر تابش خورشید، به دلیل عدم واقع شدن در محدوده طول موج مناسب برای جذب، به گرما تبدیل می‌شود. این امر سبب بالا رفتن دمای ماژول‌های خورشیدی و در نتیجه کاهش بازدهی الکتریکی پنل، به دلیل افت ولتاژ می‌شود.

تا کنون تلاش‌های بسیاری در جهت بهبود عملکرد و افزایش راندمان انواع سیستم‌های فتوولتائیک، صورت گرفته است. کنترل دمای عملیاتی ماژول فتوولتائیک یکی از راه‌کارهای رسیدن به توان بیشینه و نیز افزایش عمر ماژول فتوولتائیک است. بر این اساس سیستم‌های خنک کاری ماژول‌های فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفتند که وظیفه آن‌ها پایین نگاه داشتن دمای ماژول و نیز استخراج گرمای اضافی برای مقاصد گرمایشی است. استفاده از خنک‌کن‌ها با حرکت طبیعی یا اجباری سیال عامل می‌تواند دمای این ماژول‌ها را کاهش دهد.

گزارش‌های آزمایشگاهی [۶-۸] نشان می‌دهند که کارایی ماژول‌های PV به ازای هر ۱ درجه‌ی سانتیگراد افزایش در دمای سطح آن‌ها، کاهش می‌یابد. پیدا کردن یک روش کارآمد برای خنک سازی این ماژول‌ها، یک مسئله مهم برای حذف مقدار زیادی از حرارت از سطح ماژول‌های PV است.

لذا سعی بر آن است تا در این پروژه، راه کاری مفید برای حذف حرارت از سطح ماژول PV با ایجاد ضربه توسط جت آب، ارائه شود. در این روش، جت آب از نازل‌هایی خارج می‌شود که قطر این نازل‌ها، تعداد این نازل‌ها، فاصله هدف تا نازل، و دبی جرمی آب تحت کنترل می‌باشد. تاثیر هر یک از این پارامترها به صورت مجزا

بررسی شده است، و نتایج مورد نظر در فصول بعدی ارائه شده است. همچنین، به منظور مطالعه‌ی بازده خنک کاری، شاخص یکنواختی دما نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که برای تعیین شرایط بهینه عملیاتی و تعیین مقدار بهینه‌ی متغیرهای تاثیر گذار در سیستم ایجاد شده از روش RSM استفاده می‌شود. نتایج ارائه شده توسط RSM نشان می‌دهد که در این سیستم و در شرایط بهینه شده، توان الکتریکی به صورت قابل ملاحظه‌ای زیاد می‌شود، و متعاقباً دمای ماژول PV کاهش می‌یابد.

۲-۱ اهداف رساله

اهداف این رساله به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- معرفی سیستم خنک کننده با ایجاد ضربه‌ی جت (JIC)^۱ بر روی ماژول فتوولتائیک (PV)، و بررسی اثرات منفی افزایش دما در ماژول PV
- ۲- طراحی چهار شماتیک متفاوت از سیستم JIC با آب به عنوان سیال خنک کن برای دستیابی به توزیع یکنواخت دما در ماژول PV
- ۳- بررسی اثرات پارامترهای موثر در عملکرد سیستم JIC/PV شامل پارامترهای قطر نازل، تعداد نازل، فاصله نازل تا هدف، و دبی جرمی آب
- ۴- انجام آزمایشات برای قطرهای مختلف نازل، دبی جرمی آب، تعداد نازل و فاصله نازل از سطح پشتی ماژول PV
- ۵- مقایسه یکنواختی توزیع دما، توان خروجی و خصوصیات شدت جریان- ولتاژ ماژول PV با حالتی که در سیستم خنک کاری صورت نمی‌گیرد.
- ۶- استفاده از روش RSM برای بدست آوردن هندسه بهینه نازل‌ها و سایر پارامترهای اصلی

¹ Jet Impingement Cooling

۳-۱ ساختار رساله

در این فصل مقدمه‌ای بر انرژی خورشیدی و استفاده از ماژول‌های فتوولتائیک برای تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی گردآوری شده است، و این نتیجه به دست آمده است که کارایی ماژول‌های PV با افزایش دمای سطح آن‌ها، کاهش می‌یابد. در ادامه، در فصل دوم، مروری بر منابع اطلاعاتی صورت گرفته است، و در آن فصل به بررسی تاریخچه سلول‌های خورشیدی، اساس کار سلول‌های فتوولتائیک، انواع روش‌های خنک کاری ماژول-های خورشیدی از جمله روش استفاده از دسته جت سیال (آب و نانوسیال)، بررسی جت‌های سیال و کاربرد آن‌ها در انتقال حرارت، و ارائه‌ی تحقیقات صورت گرفته در این زمینه پرداخته شده است. در فصل سوم، دستگاه آزمایشگاهی استفاده شده در این پروژه به همراه روش آزمایشگاهی مورد استفاده و تشریح طراحی آزمایش با ارائه جزئیات، تشریح شده‌اند. در ادامه و در فصل چهارم، نتایج به دست آمده ارائه و تحلیل شده‌اند. این نتایج شامل بررسی داده‌های توزیع دما در ماژول PV، بررسی شاخص یکنواختی دما، تحلیل نتایج مدل ریاضی استفاده شده، بررسی خروجی الکتریکی ماژول PV، بررسی اثرات حرارتی و توان خروجی، و ارائه نتایج بهینه شده می‌باشد. در نهایت، یک جمع بندی دقیق از این پروژه انجام شده است و پیشنهاداتی نیز در جهت رفع مشکلات احتمالی ارائه شده است.

فصل ۲ مروری بر منابع اطلاعاتی

۲-۱ مقدمه

همان‌طور که اشاره شد، این پروژه به بررسی عملکرد سیستم ایجاد سرمایش با برخورد جت آب (JIC) به صفحات فتوولتائیک (PV) می‌پردازد. پس، کسب اطلاعات در مورد صفحات فتوولتائیک که انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند، امری ضروری است. لذا، در این فصل، در ابتدا انرژی خورشیدی و تاریخچه سلول‌های خورشیدی توضیح داده می‌شود. در ادامه، صفحات فتوولتائیک، اساس کارکرد آن‌ها و روش‌های خنک کردن این صفحات به جزئیات تشریح می‌شوند. از آنجایی که در این پروژه از جت‌های آب برای خنک کردن استفاده می‌شود، اثرات جت‌های سیال و کاربرد آن‌ها در بهبود انتقال حرارت نیز در این فصل بررسی شده است. در انتها، مروری بر پروژه‌های پیشین که در این زمینه می‌باشند، صورت گرفته است.

۲-۲ انرژی خورشیدی

انرژی خورشیدی وسیع‌ترین منبع انرژی در جهان است. انرژی نوری که از جانب خورشید در هر ساعت به زمین می‌تابد، بیش از کل انرژی است که ساکنان زمین در طول یک سال مصرف می‌کنند. با وجود گسترده بودن این انرژی، چگالی آن بسیار پایین است. خورشید نه تنها خود منبع عظیم انرژی است بلکه سرآغاز حیات و منبع تمام انرژی‌های دیگر است. منبع انرژی‌های فسیلی نیز انرژی خورشیدی است چرا که سوخت‌های فسیلی زمانی گیاهانی بودند که حیاتشان به خورشید وابسته بود. طبق برآوردهای علمی در حدود ۶۰۰۰ میلیون سال از تولد خورشید می‌گذرد و در هر ثانیه $2/4$ میلیون تن از جرم خورشید به انرژی تبدیل می‌شود. قطر خورشید $10^6 \times$ ۱۷۳۹ کیلومتر است و از گازهایی نظیر هیدروژن ($8/86$ درصد)، هلیوم (۳ درصد) و ۶۳ عنصر دیگر که مهم‌ترین آن‌ها اکسیژن، کربن، نئون و نیتروژن تشکیل شده است. میزان دما در مرکز خورشید حدود ۱۰ تا ۱۴ میلیون درجه سانتی گراد می‌باشد که از سطح آن حرارتی نزدیک به ۵۶۰۰ درجه سانتی گراد و به صورت امواج الکترو مغناطیسی در فضا منتشر می‌شود. زمین در فاصله ۱۵۰ میلیون کیلومتری خورشید قرار دارد و ۸ دقیقه و ۱۸ ثانیه طول می‌کشد تا نور خورشید به زمین برسد. برای بهره‌گیری از این منبع باید راهی جست تا انرژی

پراکنده آن با راندمان بالا و هزینه کم به انرژی قابل مصرف الکتریکی تبدیل شود.

شناخت انرژی خورشیدی و استفاده از آن برای منظوره‌های مختلف، به زمان ما قبل تاریخ باز می‌گردد. شاید به دوران سفالگری، در آن هنگام روحانیون معابد به کمک جام‌های بزرگ طلائی صیقل داده می‌شدند و از اشعه خورشید، جهت روشن کردن آتشدان‌های محراب استفاده می‌کردند. ولی مهم‌ترین روایتی که درباره استفاده از خورشید بیان شده داستان ارشمیدس دانشمند و مخترع بزرگ یونان قدیم می‌باشد، که ناوگان روم را با استفاده از انرژی حرارتی خورشید به آتش کشید. گفته می‌شود که ارشمیدس با نصب تعداد زیادی آئینه‌های کوچک مربعی شکل در کنار یکدیگر که روی یک پایه متحرک قرار داشته است اشعه خورشید را از راه دور روی کشتی‌های رومیان متمرکز ساخته و به این ترتیب آن‌ها را به آتش کشیده است.

حدود ۱۸۰۰ سال پس از ارشمیدس شخصی به نام کیر چر^۱ شاهکار ارشمیدس را تکرار کرد و با استفاده از تعدادی آئینه، یک لنگرگاه چوبی را از فاصله دور آتش زد و ثابت کرد که داستان حقیقت دارد. در سال ۱۶۱۵ سالمون^۲ اهل فرانسه بیانیه‌ای راجع به موتور خورشیدی منتشر کرد. او با استفاده از تعدادی عدسی که در یک قاب نصب شده بودند اشعه خورشید را بر روی یک استوانه فلزی سر بسته که قسمتی از آن از آب پر شده بود، متمرکز نمود. با تکامل ابزارهای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی درک افسانه‌های اسطوره‌ای انسان از خورشید دگرگون شد. باورهای خرافی و تفکر سنتی درباره خورشید تا سال ۱۶۰۰ میلادی به تدریج از بین رفت. و با کنار رفتن هاله سحر و جادو و افسانه از قرن ۱۴ تا ۱۷ میلادی، ابزارهای گوناگونی برای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی طراحی و ساخته شد. در دوران رنسانس ساخت ابزار خورشیدی مانند بسیاری از ابداعات آن دوران غیر عملی و با کاربردی بسیار کم دامنه بود و صرفاً برای افزایش اطلاعات علمی و آزمایش‌های تجربی ساخته می‌شد. اما در قرن هیجده این روند تغییر کرد. در این قرن "کوره خورشیدی" که می‌توانست آهن، مس و سایر فلزات را ذوب کند، ساخته شد. در ساخت کوره فوق از آهن صیقل شده، لنزهای شیشه‌ای و آئینه‌ها استفاده

¹ A.Kircher

² Salmon

می شد [۹].

آنتونی لاوازیه^۱ (۱۷۴۳-۱۷۹۴) خالق شیمی نوین برای کسب بیشترین انرژی از خالص ترین منبع حرارتی، تحقیقاتی در کوره های خورشیدی انجام داد و کوره ای ساخت که برای تشکیل یک عدسی محدب این کوره از دو صفحه شیشه ای که بین این دو صفحه با الکل پر شده بود، استفاده نمود. عدسی مایع به قطر ۱۳۰ سانتی متر و به فاصله کانونی ۳۲۰ سانتی متر بود. چون قدرت انکسار این عدسی مایع برای بدست آوردن درجه حرارت زیاد در کانون آن موثر نبود، لاوازیه عدسی کوچک دیگری را در کانون آن قرار داد و با کوچک تر کردن فاصله کانونی موثر، این دستگاه توانست حتی پلاتینیوم را در دمای ۱۷۶۰ درجه سانتی گراد ذوب نماید. بسمر^۲ (۱۸۹۸-۱۸۱۳) پدر فولاد جهان حرارت مورد نیاز کوره خود را با استفاده از انرژی خورشیدی تامین کرد. در قرن نوزدهم تلاش هایی جهت تبدیل انرژی خورشیدی به دیگر فرم های انرژی مثل تولید بخار و استفاده در موتورهای بخار انجام گرفت. در این سال ها چندین موتور بخار خورشیدی ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. سال ۱۸۷۸ موشو^۳ اولین کلکتور خورشیدی^۴ با متمرکز کننده مخروطی شکل را طراحی کرد. آینه های داخل مخروط تمام اشعه های خورشیدی را در نقطه ای در وسط مخروط ناقص که جذب کننده ای در آنجا نصب شده بود، متمرکز می کردند. این کلکتور را اکسیکون^۵ نامیدند.

اولین اکسیکون بزرگی که ساخته شد شامل یک صفحه از جنس نقره با قطر ۵۴۰ سانتی متر و به سطح ۱۸/۲ متر مربع بود. وزن آن با کلیه قسمت های متحرک در حدود ۱۴۰۰ کیلو گرم بود، و قادر بود ۷۸ درصد از انرژی خورشیدی تابیده شده را جذب کند. ولی از آن جا که در این طرح تابش خورشید به جای یک نقطه در یک سطح متمرکز می شد، دارای شدت کمتری بود. قدرت تولیدی مخروط ناقص موشو برای راه اندازی ماشین بخاری به قدرت ۱/۵ کیلووات کافی بود که تقریباً فقط ۳٪ از انرژی جذب شده را تحویل می داد، در صورتی که

¹ A.lavoisier

² Bessmer

³ Mucho

⁴ Solar collector

⁵ Axicon

ماشین‌های بخار ذغال سنگی، قادر به تحویل ۹٪ تا ۱۱٪ انرژی دریافتی بودند. طی سال‌های بعد، انرژی اخذ شده از خورشید، در مواردی نظیر تامین قدرت ماشین‌های چاپ و یا تقطیر و شیرین کردن آب استفاده گردید. در سال ۱۹۰۷ یک مهندس مبتکر به نام فرانک شومان^۱ با استفاده از کلکتور مسطحی به مساحت ۲۰۰ فوت مربع موتوری به قدرت ۳۵ اسب بخار اختراع کرد. این کلکتور مسطح برای گرم کردن آب به کار می‌رفت. آب گرم تولید شده با کمک یک مبدل حرارتی اتر را به جوش آورده و بخار اتر، موتور و در نتیجه پمپ متصل به آن را به حرکت در می‌آورد. هر چند این موتور خورشیدی قدرت پیش‌بینی شده یعنی ۱۰۰ اسب بخار را تولید نکرد، ولی تکنولوژی ساخت آن از اهمیت بالایی برخوردار بود [۱۰].

استفاده از منابع عظیم انرژی خورشید برای تولید انرژی الکتریسته، استفاده دینامیکی، ایجاد گرمایش محوطه‌ها و ساختمان‌ها، خشک کردن تولیدات کشاورزی و تغییرات شیمیایی اخیراً شروع گردیده است. یکی از کاربردهای مهم انرژی خورشیدی تبدیل آن به انرژی الکتریکی است. تولید جریان الکتریسته از پرتوهای خورشیدی به دو صورت گرمایی و سلول‌های فتوولتائیک امکان پذیر است. در روش اول که از طریق فرایند ترموالکتریک می‌باشد، ابتدا انرژی نور خورشید توسط کلکتورهای خورشیدی جذب شده و از گرمی حاصل برای گرم کردن مایعی که بخار آن یک توربین را به حرکت در می‌آورد، استفاده می‌شود، که در نهایت انرژی الکتریکی توسط توربین تولید می‌شود. در روش دیگر انرژی خورشید به طور مستقیم در سلول‌های خورشیدی سیستم‌های فتوولتائیک به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. به طور کلی سیستم‌های فتوولتائیک نسبت به سیستم‌های ترموالکتریکی از راندمان پایین تری برخوردار هستند [۱۱-۱۳].

¹ Frank shuman

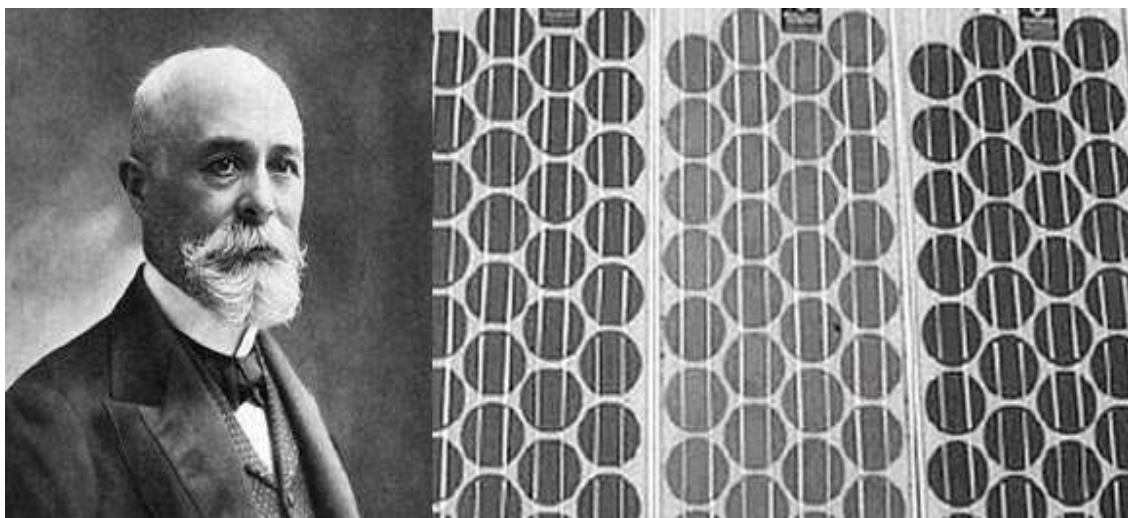
۲-۳ تاریخچه سلول‌های خورشیدی

تاریخچه‌ی استفاده از انرژی خورشید به عنوان منبع انرژی الکتریکی به دهی نوزده میلادی باز می‌گردد. اولین

قطعه‌ی فتوولتائیک، توسط فریتس^۱ شکل (۱-۲) در سال ۱۸۸۳ ساخته شده است [۱۴].

وی با ذوب سلنیم (Se) بر روی یک زیرلایه‌ی فلزی و اتصال مکانیکی ورقه‌ای از طلا در بالای قطعه به عنوان اتصال، موفق به ساخت این قطعه شد. سطح این قطعه ۳۰ سانتی‌متر مربع بود. وی در گزارش خود در مورد این قطعه اشاره می‌کند که «جریان، اگر بلا فاصله مورد نیاز نباشد، می‌تواند در محل تولید ذخیره گردد، یا فاصله‌ای را پیموده و سپس مورد استفاده قرار گیرد». وی با این سخن آینده‌ی تکنولوژی فتوولتائیک و سلول‌های خورشیدی را برای صد سال آینده‌ی خود ترسیم نمود.

عصر جدید سلول‌های فتوولتائیک در سال ۱۹۵۴ شروع شده است، زمانی که محققان در آزمایشگاه بل^۲ در آمریکا (شکل (۲-۲)) به طور کاملاً اتفاقی کشف کردند که در دو سر یک دیود با پیوند pn، با کم و زیاد کردن نور، ولتاژ ایجاد می‌گردد.



شکل ۲-۱. تصویر چارلز فریتس و سلول ساخته شده توسط این دانشمند [۱۴].

^۱ Fritts

^۲ Bell

در مدت زمان یک سال این گروه موفق به تولید سلول خورشیدی سیلیکونی با پیوند pn با بازده ۶٪ شدند [۱۵]. در همان سال گروهی در مقر هوایی رایت پترسون^۱ آمریکا نتایج حاصل از تحقیق و ساخت سلول‌های خورشیدی لایه نازک با پیوند ناهمگون بر پایه پیوند میان Cu_2S و CdS با بازدهی ۶٪ را به چاپ رساندند [۱۶]. در سال بعد، سلول خورشیدی مبتنی بر GaAs با ساختار pn و بازدهی ۶٪ توسط آزمایشگاه RCA آمریکا گزارش شد [۱۷]. با توجه به اکتشافات و تحقیقات صورت گرفته بر روی سلول‌های خورشیدی تا سال ۱۹۶۰ تعدادی مقاله پیرامون پایه‌ی تئوریک و مفاهیم بنیادی سلول‌های خورشیدی با پیوند pn توسط دانشمندانی همچون پرینس^۲ [۱۸]، لوفرسکی^۳ [۱۹] منتشر شد. در این مقالات مفاهیم تئوریک مربوط به رابطه‌ی میان گپ انرژی، طیف تابشی، دما، ترمودینامیک این سلول‌ها و بازدهی آن‌ها تبیین گردیده است. در این سال‌ها سلول‌های خورشیدی مبتنی بر CdTe نیز ساخته شده است [۲۰]. همچنین، برنامه‌ی فضایی ایالات متحده آمریکا نیز از سلول‌های خورشیدی سیلیکونی برای تولید توان مورد نیاز فضاپیماهای خود استفاده نمود.



شکل ۲-۲. آزمایشگاه بل در ایالت متحده آمریکا [۱۷].

^۱ Wright Patterson

^۲ Prince

^۳ Loferski

با توجه به آن که صنعت فضایی جزء اولین مصرف کنندگان سلول‌های خورشیدی بود، تحقیقات بر روی تاثیرات تشعشعات فضایی بر سلول‌های خورشیدی بر روی سلول‌های سیلیکونی تزریق شده با لیتیوم صورت پذیرفت [۲۱]. در سال ۱۹۷۰ گروهی در انستیتو لفه^۱ واقع در شوروی سابق به سرپرستی آلفرو^۲ سلول خورشیدی بر پایه‌ی پیوند GaAlAs / GaAs تولید کرده، و راه را برای تولید ساختارهای جدید هموار نمودند [۲۲]. سلول‌های مبتنی بر تکنولوژی GaAs به دلیل بازدهی بالا و همچنین مقاومت در برابر یونیزه شدن توسط تشعشعات فضای خارج از جو زمین مورد استقبال قرار گرفت، که نقطه عطفی در صنعت فتوولتائیک به شمار می‌آید. این سال هم از لحاظ فنی و هم از نقطه نظر صنعتی نقش مهمی در تاریخچه‌ی سلول‌های خورشیدی ایفا می‌کند. پیشرفت شاخص در کارایی سلول‌های خورشیدی در این سال با معرفی سلول بنفش صورت پذیرفت. در این سلول‌های مبتنی بر ماده‌ی سیلیکون، نحوه‌ی طراحی به صورتی است که میزان جذب طول موج‌های کم افزایش می‌یابد، و این باعث بالا بردن میزان بازدهی تا مقدار ۳۰٪ می‌گردد [۲۳]. همچنین، سلول‌های مبتنی بر ساختار پیوند ناهمگون ماده‌ی GaAs با بازدهی ۱۳٪ در شرکت IBM آمریکا تولید شد [۲۴].

اما مساله‌ی دیگری که باعث افزایش اقبال عمومی به سلول‌های فتوولتائیک شده است و این نحوه‌ی تولید انرژی الکتریکی را به عنوان یک صنعت معرفی کرده است، در کنفرانسی در چری هیل^۳ واقع در ایالت نیوجرسی آمریکا مطرح شده است. در این کنفرانس گروهی از محققان سلول‌های فتوولتائیک و سران دولتی ایالات متحده آمریکا با یکدیگر دیدار کردند تا پتانسیل‌های سرمایه گذاری بر روی این زمینه را بررسی کنند. در نهایت، نتیجه بر آن شد که سلول‌های فتوولتائیک ارزش حمایت دولتی را دارا می‌باشند، و به همین منظور آژانس تحقیق و توسعه انرژی آمریکا شکل گرفت، اولین گروه تحقیقاتی در دنیا که مساله‌ی انرژی‌های تجدید پذیر را بررسی کرد

¹ Loffe

² Alferoy

³ Cherry Hill

و بعدها تبدیل به دپارتمان انرژی آمریکا شد. در سال ۱۹۹۰، بزرگترین شرکت تولید کننده سلول‌های خورشیدی شرکت آركوسولار^۱ واقع در کالیفرنیا در آمریکا متعلق به شرکت نفتی آتلانتیک ریچفیلد^۲ بود.

این شرکت محصولاتی چون سیلیکون کریستالی و لایه نازک سیلیکون آمورف را به عنوان محصولی تجاری و CuInSe_2 را به عنوان یک محصول پیش تجاری در اختیار داشت. سال ۱۹۹۴، مبدا فرآیند EFG^۳ برای تولید سلول‌های خورشیدی از روبان‌های سیلیکونی به جای ویفرهای سیلیکونی^۴ بود. شرکت بریتانیایی بی پی سولار^۵ در سال ۱۹۸۹ حق امتیاز اختراع لایه نشانی به روش رسوب‌دهی الکتریکی سلول خورشیدی لایه نازک CdTe را خریداری نمود. با بلوغ تکنولوژی سلول‌های خورشیدی، نیاز به تجهیزات جانبی مرتبط با سلول‌ها به منظور ذخیره‌ی انرژی الکتریکی تولیدی و یا انتقال آن و یا به عبارت بهتر تجهیزات مورد نیاز برای مصرف انرژی تبدیل و تولید شده در سلول‌های خورشیدی، افزایش یافت.

در آن زمان، محصولات بسیاری از قبیل تبدیل کننده‌ها که توان DC را به توان AC تبدیل می‌کنند، و یا دنبال کننده‌های خورشیدی^۶ کاربردی کمی به جز کاربردهای مرتبط با سلول‌های خورشیدی داشتند. به همین دلیل تولید آن‌ها محدود بود، و بار دیگر مساله سرمایه گذاری و مشکلات فنی و تکنیکی، این بار در این بخش مساله ساز شد. در بسیاری از ارزیابی‌های صورت گرفته بر عملکرد سلول‌های خورشیدی در آن دوران، تبدیل کننده‌ها به عنوان نقطه ضعف سیستم شناخته می‌شدند، و نه تنها از لحاظ مرغوبیت و میزان قابلیت اعتماد دچار مشکل بودند، بلکه از لحاظ اقتصادی نیز دارای قیمت بالایی بوده و هزینه کلی را بالا می‌بردند. اما به سرعت مشخص گردید که زمینه‌های دیگری نیز برای رشد و توسعه سلول‌های خورشیدی وجود دارد.

در ادامه به وقایع قابل توجه در تاریخ سلول‌های فتوولتائیک اشاره می‌شود:

۱- ۱۹۶۰: انتشار مقالات پیرامون مفاهیم بنیادی سلول‌های خورشیدی با پیوند pn و بیان مفاهیم تئوریک.

¹ Arco solar

² Atlantic Richfield

³ Edge defined Film fed Growth

⁴ Silicon wafer

⁵ BP Solar

⁶ Sun tracer

۲- ۱۹۵۵: فروش سلول‌های سیلیکونی با بازدهی ۲٪ در شرکت هافمن الکترونیک^۱ آمریکا، کاربرد سیلیکون برای تولید توان مورد نیاز فضاپیماهای و بررسی تاثیرات تشعشعات فضایی در سلول‌های سیلیکونی تزریق شده با لیتیوم.

۳- ۱۹۷۰: تولید سلول خورشیدی بر پایه‌ی پیوند GaAlAs/ GaAs در موسسه لفه شوروی به سرپرستی آلفرو و بالا بردن مقاومت در برابر تشعشعات فضایی، تولید سلول‌های مبتنی بر ساختار پیوند ناهمگون ماده‌ی GaAs با بازدهی ۱۳٪ در شرکت IBM^۲ آمریکا.

۴- ۱۹۷۳: - معرفی سلول بنفش مبتنی بر ماده‌ی سیلیکون، افزایش میزان جذب طول موج‌های کم و بالا بردن میزان بازدهی تا مقدار ۳۰٪.

۵- ۱۹۷۴: طرح مصرف از روبان‌های Si، اولین جایگزین برای ویفر سیلیکونی در شرکت تایکو^۳ آمریکا.
۶- ۱۹۸۵: تولید سلول‌های خورشیدی سیلیکونی با بازدهی بالای ۲۰٪ تحت تابش استاندارد خورشیدی استرالیا

۷- ۱۹۹۰: طرح محصولات سیلیکون کریستالی و لایه نازک سیلیکون آمورف به عنوان محصولی تجاری توسط شرکت آرسولار واقع در کالیفرنیا.

۸- ۱۹۹۴: تولید متراکم کننده چند پیوندی دو ترمیناله بر پایه تکنولوژی GaInP/GaAs/Ge با بازدهی بالای ۳۰٪ در آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدید پذیر^۴ آمریکا [۲۶].

۹- ۱۹۹۸: نصب اولین آرایه ی ۵ کیلو واتی با تکنولوژی GaInP/GaAs/Ge با طراحی ۳ پیوندی بر روی دیپ اسپیس^۵ ناسا^۶ [۲۷].

۱۰- ۲۰۱۳: تولید سلول‌هایی با بازدهی ۴۴/۴٪ بر پایه پیوند سه گانه‌ی GaP / GaAs / InGaAs در شرکت

^۱ Hoffman Electronics

^۲ International Business Machines

^۳ Tyco

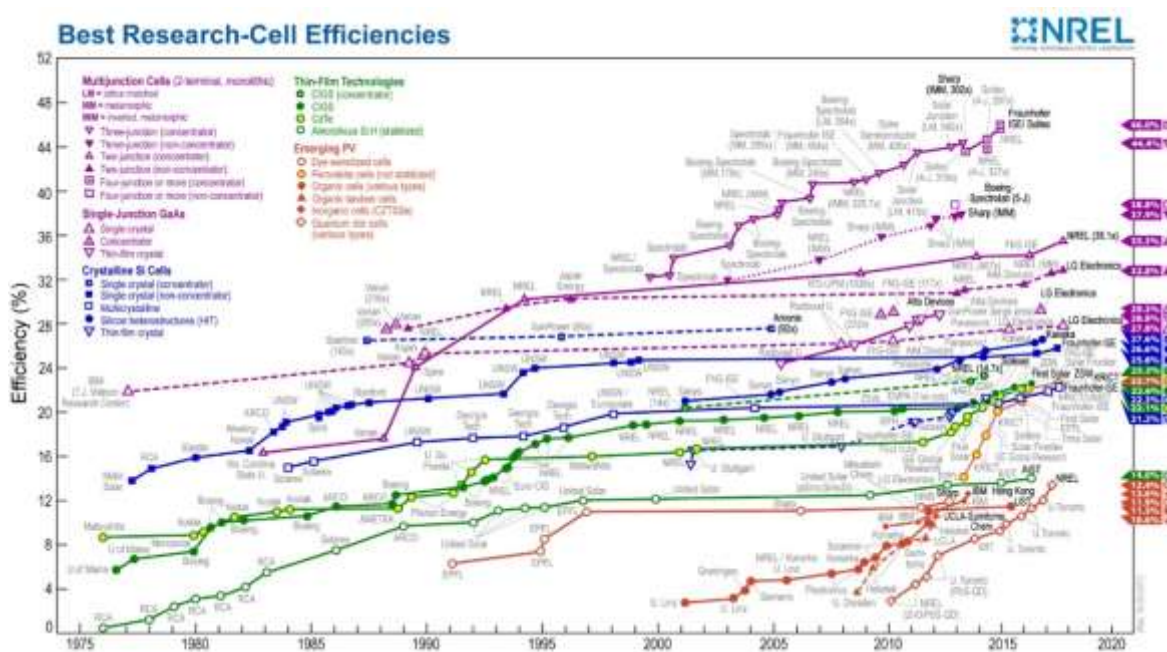
^۴ National Renewable Energy Laboratory

^۵ Deep Space

^۶ National Aeronautics and Space Administration (NASA)

شارپ^۱.

با توجه به پیشرفت‌های اخیر سلول‌های خورشیدی، و گزارش منتشر شده توسط آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدید پذیر امریکا (شکل (۲-۳)) می‌توان دریافت که پیشرفت‌های چشمگیری تا سال ۲۰۲۰ در زمینه افزایش بازده سلول‌های خورشیدی صورت خواهد گرفت.



شکل ۲-۳. تغییرات بازده سلول‌های خورشیدی [۲۸].

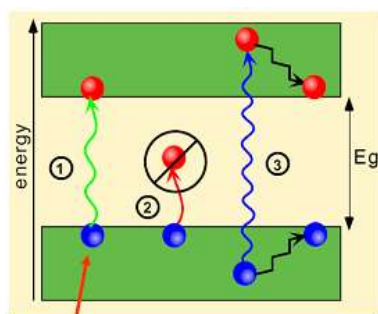
۲-۴ سیستم‌های فتوولتائیک

سلول‌های خورشیدی نیمه هادی، مانند یک دیود با سطح بسیار زیاد هستند، که با برخورد نور، ولتاژ و جریانی در مدار القاء می‌کنند. سلول فتوولتائیک نور خورشید را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. اصل مقدماتی در این تکنولوژی پدیده "فتوالکتریک" است، که اولین بار توسط انیشتین مطرح گردید. "فتو" به معنای نور و "ولتائیک" به معنای الکتریسیته می‌باشد. عنصر اصلی در ساخت سلول‌های خورشیدی، نیمه

¹ Sharp Corporation

هادی‌هایی مانند سیلیکون و گالیم آرسناید می‌باشد. اساس کار سلول‌های خورشیدی بر مبنای تئوری الکترون-های مدارات اتم قابل توجیه است. در سطح خارجی تراز انرژی اتم دو سطح تراز مشخص وجود دارد. سطح تراز ظرفیت اتم (والانس) که در عملیات شیمیایی دخالت دارد و سطح تراز هدایت اتم (لایه هدایت) که در هدایت الکتریکی نقش دارد.

همان‌طور که می‌دانید هر اتم برای این‌که از تراز ظرفیتی خود به تراز هدایت انتقال یابد، احتیاج به مقدار مشخصی انرژی دارد که به آن انرژی گپ می‌گویند. اساس کار سلول‌های خورشیدی بر مبنای تئوری الکترون-های مدارات اتم قابل توجیه است. وقتی نور به یک نیمه هادی می‌رسد، مطابق شکل (۲-۴) می‌تواند یک الکترون را از باند ظرفیت به باند هدایت ببرد. در این حالت جای خالی الکترون در باند ظرفیت با یک حفره مدل می‌شود. بنابراین، یک زوج الکترون و حفره تولید می‌شود. اگر انرژی فوتون کمتر از مقدار گپ انرژی ماده نیمه هادی باشد، نمی‌تواند الکترون را از باند ظرفیت به هدایت ببرد. بنابراین، فوتونی با این انرژی جذب نمی‌شود. اگر انرژی فوتون بیشتر از گپ انرژی باشد، اختلاف انرژی فوتون و گپ انرژی به صورت انرژی جنبشی در الکترون و حفره ذخیره می‌شود. حامل‌ها (الکترون و حفره‌ها) با برخورد با بلور اتم‌های تشکیل دهنده‌ی ماده و ارسال فوتون، این اضافه انرژی را به بلور می‌دهند و به نزدیکی لبه‌ی باندهای هدایت و ظرفیت می‌رسند. این اضافه انرژی، به هدر می‌رود و سبب گرم شدن خود بلور و کاهش راندمان سلول خورشیدی می‌شود.



شکل ۲-۴. جذب فوتون با انرژی‌های متفاوت در سلول خورشیدی [۲۴].

با جذب فوتون انرژی آن در زوج الکترون حفره ذخیره می‌شود. برای آن‌که جریان خالص غیر صفر داشته باشیم باید عدم تقارنی برای الکترون و حفره وجود داشته باشد. این عدم تقارن می‌تواند با ایجاد سدی در مسیر حرکت

دو حامل ایجاد گردد. این سد می‌تواند باعث جلوگیری از باز ترکیب حامل‌ها و جداسازی آن‌ها در ماده گردد. پیوند pn و شاتکی می‌توانند این عدم تقارن را ایجاد کند.

علت استفاده از نیمه هادی‌ها به این خاطر است که این عناصر نیاز به انرژی گپ بسیار پائین دارند تا به تراز هدایت منتقل گردند و با حرارتی کم در حد حرارت محیط می‌توانند این انرژی را تامین نمایند. در نیمه هادی‌ها با اضافه کردن ناخالصی به کریستال خالص آن‌ها، می‌توان میزان انرژی گپ را بیش از پیش کاهش داد. اگر به سیلیسیم که یک نیمه هادی است فسفر اضافه شود دارای بار منفی، و اگر گرفته شود دارای بار مثبت می‌گردد. حال اگر به الکترونی که در تراز ظرفیت است انرژی بیش از مقدار انرژی گپ داده شود به تراز هدایت منتقل شده و باعث ایجاد الکترون و حفره‌ای آزاد می‌گردد. لذا از همین خاصیت برای ساخت نیمه هادی‌های نوع N و P استفاده می‌گردد. در اثر برخورد نور به سطح نیمه هادی نوع PN و کسب انرژی گپ، حامل‌های بار(الکترون-حفره) به وجود آمده که می‌توانند در داخل نیمه هادی حرکت نموده و تولید الکتریسیته نمایند.

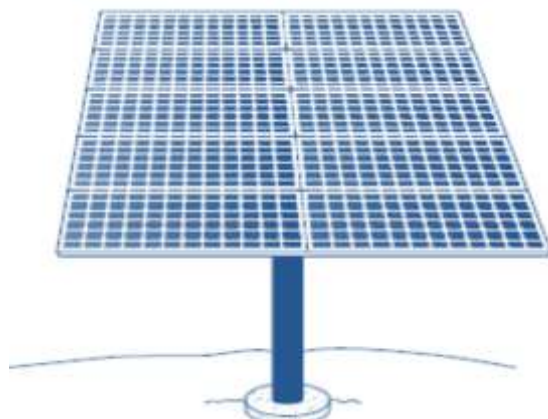
از زمان شناخت پدیده فتوولتائیک در نیمه اول قرن نوزدهم تاکنون، روش‌ها و فناوری‌های مختلفی برای ساخت و تولید سلول‌های خورشیدی ابداع و اجرا شده است. تا پیش از دهه ۱۹۸۰ میلادی، اغلب این روش‌ها به دلیل بازده کم، در سطح فعالیت‌های آزمایشگاهی و تحقیقاتی باقی مانده، و جز کاربردهای خاص (مثل ماهواره‌ها و فضانوردها) و محدود (مثل سیستم‌های فتوولتائیک کوچک و خانگی چند کیلوواتی) حضور جدی در عرصه صنعتی نیافته‌اند. از میانه دهه ۱۹۸۰ که اولین سلول‌های خورشیدی با بازده ۲۰٪ ساخته شد و با بالا رفتن قیمت سوخت، نگاه صنعتی به این فناوری نیز شکل جدیدتری به خود گرفت و زمینه برای توجیه کاربردهای نیروگاهی این فناوری هموار شد [۲۵].

۱-۴-۲ اساس کارکرد سلول‌های فتوولتائیک

اساس جمع‌آوری نور خورشید برای سیستم‌های فتوولتائیک را می‌توان به دو دسته‌ی زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱-۴-۱-۱ سیستم‌هایی با صفحه تخت^۱:

سیستم‌های فتوولتائیک صفحه تخت، نور خورشید را به صورت مستقیم جذب می‌کنند. این سیستم‌ها می‌توانند همانند شکل (۵-۲) ثابت باشند و یا با سیستم‌های دنبال کننده ی نور خورشید ترکیب شوند.



شکل ۲-۵. فتوولتائیک صفحه تخت ثابت.

۱-۴-۱-۲ سیستم‌های متمرکز کننده^۲

متمرکز کننده‌های فتوولتائیکی تکنولوژی دیگری برای پنل‌های مسطح هستند. این تکنولوژی شامل جایگزینی سطح مسطح سلول خورشیدی با لنزها و منعکس کننده‌ها است، و چگالی نور خورشیدی که به سطح سلول می‌رسد را افزایش می‌دهد. تئوری‌های ترمودینامیکی که برای سیستم‌های فتوولتائیکی همراه با متمرکز کننده به کار برده شده، افزایش درصد بازدهی را نشان می‌دهد، که این افزایش به صورت تجربی و در آزمایش مشاهده شده است. تنها دلیلی که برای توجیه پیشرفت تکنولوژی متمرکز کننده‌های فتوولتائیکی (CPV) وجود دارد این است که انرژی الکتریسیته‌ی تولید شده از لحاظ زیست محیطی قابل پذیرش و مورد تایید است. استفاده از متمرکز کننده باعث افزایش بازدهی می‌شود. نمونه‌ای از سیستم‌های متمرکز کننده در شکل (۶-۲) آورده شده است [۲۶].

¹ Flat Plate

² Concentrator



شکل ۲-۶. ایستگاه سلول‌های خورشیدی تحت تمرکز با توان ۱۹۰ kW استرالیا [۲۶].

سیستم‌های فتوولتائیک (PV) برای تولید مستقیم برق از تابش و انرژی خورشیدی استفاده می‌کنند. بازده تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی در یک ماژول فتوولتائیک، به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر دمای سطح آن قرار دارد [۲۸، ۲۷]. ماژول‌های فتوولتائیک تنها ۷ تا ۲۲ درصد از انرژی نور خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. در حدود ۵۵٪ از انرژی خورشیدی دریافت شده، جذب ماژول شده و منجر به افزایش دمای آن می‌شود. مابقی انرژی نیز بصورت تابش به فضا باز می‌گردد. در ماژول‌های خورشیدی بیشتر تابش خورشید، به دلیل عدم واقع شدن در محدوده طول موج مناسب برای جذب، به گرما تبدیل می‌شود. این امر سبب بالا رفتن دمای ماژول‌های خورشیدی و در نتیجه کاهش بازدهی الکتریکی پنل، به دلیل افت ولتاژ می‌شود.

۲-۴-۲ اثرات افزایش دمای سطح ماژول‌های فتوولتائیک بر عملکرد آنها

اثرات دما بر روی ماژول‌های فتوولتائیک به دو صورت زیر می‌باشد:

آسیب‌های مکانیکی: اثرات مکانیکی دمای بالا به صورت ایجاد تنش‌های حرارتی در سیستم ظاهر می‌شود. این امر در ماژول‌های همراه متمرکز کننده دارای اهمیت زیادی می‌باشد. در طول روز بر اثر دما تنش حرارتی

زیادی در ماژول ایجاد گردیده و این تنش در شب بر اثر خنک شدن ماژول تخلیه می‌گردد. این ایجاد و تخلیه-های متوالی و دوره‌ای تنش حرارتی سبب آسیب فیزیکی و فرسودگی ماژول می‌شود.

افت عملکرد ماژول: اثرات دما بر روی عملکرد ماژول شامل کاهش بازده، ضریب پرشدگی و ولتاژ مدار باز می‌باشد. با افزایش دما بازده ماژول کاهش می‌یابد. این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\eta = \eta_{ref} - \beta(T - T_{ref}) \quad (1-2)$$

که در آن β ضریب تغییرات دمایی ماژول، η_{ref} بازده الکتریکی در دمای مرجع (T_{ref}) و η بازده الکتریکی در دمای عملکرد ماژول (T) می‌باشند. β توسط سازنده ماژول ارائه می‌شود.

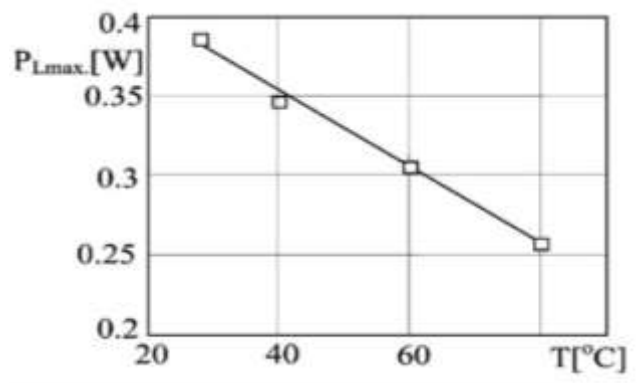
تاکنون تلاش‌های بسیاری در جهت بهبود عملکرد و افزایش راندمان انواع سیستم‌های فتوولتائیک، صورت گرفته است. کنترل دمایی عملیاتی ماژول فتوولتائیک یکی از راه کارهای رسیدن به توان بیشینه و نیز افزایش عمر ماژول فتوولتائیک است. بر این اساس سیستم‌های خنک‌کاری ماژول‌های فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفتند، که وظیفه آن‌ها پایین نگاه داشتن دمای ماژول و نیز استخراج گرمای اضافی برای مقاصد گرمایشی است. استفاده از خنک‌کن‌ها با حرکت طبیعی یا اجباری سیال عامل می‌تواند دمای این ماژول‌ها را کاهش دهد. گزارش‌های آزمایشگاهی [۲۹-۳۱] نشان می‌دهد که کارایی ماژول‌های PV به ازای هر ۱ درجه‌ی سانتیگراد افزایش در دمای سطح آن‌ها، کاهش می‌یابد. پیدا کردن یک روش کارآمد برای خنک‌سازی این ماژول‌ها، یک مسئله مهم برای حذف مقدار زیادی از حرارت از سطح ماژول‌های PV است.

۳-۴-۲ روش‌های خنک‌سازی ماژول‌های فتوولتائیک

همان‌طور که ذکر شد، افزایش دمای ماژول خورشیدی تأثیرات منفی زیادی روی عملکرد ماژول خورشیدی می‌گذارد. پس برای بهبود عملکرد ماژول خورشیدی بهتر است دمای ماژول را پایین نگه داریم، که برای این کار از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. در این روش‌ها تنها ماژول‌های فتوولتائیک در برگیرنده‌ی نور استفاده می‌شوند و سیستم، فاقد گیرنده‌های حرارتی است. برای کاهش دمای فتوولتائیک از یک سیستم خنک کننده‌ی

جانبی استفاده می‌شود.

رادزیم اسکا^۱ [۳۲] به صورت تجربی نشان داد که با افزایش دمای ماژول فتوولتائیک، توان بیشینه خروجی کاهش می‌یابد. این موضوع در شکل (۷-۲) نشان داده شده است.



شکل ۷-۲. توان بیشینه خروجی پنل بر حسب دما [۳۲].

یکی از روش‌های بهبود عملکرد فتوولتائیک‌ها، خنک‌سازی آن‌ها به روش‌های مختلف می‌باشد، که در ادامه به تفصیل شرح داده خواهد شد. برای کاهش دمای فتوولتائیک از یک سیستم خنک‌کننده جانبی استفاده می‌شود. در صورتی که سیال این سیستم خنک‌کننده هوای آزاد و انتقال حرارت از سطح ماژول به محیط اطراف باشد، خنک‌سازی منفعل^۲ نامیده می‌شود. اما اگر سیال انتقال دهنده حرارت، هوا و یا یک مایع باشد که توسط یک کمپرسور/پمپ در اطراف فتوولتائیک حرکت کند، سیستم خنک‌سازی پویا^۳ نامیده می‌شود. سیستم اول به دلیل عدم هزینه عملیاتی و مصرف انرژی مقرون به صرفه‌تر می‌باشد. اما در خنک‌سازی پویا، هم مصرف انرژی و هم هزینه‌های عملیاتی و جاری وجود دارد که بایستی در بررسی کارایی این سیستم‌ها در نظر گرفته شوند [۳۳].

۱-۳-۴-۲ خنک‌سازی منفعل

از مزایای این سیستم می‌توان به عدم هزینه‌ی عملیاتی و مصرف انرژی اشاره کرد. یکی از معایب این نوع خنک-

¹ Radziemiska

² Passive Cooling

³ Active Cooling

سازی این است که توان انتقال حرارت این سیستم‌ها محدود بوده و تنها برای فتوولتائیک‌های بدون متمرکزکننده و یا با تعداد محدودی متمرکزکننده قابل استفاده است. باید توجه شود که خنک‌سازی منفعل، تنها به معنای انتقال گرما از جایی که تولید می‌شود (در سلول‌های فتوولتائیک) به جایی که می‌تواند پخش شود (محیط پیرامون) می‌باشد.

سارگونانتان^۱ و همکاران [۳۴] در سال ۲۰۱۶ یک مقاله مروری بسیار جامع در مورد روش‌های موثر خنک‌سازی ماژول‌های PV انجام دادند. همچنین، سیکر^۲ و همکاران [۳۵] در سال ۲۰۱۷ در یک مقاله مروری در مورد انواع روش‌های خنک‌سازی ماژول‌های خورشیدی را مورد ارزیابی قرار دادند، که از میان روش‌های منفعل بررسی شده آن می‌توان به خنک‌کاری با قراردادن ماژول روی نگهدارنده شناور بر روی آب (شکل ۲-۸)، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده^۳ (PCM) در محفظه پشت ماژول برای دریافت گرمای سطح ماژول (شکل ۲-۹) و غوطه‌ورسازی ماژول فتوولتائیک در آب (شکل ۲-۱۰) اشاره کرد.

روش شناورسازی روی آب که در شکل (۲-۸) مشاهده می‌شود، یک روش کارآمد برای دستیابی به توان خروجی مطلوب از یک ماژول PV است. در این سیستم از حوضچه‌های مصنوعی برای نصب دستگاه‌های شناور PV استفاده می‌شود. این دستگاه‌های شناور شامل یک پلت فرم^۴ با ماژول PV، مجموعه‌ای از بازتابنده‌ها و سیستم ردیابی خورشیدی می‌باشد. خنک‌سازی ماژول PV با استفاده از پاشش آب به دست می‌آید. رفلکتورها^۵ برای تمرکز تابش انرژی خورشیدی به منظور برداشت انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پلت فرم شناور اجازه می‌دهد که یک سیستم ردیابی تک محوری برای رفلکتور قرار گرفته و همچنین، منجر به افزایش تابش خورشیدی در ماژول PV شود. این دستگاه‌ها FTCC^۶، مخفف شناوری، ردیابی، تمرکز و خنک‌کننده است.

¹ Sargunanathan

² Siecker

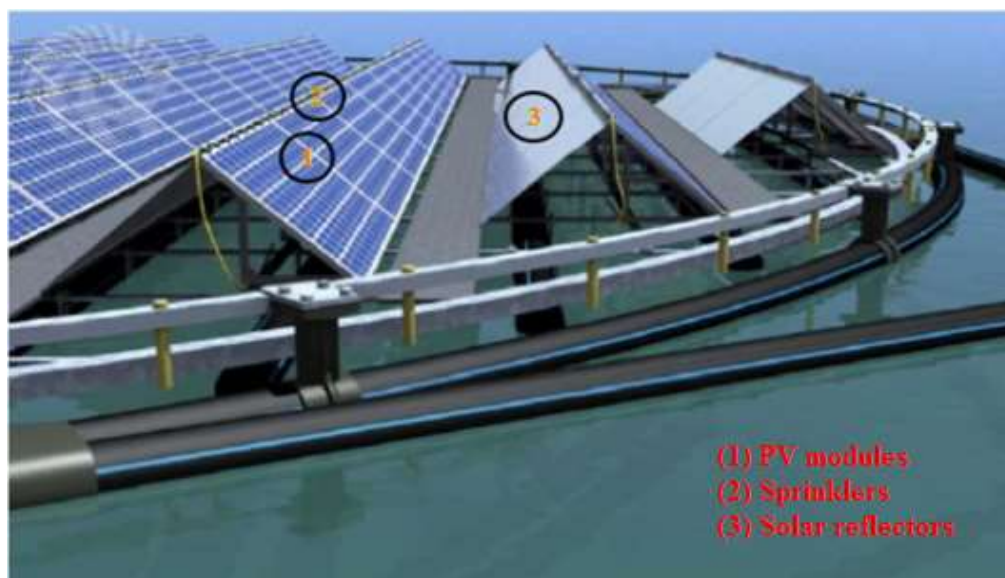
³ Phase change material

⁴ Platform

⁵ Reflectors

⁶ Floating tracking concentrating cooling (FTCC)

شکل (۸-۲) یک سیستم FTCC با اجزای اصلی آن شامل ماژول PV (۱)، آب پاش^۱ (۲) و رفلکتورهای خورشیدی^۲ (۳) را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۲. روش خنک‌کاری با قراردادن ماژول روی نگهدارنده شناور روی آب [۳۶].

یکی دیگر از روش‌های نوین و کارآمد در زمینه ذخیره انرژی حرارتی و کاهش دمای سطح ماژول‌های خورشیدی، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌باشد که در شکل (۹-۲) آمده است. در این شکل، ماده تغییر فاز دهنده که در محفظه پشت ماژول قرار گرفته و از طریق لوله‌های مسی با آب سرد خنک‌سازی می‌شود [۳۷]. ماده PCM به دلیل دریافت مقدار زیادی از گرمای سطح ماژول و در نتیجه کنترل ظرفیت حرارتی سیستم به افزایش راندمان آن کمک می‌کند. معمول‌ترین PCM استفاده شده برای خنک‌سازی ماژول‌های PV واکس پارافین^۳ است. واکس پارافین به منظور ذخیره‌سازی حرارت استفاده می‌شود، زیرا دارای ظرفیت بالا برای ذخیره‌سازی گرما در طیف گسترده‌ای از دما بوده و ارزان، غیر سمی و سازگار با محیط زیست است.

¹ Sprinklers

² Solar reflectors

³ Paraffin wax

اثر استفاده از ماده تغییر فاز پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ بر خنک‌سازی و بهبود عملکرد یک پنل فتوولتائیک به صورت آزمایشگاهی توسط موسوی بایگی و صدر عاملی [۳۸] مورد مطالعه قرار گرفت. طبق اظهار این محققین، در این پژوهش برای اولین بار در مقیاس نیمه صنعتی از مواد تغییر فاز به عنوان کنترل کننده دمای سلول فتوولتائیک استفاده شده است. نتایج آنان نشان داد که این سامانه می‌تواند دمای سطح پنل فتوولتائیک را حدود 15°C کاهش دهد که باعث بهبود راندمان در حدود ۸٪ شود.



شکل ۲-۹. روش استفاده از PCM در محفظه پشت ماژول [۳۷].

یکی دیگر از تکنیک‌هایی که می‌تواند برای کاهش دمای یک ماژول PV استفاده شود، شامل اجرای روش خنک‌سازی با غوطه‌ورسازی ماژول در آب است، که در شکل (۲-۱۰) دیده می‌شود. با استفاده از روش خنک کننده آب، یک ماژول PV در سازه‌های بزرگ آب مانند رودخانه‌ها، اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها، کانال‌ها و غیره قرار می‌گیرد. آب به عنوان مایع غوطه‌ور، گرما را از ماژول PV جذب می‌کند و دمای سطح ماژول PV را حفظ می‌کند. بنابراین، هنگامی که آب گرمای ماژول PV را جذب می‌کند، بازده الکتریکی افزایش می‌یابد.

(۱) ماژول PV

(۲) مخزن ذخیره سازی آب



شکل ۲-۱۰. روش غوطه‌ور سازی ماژول خورشیدی در آب [۳۹].

۲-۴-۳-۲ خنک‌سازی پویا

اگر سیال انتقال‌دهنده‌ی حرارت، هوا و یا یک مایع باشد که توسط یک کمپرسور/پمپ در اطراف فتوولتائیک حرکت کند سیستم خنک‌سازی پویا نامیده می‌شود، در این روش هم مصرف انرژی و هم هزینه‌ی عملیاتی و جاری وجود دارد، که بایستی در بررسی کارایی سیستم‌ها در نظر گرفته شود [۳۳].

روش استفاده از گردش اجباری آب در محفظه پشت ماژول PV که در شکل (۲-۱۱) نشان داده شده است، یک روش فعال بسیار کارآمد برای دستیابی به توان خروجی مطلوب از یک ماژول PV است. این سیستم شامل یک ماژول PV و لوله‌های جمع‌آوری حرارت است که به بخش پشتی ماژول PV متصل می‌شوند [۴۰]. لوله‌های جمع‌آوری مستطیلی برای بهبود سطح تماس بین ماژول PV و لوله‌های جمع‌آوری حرارت استفاده می‌شود. آب به عنوان سیال عامل در سیستم در حال گردش بوده که از طریق لوله‌های جمع‌آوری حرارت هم‌گرا از طریق یک پمپ DC که می‌تواند توسط ماژول PV یا سایر منابع تغذیه شود، جریان می‌یابد. هنگامی که سیستم هیبریدی در معرض تابش خورشید قرار می‌گیرد، حرارت به جریان گردش آب از طریق لوله‌های جمع‌آوری

حرارت منتقل می‌شود. آب گرم به مخزن عایق حرارتی برای برنامه‌های داخلی و دیگر برنامه‌ها باز می‌گردد. اعداد روی شکل بالا موارد زیر را نشان می‌دهند:

(۱) ماژول PV

(۲) پمپ گردش

(۳) مخزن ذخیره سازی آب.



شکل ۲- ۱۱. روش استفاده از گردش اجباری آب در پشت ماژول به منظور خنک‌کاری [۴۰].

در سیستم خنک‌سازی ماژول‌های PV با روش اسپری کردن آب که در شکل (۲-۱۲) نشان داده شده است، یک پمپ گریز از مرکز برای اعمال فشار آب توسط یک لوله مکش از طریق مخزن اسپری استفاده شده است. عامل خنک‌کننده، به عنوان مثال آب، بر روی سطح ماژول PV با استفاده از روش اسپری پاشیده می‌شود [۱۹]. هنگام پاشیدن آب روی سطح ماژول PV، دما کاهش می‌یابد و بازده الکتریکی افزایش می‌یابد. اعداد موجود روی شکل ۲- ۱۲ موارد زیر را نشان می‌دهند:

(۱) ماژول PV

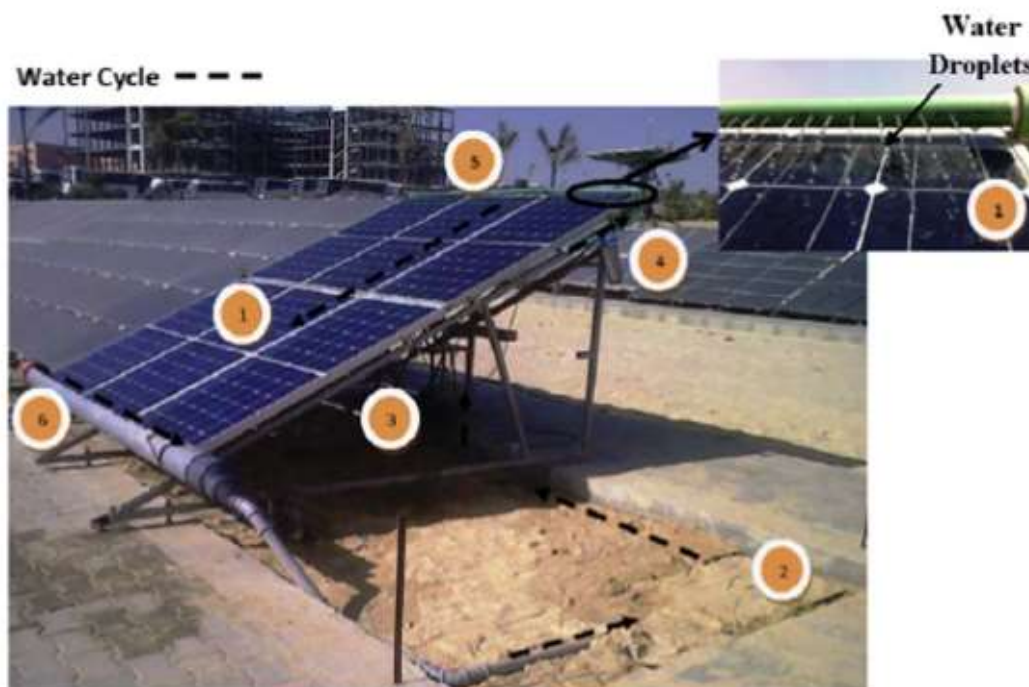
(۲) مخزن آب آلومینیوم

(۳) پمپ گریز از مرکز

(۴) فیلتر شفاف آب صنعتی

(۵) اسپری آب نازل

(۶) لوله تخلیه برای جمع آوری آب



شکل ۲-۱۲. روش اسپری کردن آب روی سطح ماژول [۴۱].

یکی دیگر از تکنیک‌هایی که می‌توان برای کاهش دمای سطح ماژول PV به منظور دستیابی به یک راندمان الکتریکی بالاتر استفاده کرد، استفاده از گردش اجباری هوا در پشت آن است، که نمونه این سیستم در شکل (۲-۱۳) مشاهده می‌شود. این سیستم شامل یک ماژول فتوولتائیک است، که در بالای صفحه فولادی با یک کانال هوا در زیر آن قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (۲-۱۳) دیده می‌شود هوا به عنوان سیال عامل از

طریق کانال‌ها توسط فن با یک نازل دمیده می‌شود. گرما از ماژول PV به وسیله تماس به هوا در کانال‌ها منتقل می‌شود، بنابراین، کاهش دمای عملیاتی سطح ماژول به منظور دستیابی به کارایی بیشتر الکتریکی دیده خواهد شد [۴۱]. اعداد روی شکل زیر موارد زیر را نشان می‌دهند:

(۱) ماژول PV

(۲) فن گردش اجباری

(۳) کانال هوا



شکل ۲- ۱۳. گردش اجباری هوا در پشت ماژول به منظور خنک سازی آن [۴۱].

علاوه بر روش‌های ذکر شده، تعدادی از سایر تکنیک‌های موثر برای خنک سازی ماژول‌های PV در جدول ۱-۲ گردآوری شده است.

جدول ۲-۱. خلاصه‌ای از روش‌های مختلف خنک‌کننده کاربردی برای افزایش کارایی ماژول های PV.

مرجع	نوع روش خنک کننده	روش خنک کاری	نتایج	درصد بهبود
[۸۲]	خنک کاری منفعل	سیستم هیبریدی ادغام شده با هیت سینک	ساختار موثر تر از طریق ترکیب سیستم خنک کاری با یک ماژول TE به دست می‌آید.	۳ تا ۸ درجه کاهش دما
[۴۳]	خنک کاری منفعل	سلول خورشیدی/ ماژول هیبرید میکروکانال	مقادیر متوسط بازده الکتریکی و حرارتی ماژول هیبریدی به ترتیب ۱۴/۷٪ و ۱۰/۸٪ می‌باشد.	۱۰/۸٪ و ۱۴/۷٪ افزایش بازده الکتریکی و بازده حرارتی به ترتیب
[۴۴]	خنک کاری فعال	برخورد جت سیال	سیستم خنک کننده جت / میکروکانال عملکرد بهتر نسبت به دستگاه‌های میکروکانال را نشان می‌دهد.	۷ درصد افزایش خنک کاری نسبت به میکروکانال
[۷۸]	خنک کاری منفعل	استفاده از نانو سیال	نانو سیال‌های TiO_2 و ZnO در مقایسه با آب خالص و Al_2O_3 ، انرژی کلی و بازده مطلوب تری را نشان می‌دهند.	افزایش ۲۸٪ بازده حرارتی را ZnO نسبت به آب خالص داشت
[۳۷]	خنک کاری منفعل	استفاده از ماده تغییر فاز دهنده	استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در ماژول PV دمای پایین تر و افزایش کارایی و تولید انرژی در مقایسه با پانل PV معمولی نشان می‌دهد.	افزایش ۸٪ در راندمان و کاهش ۱۵ درجه دما
[۳۹]	خنک کاری منفعل	غوطه ر سازی در مایع	حضور یک لایه نازک مایع منجر به افزایش کارایی سلول‌های خورشیدی CPV سیلیکونی و افزایش توان خروجی می گردد	حداکثر افزایش ۱۵ درصدی در توان خروجی
[۴۸]	خنک کاری فعال	اسپری کردن آب	روش خنک کننده اسپری آب پیشنهاد شده تاثیر مثبتی بر عملکرد پانل خورشیدی داشت.	افزایش ۱۶/۳٪ در توان و ۱۴/۱٪ در بازده الکتریکی
[۷۲]	خنک کاری منفعل	استفاده از نانو سیال	حضور نانو ذرات اثرات قابل توجهی بر کاهش دمای متوسط سلول‌های PV در مقایسه با آب خالص نشان داد.	۱۰٪ افزایش عملکرد ماژول
[۴۰]	خنک کاری منفعل	گردش طبیعی آب روی سطح ماژول	بهره‌وری صرفه جویی در انرژی، بیشتر از سیستم معمولی بود.	
[۷۷]	خنک کاری منفعل	استفاده از میکروکانال ترکیبی با نانو سیال	نتایج نشان می‌دهد که کانال مارپیچی کارایی بیشتری نسبت به کانال مستقیم دارد. نانو سیال دارای عملکرد بهتر برای کاهش دمای متوسط سلول PV در مقایسه با آب خالص است.	افزایش ۲۷ درصدی بازده الکتریکی با ۰۱٪ نانو سیال بوهمیت

[۵۲]	خنک کاری فعال	استفاده از نانو سیال مغناطیسی و اعمال میدان مغناطیسی	با اعمال یک میدان مغناطیسی متناوب در نانو سیال، راندمان کلی سیستم حدود ۴۵ درصد بهبود یافته است.	۴۵ درصد افزایش راندمان کلی
[۵۳]	خنک کاری منفعل	استفاده از میکروکانال و نانو سیال	استفاده از نانو سیال راندمان الکتریکی سلول های خورشیدی را بالاتر نشان می دهد	۱۳/۷۰٪ افزایش در بازده الکتریکی
[۵۴]	خنک کاری فعال	استفاده از برخورد یک دسته جت نانو سیال	ماژول PV با سیستم خنک کننده دسته جت نانو سیال بالاترین راندمان الکتریکی را نشان می دهد.	افزایش ۱۲/۷۵٪ بازده حرارتی و ۶۲/۵٪ در توان ماکزیمم با sic

۲-۵ مروری بر جت های سیال

جریان جت به جریان مستقیم و متمرکزی از سیال گفته می شود که از یک نازل با سرعت و فشار مشخص خارج شده و به درون محیط نسبتاً بزرگی از جنس همان سیال و حتی غیر از آن وارد شود.

تقسیم بندی مختلفی برای انواع جت سیال می توان در نظر گرفت. در یکی از تقسیم بندی ها، جت های سیال

به سه دسته زیر تقسیم بندی می شوند:

۱- جت برخوردی^۱

۲- جت نوسانی^۲

۳- جت مصنوعی^۳

۲-۵-۱ جت های برخوردی

یکی از مؤثرترین روش های افزایش نرخ انتقال حرارت و جرم، استفاده از فناوری جت های برخوردی می-

باشد. جت های برخوردی به عنوان یک مکانیزم موثر جهت سرمایش، گرمایش و خشک کردن انواع سطوح به

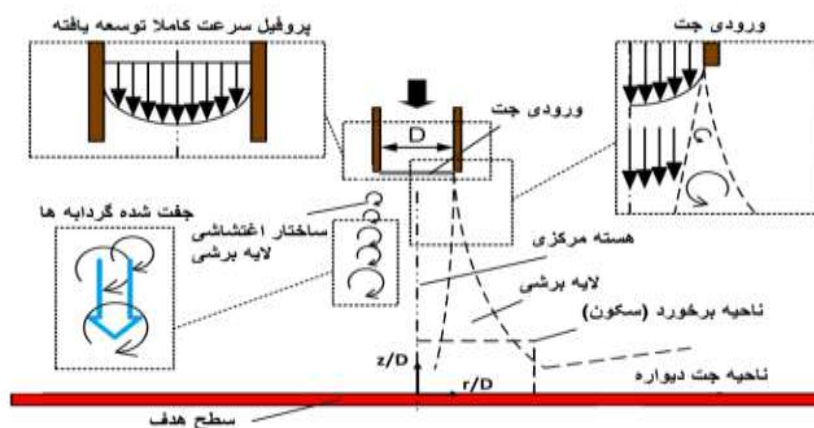
^۱ Impinging Jet

^۲ Pulsating Jet

^۳ Synthetic Jet

کار می‌روند. در اکثر موارد برخورد جت به صورت عمودی به صفحه هدف مد نظر می‌باشد، ولی در برخی از کاربردها از جت‌های مایل نیز استفاده می‌شود، که خواص حرارتی متفاوتی دارند. جت‌های برخوردی در صنایع، کاربردهای بسیاری از جمله انجام عملیات حرارتی در صنایع شیشه و فلزات، خنک‌کاری قطعات الکترونیکی و دستگاه‌های حساس ماشین کاری، خشک کردن در صنایع نساجی و کاغذ، برفک زدایی از سیستم‌های مختلف هواپیما و غیره دارند. از دیگر کاربردهای مهم جت‌های برخوردی می‌توان در خنک کردن بخش‌های مختلف توربین نظیر محفظه احتراق، محفظه توربین و پره‌های آن نام برد. با این کار امکان فعالیت توربین در دماهای بالاتر ممکن می‌گردد و سبب بالا رفتن بازده می‌شود. هم‌چنین، این امر سبب افزایش طول عمر و استحکام بخش‌های توربین می‌گردد.

جت‌های برخوردی با توجه به شکل نازل معمولاً به دو حالت جت شیاری^۱ و جت گرد^۲ تقسیم می‌شوند. در حالت شیاری، سطح مقطع نازل به صورت مستطیل بوده و در حالت گرد سطح مقطع آن به صورت دایروی و یا بیضوی می‌باشد. شکل (۲-۱۴) شماتیک یک نوع جت برخوردی بر روی صفحه تخت را نشان می‌دهد [۵۵].



شکل ۲-۱۴. ساختار جت سیال برخوردی بر روی صفحه تخت [۵۵]

^۱ Slot jet

^۲ Round jet

۱-۱-۵-۲ ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت در جت‌های برخوردی

هنگام عبور جریان سیال از مجاورت یک سطح صلب لایه مرزی سرعت و در صورت وجود اختلاف دما، لایه مرزی حرارتی نیز در مجاورت سطح جامد تشکیل می‌شود. چنان‌چه بتوان به گونه‌ای ضخامت این لایه را کاهش داد، بهبود قابل توجهی در افزایش میزان انتقال جرم، حرارت و ممنتوم حاصل خواهد شد. در میان تمامی روش‌های افزایش انتقال حرارت جابجایی، استفاده از فناوری جت‌های برخوردی یکی از موثرترین و جدیدترین روش‌ها است؛ زیرا دارای راندمان بالایی می‌باشد.

جت‌های برخوردی در مقایسه با روش‌های دیگر خنک‌کاری که از تغییر فاز بهره نمی‌برند به نحو موثرتری از سیال استفاده کرده و نرخ انتقال حرارت ناشی از آن به مراتب بالاتر می‌باشد. به عنوان نمونه، ضریب انتقال حرارت جابجایی در جت برخوردی تا بیش از سه برابر ضریب انتقال حرارت جابجایی در خنک‌کاری با همان دبی است. دلیل این موضوع نازک‌تر بودن لایه مرزی حرارتی در جت‌های با جریان موازی محصور^۱ برخوردی و تلاطم بیشتر جریان پس از برخورد است [۵۶، ۵۷].

به طور کلی، ویژگی‌های جریان جت به تنهایی بسیار پیچیده هستند و می‌توانند به آسانی با تغییر نرخ جریان، هندسه‌ی نازل و ... تحت تاثیر قرار گیرند. این ویژگی‌ها در جت‌های برخوردی با متغیرهای اضافی موثر بر جریان نظیر زاویه‌ی برخورد، فاصله از سطح برخورد و ... پیچیده‌تر نیز می‌شود. هنگام برخورد جریان جت با یک صفحه‌ی مسطح سه ناحیه‌ی مشخص از جریان مطابق شکل (۲-۱۵) به وجود می‌آید که عبارتند از:

۱- ناحیه ی جت آزاد^۲

۲- ناحیه ی سکون یا کاهش سرعت^۳

۳- ناحیه ی جت دیواره^۴

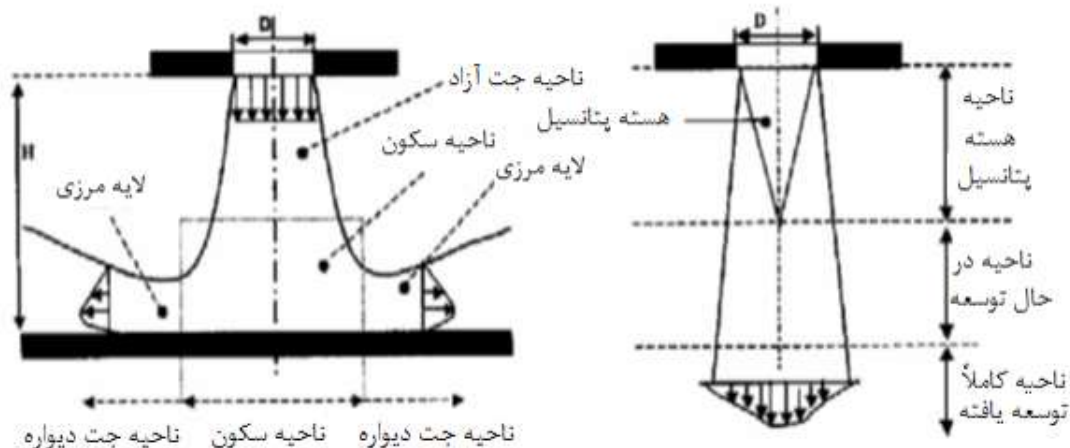
این سه ناحیه اگرچه به صورت مجزا بررسی می‌شوند اما وابسته به یکدیگر هستند.

^۱ Confined

^۲ Free Jet Region

^۳ Stagnation or Deceleration Region

^۴ Wall Jet Region



شکل ۲ - ۱۵. شماتیک جت سیال برخوردی بر روی صفحه تخت [۵۸].

۱-۱-۵-۲ ناحیهی جت آزاد

ناحیه‌ای که از نقطه‌ی انتشار جت شروع شده و وجود سطح برخورد بر روی توزیع سرعت آن بیشتر است، ناحیه‌ی جت آزاد نامیده می‌شود. در این ناحیه از مولفه‌ی سرعت در راستای عمود بر محور جت نسبت به مولفه‌ی محوری صرف نظر می‌شود. جریان در ناحیه‌ی جت آزاد به سه سمت هسته‌ی پتانسیل^۱، جریان در حال توسعه^۲ و جریان توسعه یافته^۳ تقسیم می‌شود (شکل ۲-۱۵). به محض خروج سیال از نازل با هوای ساکن محیط پیرامون خود مخلوط می‌شود که اصطلاحاً به این پدیده اختلاط می‌گویند.

وسعت ناحیه‌ی اختلاط با پیشروی جت افزایش و عرض آن توسط جریان برشی با حرکت به سمت پایین دست جریان کاهش یافته تا این که در فاصله‌ی معینی از دهانه‌ی خروجی نازل پس از رشد کامل به نقطه‌ای می‌رسد که در آن به خط مرکزی جت نفوذ می‌کند. این نقطه، نقطه‌ی منحصر به فردی است؛ زیرا در این نقطه سرعت همان سرعت خروجی جت بوده و اختلاط تاثیری بر آن ندارد. به این قسمت مثلثی شکل و غیر لزج از ناحیه‌ی جت آزاد، هسته‌ی پتانسیل گفته می‌شود.

^۱ Potential Core

^۲ Developing Flow

^۳ Developed Flow

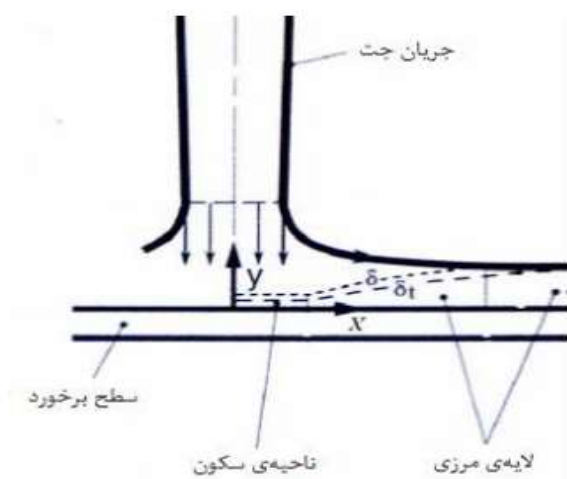
از جمله ویژگی‌های این قسمت این است که اساسا جریان در آن غیر چرخشی بوده، و به دلیل نبود اثرات چسبندگی، سرعت در تمامی نقاط آن تقریبا ثابت و برابر سرعت خروجی نازل است. پارامترهای موثر بر طول هسته‌ی پتانسیل شامل پروفایل سرعت در خروجی نازل و میزان آشفتگی جت است. در قسمت در حال توسعه به دلیل تقسیم مومنوم سرعت محوری جریان با پیشروی جت شروع به کاهش کرده و به شکل پروفیل زنگوله-ای در فضای اطراف توسعه می‌یابد. میزان آشفتگی نیز رفته رفته از قسمت هسته‌ی پتانسیل به سمت بخش‌های در حال توسعه و توسعه یافته افزایش می‌یابد. با افزایش فاصله نسبت به خروجی نازل، تبادل اندازه حرکت بین جت و محیط ساکن اطراف آن موجب وسیع‌تر شدن مرز آزاد جت و باریک‌تر شدن هسته‌ی پتانسیل می‌شود. پروفایل سرعت در خروجی جت یکنواخت است، ولی در سرتاسر مقطع عرضی جت در پایین دست آن غیر یکنواخت بوده و از سرعت مرکز جت با افزایش فاصله از خروجی نازل کاسته می‌شود. ناحیه‌ی جت آزاد در نازل-های مدور در صورتی که فاصله‌ی خروجی نازل تا هدف کمتر از دو برابر قطر نازل باشد، وجود نخواهد داشت [۵۸].

۲-۱-۱-۲ ناحیه‌ی سکون (کاهش سرعت)

ناحیه‌ای است که در آن جت با صفحه برخورد کرده و سرعت محوری جریان در مجاورت سطح برخورد به دلیل گرادیان فشار معکوس کاهش می‌یابد. در این ناحیه برخلاف ناحیه‌ی جت آزاد، جریان تحت تاثیر سطح برخورد قرار داشته و سرعت آن در جهت عمودی (امتداد y) کاهش و در جهت افقی (امتداد x) افزایش پیدا می‌کند؛ به طوری که جریان بر روی دیوار توسط یک گرادیان فشار ثابت تقویت شود. پس از آن که جریان، سرعت خود را در جت محوری از دست داد، در راستای شعاعی به اندازه ۵۳° می‌چرخد، که این امر موجب رسیدن فشار سکون به بیشینه مقدار هنگام ورود به منطقه‌ی سکون می‌شود. ناحیه‌ی سکون تا جایی ادامه می‌یابد که گرادیان فشار در راستای افقی صفر شود. در ناحیه‌ی سکون به دلیل گرادیان فشار زیاد ضخامت لایه‌ی مرزی بسیار کم

است، در نتیجه ماکزیمم ضریب انتقال حرارت و متعاقبا عدد ناسلت^۱ در این ناحیه رخ می‌دهد. در این ناحیه جریان در حوالی نقطه‌ی سکون، آرام و ضخامت لایه‌ی مرزی ثابت بوده، اما ضخامت لایه‌ی مرزی سرعتی نسبت به لایه مرزی حرارتی بیشتر است (شکل ۲-۱۶).

ناحیه‌ی سکون عموماً به اندازه‌ی ۱/۲ برابر قطر نازل برای نازل‌های مقطع گرد بالای دیواره تشکیل می‌شود. ضخامت لایه‌ی مرزی در ناحیه‌ی سکون بیشتر از ۱٪ قطر جت رشد نمی‌کند [۵۸-۶۰].



شکل ۲-۱۶. تشکیل لایه مرزی در سطح برخورد [۵۸].

۳-۱-۱-۵-۲ ناحیه‌ی جت دیواره

ناحیه‌ای است که در آن سیال به موازات صفحه‌ی هدف روی آن جریان یافته و از مولفه‌ی سرعت محوری جت در برابر مولفه‌ی سرعت موازی با صفحه صرف نظر می‌شود. در این ناحیه اثر گرادیان فشار دیگر ثابت نبوده و حتی افزایش شدید آشفتگی جریان نیز می‌تواند رخ دهد. همچنین، در این ناحیه لایه‌ی مرزی بر روی صفحه‌ی برخورد در جهات پیرامونی رشد کرده و با افزایش ضخامت لایه‌ی مرزی، رفته رفته میزان انتقال حرارت کاهش می‌یابد. جریان پس از ناحیه‌ی برخورد و صفر شدن گرادیان فشار در راستای افقی در امتداد دیواره شتاب می‌گیرد. به دلیل این که جریان به طور مداوم، سیال با اندازه حرکت صفر را از محیط به داخل خود می‌کشد، جریان

¹ Nusselt number

شتابدار خروجی از منطقه‌ی سکون در نهایت تا جایی ادامه می‌یابد که فشار روی سطح به فشار محیط ساکن پیرامون نزدیک شود. جهت دیواره در جت‌های گرد حداقل به اندازه‌ی ۰/۷۵-۳ برابر قطر مقطع از محور جت ضخامت دارد، و هرچه از محصور نازل دورتر شود به شکل پیوسته افزایش می‌یابد [۵۷].

۲-۱-۵-۲ انواع جت‌های برخوردی

انواع رایج جت‌های برخوردی را مطابق شکل (۲-۱۷) می‌توان بسته به فاصله‌ی نازل تا سطح برخورد به دو گروه جت‌های برخوردی محدود^۱ و آزاد^۲ تقسیم کرد.

اگر صفحه‌های موازی با سطح برخورد در محل مجرای خروجی نازل قرار گیرد، و متعاقباً عملکرد جت تحت تاثیر جریان‌های برگشتی^۳ قرار گیرد به آن جت محدود می‌گویند. جت‌های محدود در بسیاری از صنایع از جمله خنک‌کاری پره‌های توربین کاربرد دارند.

اگر صفحه‌ی موازی با سطح برخورد وجود نداشته باشد و یا در فاصله‌ای کاملاً دور از آن قرار گیرد به طوری که میدان جریان سیال از آن تاثیر نپذیرد، در این حالت آن را جت آزاد می‌نامند. جت‌های برخوردی محدود و آزاد هر یک مزایای خاص خود را دارند، که از آن جمله می‌توان به مزیت جت‌های محدود در قابلیت ساخت آن-ها در فضاهای کوچکتر و مزیت جت‌های آزاد در طراحی ساده و تولید آسان آن‌ها اشاره کرد.



شکل ۲-۱۷. الف) نمایی از جت آزاد، ب) جت محدود [۶۰].

¹ Confined Jet

² Free Jet

³ Reverse Flow

جت‌های آزاد از نظر خواص فیزیکی سیال خروجی از نازل نسبت به سیال محیط، خود به دو گروه جت‌های سطح آزاد و جت‌های غوطه‌ور، مطابق شکل (۲-۱۸) طبقه‌بندی می‌شوند [۶۰].



شکل ۲- ۱۸. (الف) نمایی از جت غوطه‌ور، (ب) جت سطح آزاد [۶۰].

در جت‌های سطح آزاد، مایع خروجی از نازل قبل از برخورد به سطح هدف به درون یک محیط گازی با خواص فیزیکی کاملاً متفاوت تخلیه می‌شود. این جت‌ها سطح آزاد نامیده می‌شوند؛ زیرا سطح آزاد بلافاصله بعد از خروج مایع از نازل شکل می‌گیرد. پارامترهای موثر بر جت‌های سطح آزاد شامل نیروهای گرانشی، کشش سطحی و فشاری است.

همان‌طور که می‌دانیم تنش‌های برشی سیال باعث افزایش آشفتگی جریان می‌شود اما اثر این آشفتگی روی جریان و انتقال حرارت این جت‌ها قابل چشم‌پوشی است. جت مایع احاطه شده توسط یک محیط در فاز گازی می‌تواند مثالی برای این نوع جت‌ها باشد. در جت‌های غوطه‌ور، سیال از یک نازل به داخل سیالی با خواص فیزیکی مشابه با سیال جت پاشیده می‌شود. نمونه‌ای از متداول‌ترین جت‌های غوطه‌ور، جت هوا می‌باشد، که از جمله جت‌های فاز گازی است. برخلاف جت‌های سطح آزاد، در جت‌های غوطه‌ور جریان تحت تاثیر تنش برشی سطح آزاد خود قرار می‌گیرد، و در نتیجه جریان جت مقدار قابل توجهی از سیال ساکن محیط پیرامون را همراه با خود به درون جریان می‌برد. سیال ورودی بر روی ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت جت تاثیرگذار خواهد

بود. مطالعات نشان داده است که در اعداد رینولدز بیشتر از ۴۰۰۰، جت‌های غوطه‌ور ضریب انتقال حرارت بالاتری نسبت به جت‌های سطح آزاد دارند [۶۰].

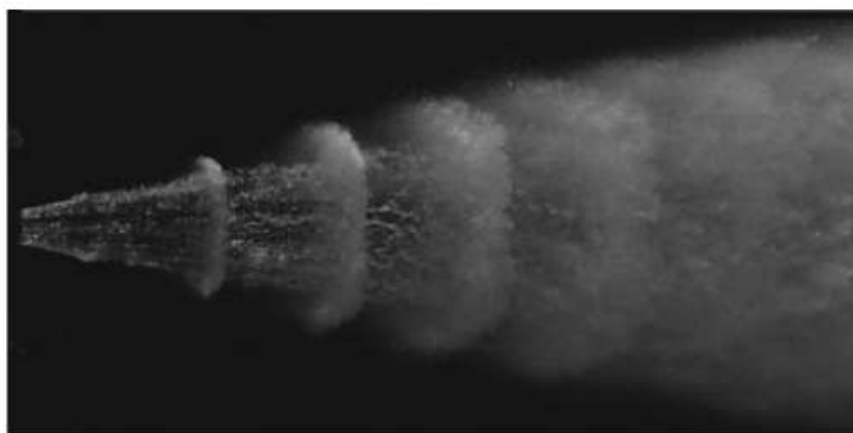
۳-۱-۵-۲ جت آرام و مغشوش

بر اساس عدد رینولدز (Re) جریان ورودی از نازل، جت‌های برخوردی به دو دسته عمده آرام و مغشوش تقسیم می‌شوند. با توجه به مکانیسم پیچیده جریان در جت‌های برخوردی و تغییر جهت جریان، در اکثر مراجع، عدد Re گذار به جریان توربولنس در انواع جت‌های برخوردی اعم از دایروی و شکاری، بین ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ گزارش شده است. مطالعات عددی جت‌های برخوردی مغشوش با انواع سیالات عامل اعم از جت گازی و یا جت مایع، به منظور شبیه‌سازی عددی جریان توربولنس به صورت گسترده در چند دهه اخیر نشان از اهمیت موضوع در این زمینه دارد.

۲-۵-۲ معرفی جت‌های نوسانی

یکی از راهکارهایی که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است و باعث بهبود انتقال حرارت از سطوح می‌شود، استفاده از جت‌های نوسانی است. ایده‌ی اصلی جت نوسانی بر مبنای باز و بسته کردن مداوم خروجی نازل (شیر سلونوئیدی) است، به طوری که فرکانس نوسانی مورد نیاز بدست آید. کنترل شیر سلونوئید توسط جریان الکتریکی که نیروی مغناطیسی لازم برای باز و بسته کردن آن را تامین می‌کند، انجام می‌شود. نوسانات جت می‌تواند به صورت امواج مربعی و سینوسی در فرکانس‌های مختلف تولید شود. مطالعات انجام شده نشان دهنده‌س این مطلب است که نرخ انتقال حرارت حاصل از جت‌های نوسانی به مراتب بیشتر از جت‌های برخوردی در شرایط یکسان است. ماهیت متناوب یک جت نوسانی به طور موثرتری موجب توسعه‌ی مجدد و از بین رفتن لایه مرزی در هر دوره‌ی نوسان می‌گردد، که منتج به نازک‌تر شدن لایه‌ی مرزی در مقایسه با جت پایدار معادل با آن می‌شود. این حالت می‌تواند با استفاده از مقداری انرژی اضافی بدون نیاز به افزایش فشار یا

نرخ جریان جت حاصل شود. تاثیر پارامترهای نوسانی نظیر فرکانس نوسان را می‌توان با تغییر پارامترهای گوناگون مانند شدت جریان جت، فاصله‌ی نازل تا سطح و همچنین بر روی هندسه‌ی مختلفی با کنترل مستقیم نوسانات جت بررسی نمود. در شکل (۲-۱۹) نمایی از یک جت نوسانی که در آن آب به عنوان سیال عامل استفاده گردیده، نشان داده شده است [۶۱].



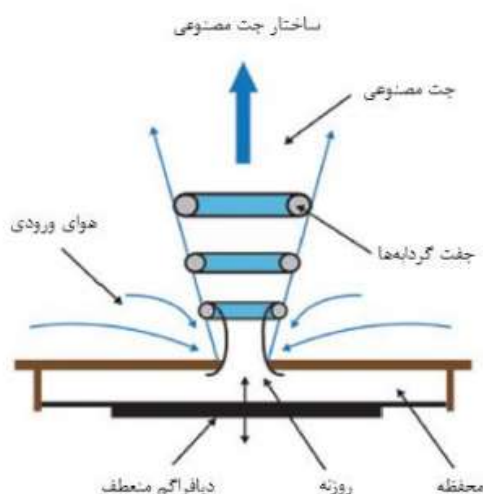
شکل ۲-۱۹. نمایی از یک جت نوسانی [۶۲].

۳-۵-۲ معرفی جت‌های مصنوعی

جت‌های مصنوعی یکی دیگر از ابزارهای مورد استفاده در صنایع جهت بهبود میزان انتقال حرارت هستند، که از سه قسمت روزه، محفظه و دیافراگم منعطف با قابلیت نوسانی تشکیل شده‌اند شکل (۲-۲۰). این جت‌ها از نظر نوع جریان سیال در زمره‌ی جت‌های آشفته قرار می‌گیرند. از جمله مزایای جت‌های مصنوعی این است که می‌توان از آن‌ها در فضاهای محدود نظیر قطعات الکترونیکی کوچک و تراشه‌های کامپیوتری جهت دفع حرارت استفاده کرد. همچنین، علاوه بر این که دارای ماهیت ساختاری ساده‌ای هستند، و نصب و راه اندازی راحتی دارند، از جنبه‌ی اقتصادی نیز به صرفه هستند. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد این نوع جت‌ها این است که کاملاً از سیال کاری سیستم جریان شکل می‌گیرند، و بنابراین، می‌توانند مومنتوم خطی را به سیستم جریان بدون تزریق جرم خالص در سراسر مرز جریان انتقال دهند. با وجود این که این نوع جت‌ها بدون تزریق جرم

خالص شکل می‌گیرند، اما ضربه‌ی هیدرودینامیکی سیال تزریقی و در نتیجه مومنتوم جت دنبال آن غیر صفر است.

جت‌های مصنوعی می‌توانند بر روی محدوده‌ی گسترده‌ای از طول و مقیاس زمانی تولید شوند تا ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها را در عملگرهای شارگونه برای کاربردهای کنترل جریان مورد توجه قرار داد [۶۳].



شکل ۲-۲۰. نمایی از یک مولد جت مصنوعی [۶۳].

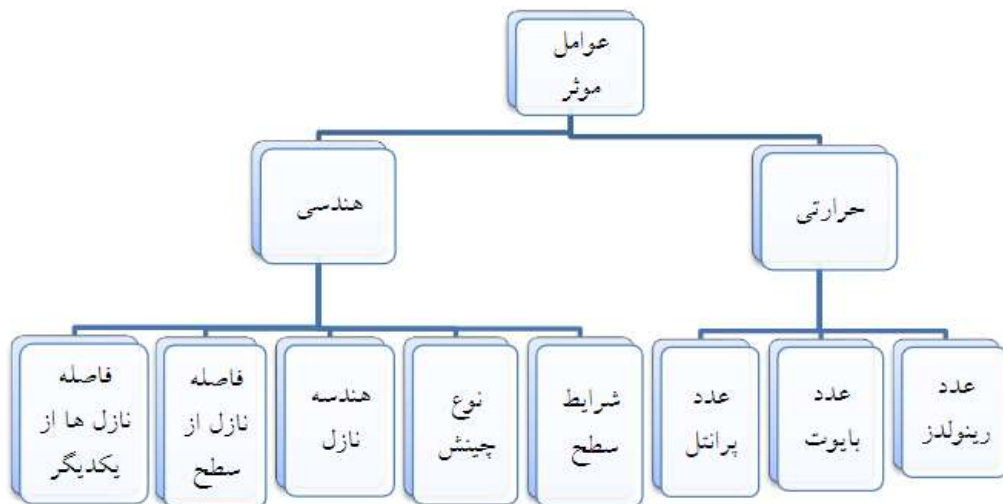
۴-۵-۲ کاربرد جت‌های برخوردی در بهبود انتقال حرارت

آنچه معمولاً از مطالعات اثر جت بر انتقال حرارت به دست می‌آید، اطلاعات ضرایب انتقال حرارت در قالب عدد ناسلت است، که با پشته‌های آنالیز ابعادی به صورت تابعی از عدد رینولدز جت، عدد پرناتل^۱ سیال، فاصله‌ی عمودی دهانه‌ی خروجی جت از صفحه‌ی برخوردی، فاصله‌ی شعاعی از نقطه‌ی سکون و زاویه‌ی برخورد ارائه می‌گردد.

در شکل (۲-۲۱) عوامل مؤثر بر انتقال حرارت جت برخوردی مشاهده می‌شود. هر چه اندازه فاصله جت‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر باشد، انتقال حرارت بر روی سطح هدف یکنواخت‌تر می‌شود.

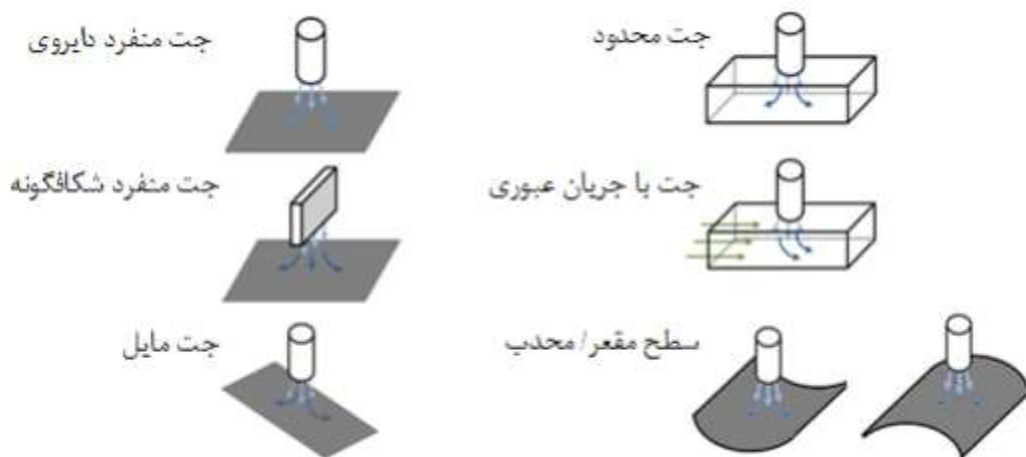
¹ Prandtl number

فاصله نازل از سطح هدف بر تداخل جت‌ها قبل و بعد از برخورد با سطح هدف مؤثر است. با افزایش فاصله نازل از سطح، به علت وجود تنش برشی بین دیواره جت با هوای آزاد، سرعت برخورد جت با سطح هدف کاهش می‌یابد که این امر کاهش عدد ناسلت را به همراه دارد.



شکل ۲-۲۱. عوامل مؤثر بر انتقال حرارت جت برخوردی.

انتقال حرارت جابجایی ناشی از برخورد یک جت از سطوح مختلف را می‌توان در بسیاری از مقاطع خروجی نازل هم‌چون مستطیلی، دایره‌ای، و سطوح گوناگونی از سطح هدف نظیر مسطح، مقعر، محدب، مایل و ... در انواعی از جت‌ها مورد مطالعه قرار داد (شکل ۲-۲۲).



شکل ۲-۲۲. پیکربندی مختلف جت برخوردی [۶۴].

گاردن^۱ و آکفیرات^۲ [۶۴] نقش جریان آزاد درهم بر روی انتقال حرارت بین یک جت برخوردی دو بعدی و صفحه‌ی مسطح را مطالعه کردند و تغییرات غیر یکنواختی را برای انتقال حرارت در راستای جریان مشاهده کردند. آن‌ها دریافتند زمانی که جت در مجاورت انتهای ناحیه‌ی هسته‌ی پتانسیل به صفحه برخورد می‌کند، عدد ناسلت سکون، ماکزیمم مقدار خود را دارد. آن‌ها همچنین، نرخ انتقال حرارت محلی و متوسط حاصل از یک صفحه‌ی مسطح دما ثابت و جت‌های شکاف گونه‌ی برخوردی را برای جت منفرد و آرایه‌ای از جت‌ها و عدد رینولدز در محدوده‌ی ۵۰۰۰-۲۰۰۰ و فاصله‌ی نازل تا صفحه در محدوده‌ی ۶۳-۱۴ میلی متر، بررسی کردند، و رابطه‌ای برای عدد ناسلت نقطه‌ی سکون جت منفرد و عدد ناسلت متوسط آرایه‌ای از جت‌ها به صورت زیر ارائه دادند:

$$Nu_0 = 1.2 Re^{0.58} \left(\frac{Z}{B} \right)^{-0.62} \quad (۲-۲)$$

$$Nu_{ave} = 0.36 Re^{0.62} \quad (۳-۲)$$

^۱ Gardon

^۲ Akfirat

در این رابطه Nu_0 و Nu_{ave} به ترتیب عدد ناسلت نقطه‌ی سکون و متوسط، Re عدد رینولدز و Z/B فاصله‌ی بی بعد نازل تا صفحه‌ی برخورد می‌باشد.

هانگ^۱ و ال گنک^۲ [۶۵] در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی، به بررسی ضریب انتقال حرارت جت برخوردی مدور به قطر d به یک صفحه‌ی مسطح پرداختند. رابطه‌ای که آن‌ها با استفاده از مطالعات پیشین دیگران و نتایج تجربی برای عدد ناسلت متوسط در فاصله‌ی شعاعی r از نقطه‌ی سکون، فاصله‌ی شعاعی بی بعد از نقطه‌ی سکون $(R=r/d)$ ، $0 < r/d < 10$ ، $6000 < Re < 60000$ پیشنهاد دادند به صورت زیر است:

$$Nu_{ave} = Re^{0.76} Pr^{0.42} (a + bH + cH^2) \quad (4-2)$$

که در آن H نسبت ارتفاع به عرض جت در صفحه خروجی نازل و ضرایب a ، b و c توابع چند جمله‌ای از R بوده که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده‌اند.

۶-۲ پیشینه تحقیق

در منابع تحقیقاتی گزارش شده است که فقط حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد از تابش خورشیدی جذب شده توسط ماژول PV را می‌توان به برق تبدیل کرد و بقیه به عنوان گرما از بین می‌روند. بین بازده تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته و دمای سطح ماژول‌های فتوولتائیک رابطه مستقیم وجود دارد، و حداکثر مقادیر بازدهی بین ۱۴ تا ۱۷ درصد است. کارایی ماژول‌های PV به ازای هر ۱ درجه سانتیگراد افزایش دمای سطح آن‌ها، حدود ۰/۳ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین، پیدا کردن روش‌های کارآمد برای خنک‌سازی ماژول‌های PV به منظور حذف مقدار بالایی از حرارت از سطح آن‌ها به طور جدی مورد نیاز است. با توجه به دامنه کاری این تحقیق، مقالات بررسی شده را می‌توان در دو گروه دسته‌بندی نمود: گروه اول به کاربردهای روش برخورد دسته جت سیال در

¹ Huang

² El-Genk

خنک‌کاری ماژول‌های خورشیدی اختصاص دارد، و گروه دوم به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه خنک‌سازی ماژول‌های خورشیدی با استفاده از نانو سیالات و تاثیر سیال عامل بر خنک‌کاری می‌پردازد.

۱-۶-۲ خنک‌کاری ماژول‌های فتوولتائیک با استفاده از اسپری آب یا برخورد جت سیال

در مطالعه عبدل زاده^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۶۶]، به بررسی امکان سنجی بهبود عملکرد یک سیستم فتوولتائیک با پمپ کردن و اسپری آب بر روی سطح بالایی پرداخته شده است. نتایج آزمایشگاهی با سیستم‌های سنتی مقایسه شده، و نشان داده شده است که توان تولیدی ماژول فتوولتائیک با اسپری کردن آب بر روی سطح آن افزایش می‌یابد. این مسئله می‌تواند کارایی سیستم و سرعت جریان پمپ را در طول عملیات به طور قابل توجهی افزایش دهد. اندازه‌گیری جریان اتصال کوتاه ماژول نشان داده است که اسپری کردن آب بر روی سطح بالایی ماژول باعث بهبود عملکرد سیستم می‌شود.



شکل ۲-۲۳. استفاده از روش اسپری کردن آب بر روی سطح بالایی ماژول فتوولتائیک [۶۶].

نیزتیک^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۴۸] یک روش خنک‌کننده برای ماژول‌های فتوولتائیک ارائه کرده‌اند، که شامل اسپری کردن آب روی سطح ماژول است. روش اسپری روی سطوح ماژول یک روش خنک‌کننده

¹Abdolzadeh

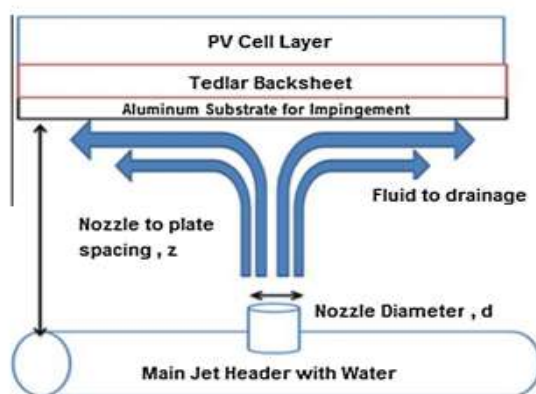
² Nizetic

جایگزین است؛ به این معنی که هر دو طرف ماژول PV به طور همزمان با جت آب خنک‌کاری می‌شود. عکس واقعی این سیستم خنک‌کاری در شکل (۲-۲۴) آمده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با استفاده از این روش می‌توان به حداکثر افزایش کلی برابر ۱۶/۳٪ در توان الکتریکی خروجی و افزایش کلی ۱/۱۴٪ در بازده الکتریکی ماژول PV دست یافت. علاوه بر این، امکان کاهش دمای ماژول از 54°C (پانل خورشیدی خنک نشده) تا 24°C در حالت خنک‌کاری همزمان صفحه بالایی و پایینی ماژول PV فراهم شده است. امکان سنجی اقتصادی نیز برای روش اسپری آب در سیستم خنک‌کاری پیشنهاد شده تعیین شده است، که در آن مزیت اصلی این روش خنک‌کاری راجع به سطح ماژول PV و اثر خود تمیز کردن آن است، که علاوه بر آن به عنوان یک تقویت کننده به میانگین برق تولیدی منتقل می‌شود.



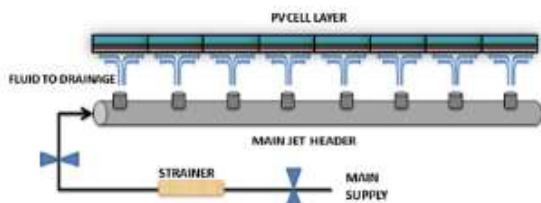
شکل ۲-۲۴. استفاده از روش اسپری کردن آب بر روی سطوح بالایی و پایینی ماژول فتوولتائیک [۴۸].

در مطالعه بهیداراه^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۶۷]، ارزیابی عملکرد آزمایشگاهی و عددی برای دو حالت شامل یک سیستم PV بدون خنک کننده و یک سیستم PV شامل خنک کننده انجام شده است. مدل خنک کننده شامل مدل نوری، تابشی، حرارتی، هندسی و الکتریکی برای تجزیه و تحلیل عملکرد کلی سیستم PV است. شماتیک این سیستم خنک کاری در شکل (۲-۲۵) و عکس واقعی آن در شکل (۲-۲۶) آمده است. مدل هندسی جت برخورد کننده برای ماژول PV برای تجزیه و تحلیل انتقال گرما تک نازل به منظور تجزیه و تحلیل دمای ماژول، توان خروجی و بازده تبدیل توسعه داده شده است. برای پیش‌بینی دقیق عملکرد ماژول PV، مدل الکتریکی هفت پارامتری استفاده شده است، در حالی که برای محاسبات تشعشع جذب شده مدل آسمان ایزوتروپیک استفاده شده است. اندازه گیری دما نشان داده است که دمای ماژول برای بدون خنک کننده و با استفاده از خنک کاری به ترتیب ۶۹/۷ و ۴۷/۶ درجه سانتیگراد در ماه ژوئن و دسامبر است. با استفاده از خنک کننده جت سیال، دمای متوسط ماژول به ۳۶/۶ درجه سانتیگراد در ماه ژوئن و ۳۱/۱ درجه سانتیگراد در ماه دسامبر کاهش یافته است. با استفاده از خنک کاری جت سیال در ماه ژوئن، توان خروجی و بازده تبدیل به ترتیب، ۵۱/۶٪ و ۶۶/۶٪ افزایش یافته است. به همین ترتیب، نتایج ماه دسامبر نشان داده است که بهبود عملکرد با ۴۹/۶٪ در توان خروجی و ۸۲/۶٪ در بهره‌وری تبدیل می‌باشد.



شکل ۲-۲۵. شماتیک سیستم خنک کاری ماژول فتوولتائیک با استفاده از روش برخورد دسته جت سیال [۶۷].

¹ Bahaidarah



Schematic of Jet Impingement Cooling Setup



Fabrication of Plexiglass frame and PV String Installation.



Jet Impingement Test Rig Installed on Site

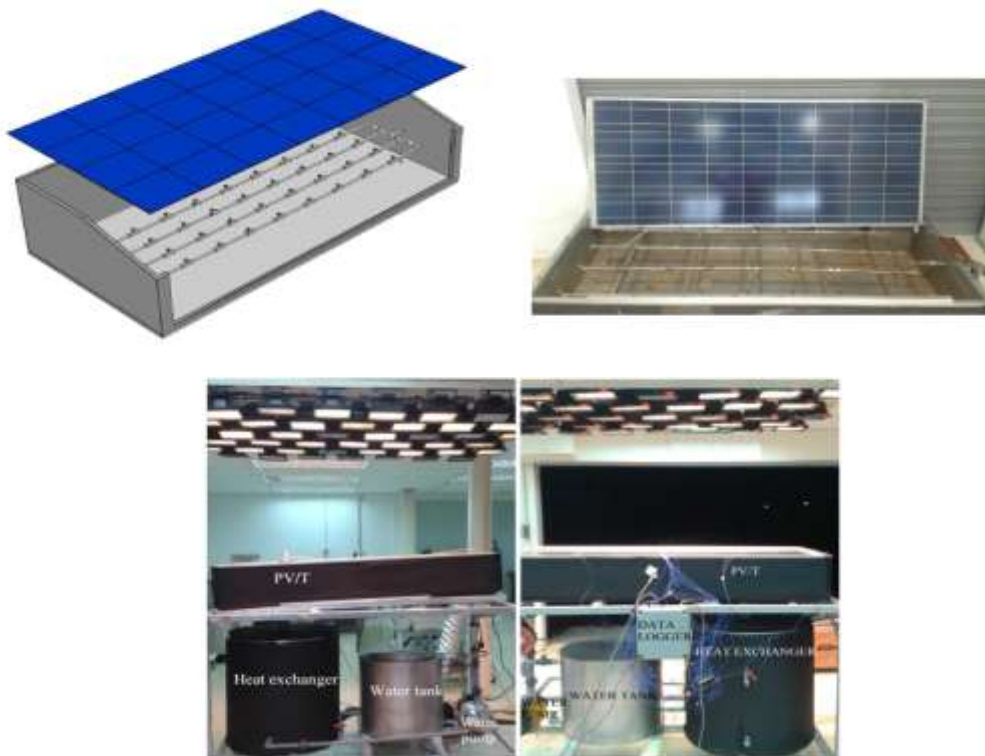


Adjustable stand for PV string

شکل ۲-۲۶. ست آپ آزمایشگاهی خنک کاری مائژول فتوولتائیک با استفاده از روش برخورد جت سیال [۶۷].

حسن^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۵۴]، به بررسی آزمایشگاهی استفاده از آب و نانوسیالات SiC ، TiO_2 و SiO_2 برای خنک کاری مائژول فتوولتائیک با برخورد دسته جت سیال بر روی سطح آن پرداختند. این سیستم (شکل ۲-۲۷) شامل چهار لوله موازی و ۳۶ نازل است، که به طور مستقیم مایع را به پشت جمع کننده PVT تزریق می کند. عملکرد الکتریکی جمع کننده PVT بر اساس میانگین دمای صفحات جاذب PVT تعیین شده است. سیستم نانو سیال $\text{SiC}/\text{آب}$ بالاترین راندمان الکتریکی و حرارتی را دارا بوده است. بازده حرارتی، الکتریکی، ترکیبی حرارتی فتوولتائیک به ترتیب ۱۲/۷۵٪، ۸۵٪ و ۹۷/۷۵٪ در تابش خورشیدی 1000 W/m^2 و سرعت جریان ۰/۱۶۷ کیلوگرم در ثانیه و دمای محیط حدود ۳۰ درجه سانتیگراد بوده است. علاوه بر این، $P_{\max}$ سیستم فتوولتائیک با نانو سیال SiC در مقایسه با مائژول PV معمولی ۶۲/۵٪ افزایش یافته است.

¹ Hasan

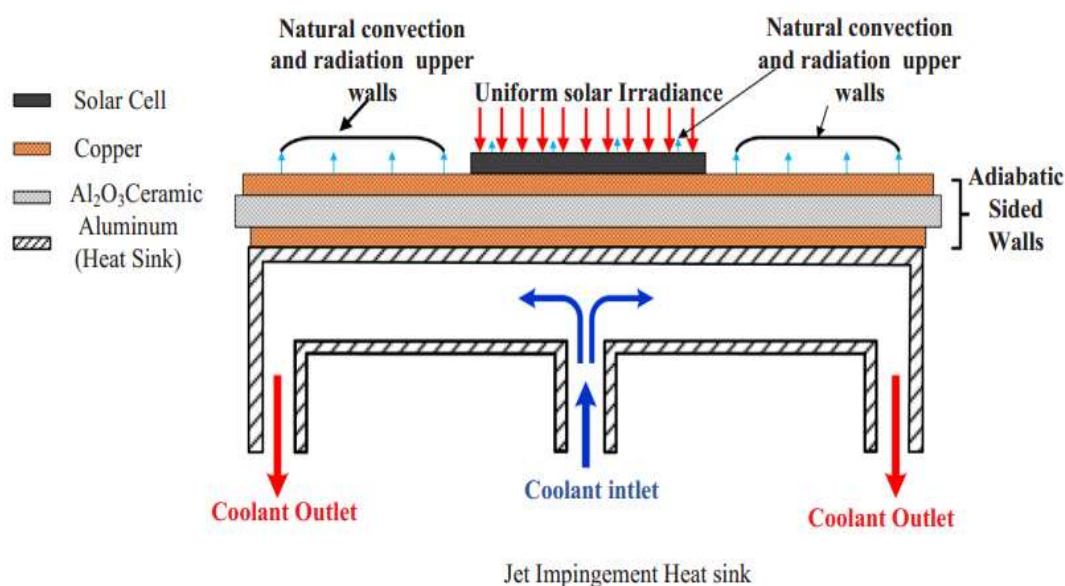


شکل ۲- ۲۷. استفاده از روش برخورد دسته جت سیال برای خنک سازی ماژول فتوولتائیک [۵۴].

ابوزاهد^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۶۶]، به بررسی و مطالعه، توسعه یک مدل جامع سه بعدی برای یک سیستم فتوولتائیک/ حرارتی (HCPV/T) متمرکز کننده بالا پرداختند. شماتیک این سیستم خنک‌کاری در شکل (۲-۲۸) آمده است. این مدل شامل یک مدل حرارتی برای یک سلول خورشیدی سه گانه است، که با یک مدل سیال-حرارتی برای چهار طرح متمایز از برخورد جت محدود شده ادغام شده است. نتایج نشان داده است که بازده الکتریکی ماژول با افزایش دبی جریان خنک کننده افزایش می‌یابد، و با استفاده از پیکربندی جریان جابجایی می‌توان یکنواختی کافی دمایی را به دست آورد. لازم به ذکر است که با افزایش دبی جرمی خنک کننده، تنش حرارتی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. تجزیه و تحلیل اکسرژیتهی نشان داده است که در

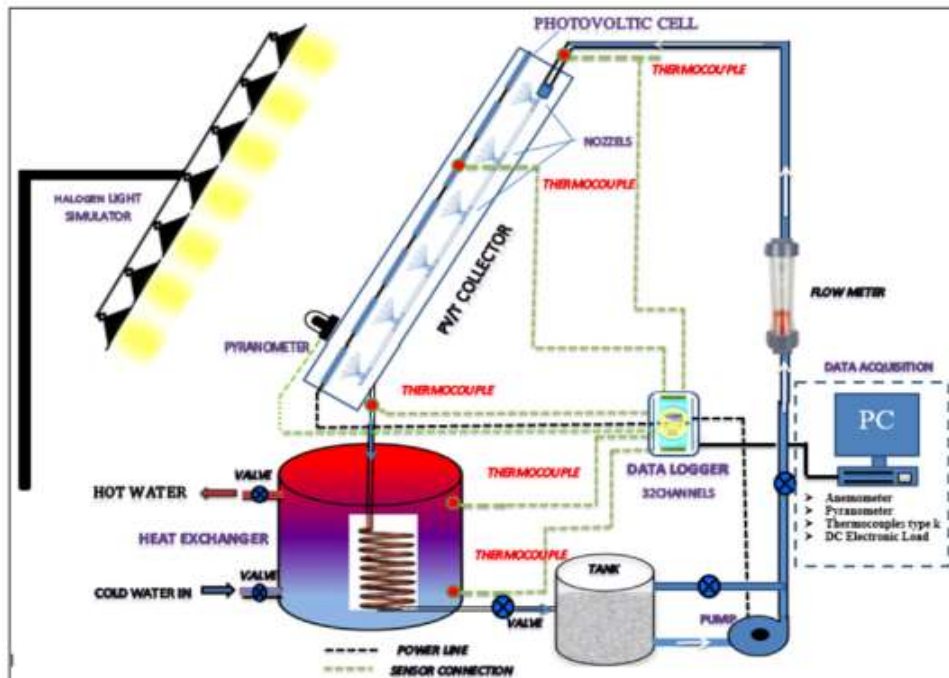
¹ Abo-Zahhad

طراحی تک جت، حداکثر بهره‌وری، حداکثر اکسرژی ۵۳/۲۵٪ به دست آورده است، در حالی که دبی جریان ۲۵ گرم در دقیقه بوده است.



شکل ۲-۲۸. شماتیک سیستم خنک‌کاری ماژول فتوولتائیک با استفاده از روش برخورد جت آب [۶۶].

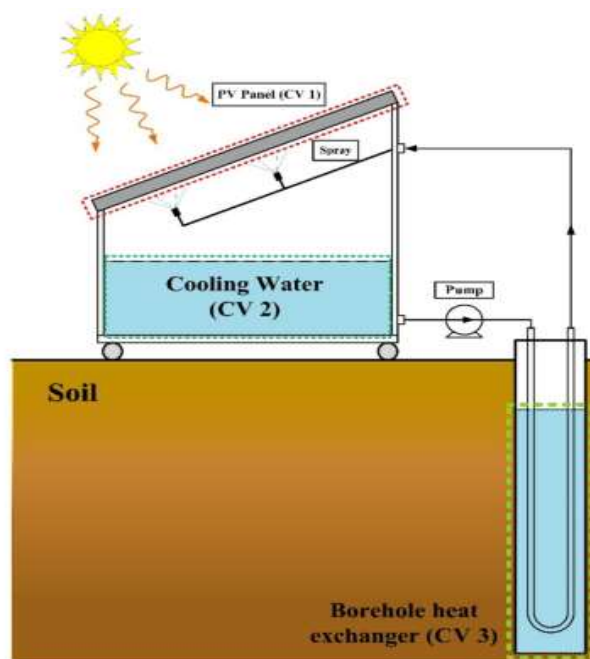
حسن و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۶۹]، به بررسی آزمایشگاهی استفاده از برخورد جت آب برای خنک‌کاری ماژول فتوولتائیک پرداختند. شماتیک این سیستم خنک‌کاری در شکل (۲-۲۹) آمده است. جمع‌کننده خورشیدی فتوولتائیک حرارتی (PVT) با برخورد جت آب در این مطالعه طراحی و ساخته شده است. سطوح مختلف تابش خورشیدی از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ W/m^2 در آزمایش‌ها بررسی شده‌اند. سرعت جریان جرمی آب در هر سطح تابش خورشیدی از ۰/۰۳۳ تا ۰/۱۶ کیلوگرم در ثانیه تغییر کرده است. پس از آن، بازده حرارتی، PV و PVT ترکیبی تعیین شده است. ضریب انتقال حرارت بالایی بین ماژول PV و آب در استفاده از برخورد جت آب مشاهده شده است. حداکثر کارایی حرارتی، PV و PVT با برخورد جت آب به ترتیب ۷۲٪، ۱۱۳۵٪ و ۸۱٪ در سطح تابش خورشیدی $1000 W/m^2$ بوده است.



شکل ۲- ۲۹. شماتیک سیستم آزمایشگاهی استفاده از روش برخورد جت آب برای خنک سازی ماژول فتوولتائیک [۶۹].

در مطالعه یانگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۷۰] یک سیستم خنک کننده به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است تا مشکل کاهش راندمان ماژول فتوولتائیک را کاهش دهد، و یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی عملکرد سیستم ارائه دهد. این سیستم خنک کننده، ماژول را با اسپری کردن آب روی صفحه پشتی پانل خنک می‌کند، و آب را به مخزنی که در زمین قرار گرفته است، می‌ریزد. شماتیک این سیستم خنک کاری و عکس واقعی آن به ترتیب در شکل (۲-۳۰) و (۲-۳۱) آمده است. برای افزایش ظرفیت خنک سازی، آب بازیافتی در یک مبدل حرارتی U شکل که در چاه موجود نصب شده است، جمع شده و مبادلات حرارتی آب با انرژی زمین گرمایی چاه کم عمق انجام می‌شود. سرانجام، مجدداً با اسپری کردن آب، پانل خنک می‌شود. نتایج تجربی و مدل‌های ریاضی نشان داده است که سیستم خنک کننده پیشنهادی می‌تواند کارایی ماژول فتوولتائیک را بهبود بخشد.

¹ Yang



شکل ۲-۳۰. شماتیک سیستم آزمایشگاهی استفاده از روش اسپری کردن آب برای خنک سازی ماژول فتوولتائیک [۷۰].



شکل ۲-۳۱. عکس واقعی سیستم آزمایشگاهی استفاده از روش اسپری کردن آب برای خنک سازی ماژول فتوولتائیک [۷۰].

۲-۶-۲ کاربرد نانو سیالات در خنک کاری ماژول های فتوولتائیک

همان طور که پیش تر گفته شد، کارهای انجام شده در زمینه کاربرد نانو سیال در انرژی خورشیدی بیشتر بر روی خنک سازی انواع کلکتورهای خورشیدی متمرکز شده اند، که در این بخش به بررسی مطالعات انجام گرفته در این زمینه پرداخته می شود.

در سال ۲۰۱۰ اوتانیکار^۱ و همکاران [۷۱] بصورت آزمایشگاهی و عددی به بررسی اثرات نانوسیال از جمله نانوتیوب های کربنی^۲، گرافیت^۳ و نقره^۴ بر روی عملکرد یک کلکتور جذب مستقیم خورشیدی در مقیاس میکرو پرداختند. نتایج حاصل با کلکتور معمولی که انرژی خورشیدی بر روی سطح سیاه صفحه جذب می شود، مقایسه شده و همان طور که از نمودار پیدا است، افزودن مقدار کمی از نانو ذرات منجر به بهبود چشمگیر عملکرد تا غلظت حدود ۰/۵٪ می شود. نتایج نشان داده اند که با افزایش غلظت بیشتر از ۰/۵٪ عملکرد شروع به ثابت شدن کرده است، و حتی در مواردی شاهد کاهش اندکی با افزایش نسبت حجمی بوده اند. محققین دلیل این کاهش را به جذب سیال^۵ در بارگذاری های^۶ بالای ذرات نسبت داده اند. هم چنین، زمانی که اندازه ی ذرات به نصف یعنی از ۴۰ به ۲۰ nm کاهش یافته است، بیشترین تفاوت در عملکرد در حالت پایدار^۷ در بین نانو سیال ها برای نانو ذرات نقره به میزان ۶٪ افزایش عملکرد مشاهده شده است.

در سال ۲۰۱۱ تیلور^۸ و همکاران [۷۲] به مقایسه ی سیستم خورشیدی متمرکزکننده ی دمایی با نوع معمولی آن پرداختند. نتایج آن ها نشان داده است که استفاده از نانو سیال در محفظه پشت ماژول می تواند عملکرد آن را تا ۱۰٪ بهبود بخشد.

¹ Otanicar

² Carbon nanotubes

³ Graphite

⁴ Silver

⁵ Fluid absorption

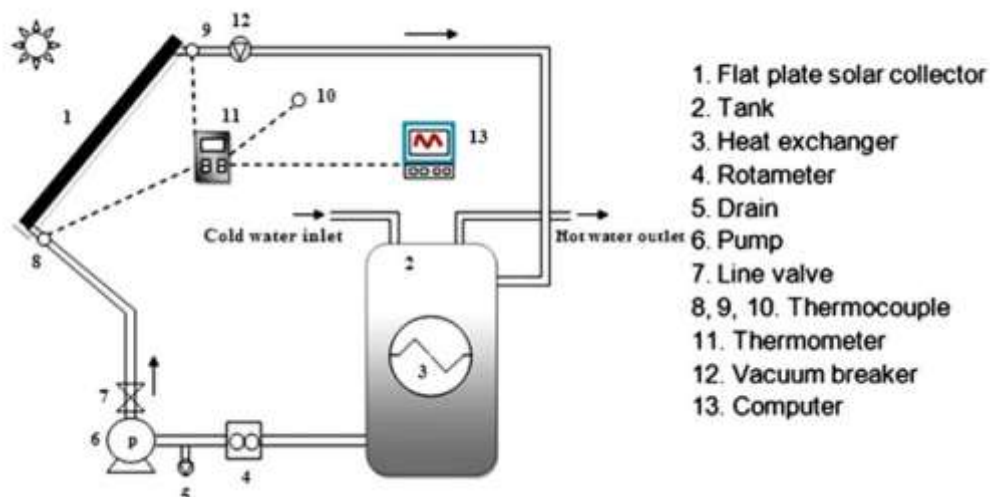
⁶ Loadings

⁷ Steady state

⁸ Taylor

در سال ۲۰۱۱، لی^۱ و همکاران به بررسی تاثیرات سه نانو سیال مختلف، آب- اکسید آلومینیوم، آب- اکسید روی و آب- اکسید منیزیم بر روی عملکرد یک کلکتور لوله‌ای خورشیدی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داده است که نانوسیال آب- اکسید روی با غلظت ۰/۲٪ درصد حجمی، بهترین انتخاب برای کلکتور می‌باشد [۷۳].

در سال ۲۰۱۲ یوسفی و همکاران [۷۴] به بررسی تاثیرات نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم بصورت تجربی پرداختند. آن‌ها تاثیرات دو درصد وزنی مختلف ۰/۲٪ و ۰/۴٪ از نانو سیال با قطر معادل ذرات ۱۵ nm را آزمایش کردند. علاوه بر آن، آن‌ها تاثیرات استفاده از تریتون X-100 را به‌عنوان ماده فعال سطحی بر روی عملکرد مطالعه کرده‌اند. شماتیکی از تجهیزات بکار گرفته شده در این تحقیقات در شکل (۲-۳۲) ارائه شده است. نتایج حاصل از این تحقیقات را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد: عملکرد کلکتور خورشیدی با نانو سیال ۰/۲٪ وزنی به میزان ۲۸/۳٪ بیشتر از آب می‌باشد. همچنین، برای محدوده‌ی وسیعی از دمای کاهش یافته که بصورت معادله زیر تعریف می‌شود، عملکرد کلکتور برای سیال با غلظت ۰/۲٪ در مقایسه با ۰/۴٪ بیشتر می‌باشد. در نهایت استفاده از ماده فعال سطحی منجر به بهبود ۱۵/۶۳٪ عملکرد می‌شود.



شکل ۲-۳۲. نمایی از سیستم آزمایشگاهی بکه‌ار گرفته شده توسط یوسفی و همکاران [۷۴].

در سال ۲۰۱۲ خولار^۱ و همکاران بصورت تئوری به مطالعه یک کلکتور متمرکزکننده‌ی سهموی خورشیدی بر اساس نانو سیال پرداختند، و نتایج حاصل از آن را با نتایج تجربی از کلکتور متمرکزکننده‌ی سهموی خورشیدی معمولی مقایسه کردند. آن‌ها در این تحقیق از نانو ذرات آلومینیوم با غلظت ۰/۰۵٪ حجمی سوسپانسیون در ترمینول VP-1 به‌عنوان سیال پایه استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که عملکرد دمایی NCPSC در مقایسه با نوع معمولی آن تحت شرایط آب و هوایی یکسان، در حدود ۵-۱۰٪ بیشتر می‌باشد [۷۵].

المیر^۲ و همکاران (۲۰۱۲) [۷۶]، به روش المان محدود^۳ سلول خورشیدی سیلیکونی را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها از نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم برای تحلیل‌ها استفاده کردند. نتایج حاصل نشان داده است که استفاده از نانو سیال منجر به افزایش میانگین عدد ناسلت می‌شود. در نتیجه نرخ خنک‌سازی با افزایش درصد حجمی، افزایش می‌یابد.

کرمی^۴ و همکاران (۲۰۱۴) [۷۷]، به مطالعه آزمایشگاهی خنک‌سازی و یک سیستم فتوولتائیک با استفاده از ایجاد میکروکانال در محفظه پشت ماژول برای عبور نانوسیال بوهمیت پرداختند. در این پژوهش چهل میکروکانال با مقطع مربع با قطر هیدرولیک ۷۸۳ میکرومتر و طول ۲۴ سانتی‌متر در پشت سلول خورشیدی نصب‌شده و جریان نانوسیال از درون این کانال‌ها به‌منظور کاهش دمای سطح سلول برقرار بوده است. اثر استفاده از آب خالص و نانوسیال بوهمیت^۵ با غلظت‌های مختلف (۰/۰۱ wt٪ و ۰/۱ و ۰/۳) مقایسه شده است. نتایج نشان داده است که در مقایسه با حالت استفاده از آب خالص، نانو سیال بوهمیت منجر به کاهش چشمگیر دمای سطح سلول خورشیدی از ۶۲/۲۹ °C تا ۳۲/۵ °C شده است. هم‌چنین، بالاترین بازده الکتریکی (۲۷ درصد) مربوط به استفاده از ۰/۰۱ wt٪ نانو سیال بوهمیت بوده است.

¹ Khullar

² Elmir

³ Finite element

¹ Karami

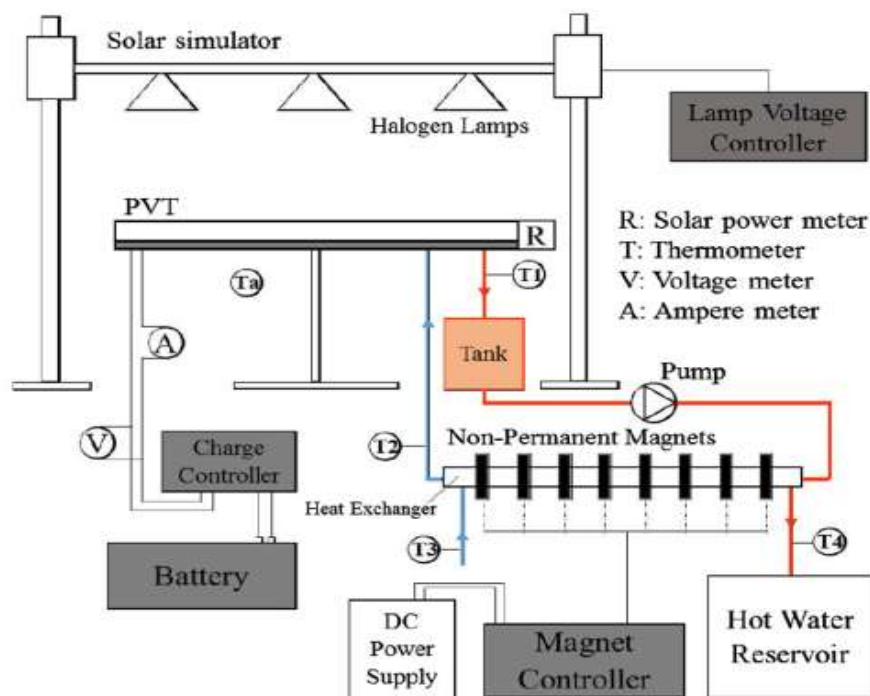
² Boehmite

قدیری^۱ و همکاران (۲۰۱۵) [۵۲]، به بررسی آزمایشگاهی استفاده از نانو سیال مغناطیسی و میدان مغناطیسی به منظور خنک‌سازی و بهبود عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک پرداخته‌اند. عکس واقعی و شماتیکی از تجهیزات به کار گرفته شده در این تحقیق در شکل (۲-۳۳) و (۲-۳۴) ارائه شده است. در این پژوهش به بررسی اثر استفاده از نانو سیال مغناطیسی Fe_3O_4 /آب و میدان مغناطیسی ثابت فرکانس متغیر بر عملکرد و خنک‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک -حرارتی پرداخته شده است. غلظت فرو سیال متغیر بوده و ۱ و ۳ درصد جرمی انتخاب شده است. نتایج این پژوهش نشان داده است که بازدهی کل سیستم در حالت اعمال میدان مغناطیسی با فرکانس ۵۰ هرتز در حدود ۵۰ درصد نسبت به حالتی که از آب خالص به‌عنوان سیال عامل استفاده شده است، افزایش پیدا کرده است. به‌طور کلی نتایج حاکی از آن است که اعمال میدان مغناطیسی ثابت در فرو سیال تاثیر چندانی بر بهبود عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی نداشته است.



شکل ۲-۳۳. عکس واقعی سیستم آزمایشگاهی به کار گرفته شده توسط قدیری و همکاران [۵۲].

¹ Ghadiri



شکل ۲-۳۴. شماتیکی از سیستم آزمایشگاهی به کار گرفته شده توسط قدیری و همکاران [۵۲].

خنجری^۱ و همکاران (۲۰۱۶) [۷۷]، به بررسی عددی استفاده از نانو سیال آب/آب/Ag و آب/Al به منظور خنک‌سازی و یک سیستم فتوولتائیک حرارتی پرداخته‌اند. نتایج حاصل از مدل‌سازی برای عملکرد نانوسیال با آب خالص مقایسه شده است. مدل پیشنهاد شده شامل یک لوله رایزر آب و یک صفحه جذب کننده به‌منظور بررسی مکانیسم‌های انتقال حرارت هدایتی و جابجایی است. نتایج عددی با استفاده CFD شبیه‌سازی شده است، و اثر غلظت نانو ذرات و سرعت سیال ورودی بر بهبود و بازده انتقال حرارت بررسی شده است. نتایج نشان داده‌اند که بازده حرارتی و ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت نانو ذرات افزایش می‌یابد. ماکزیمم مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت مربوط به آب/Al با غلظت ۱۲ درصد و آب/Ag با غلظت ۴۳ درصد است. افزایش سرعت سیال ورودی میزان انتقال حرارت از سیستم فتوولتائیک حرارتی را افزایش داده است. نتایج نشان داده‌اند

¹ Khanjari

که نانو سیال آب/Ag عملکرد بهتری نسبت به نانو سیال آب/Al برای خنک‌سازی سیستم فتوولتائیک حرارتی داشته است.

رادوان^۱ و همکاران (۲۰۱۶) [۵۳]، به بررسی اثر استفاده از نانو سیالات و میکروکانال در بهبود عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک پرداخته‌اند. در این مطالعه نانو سیالات Al_2O_3 و SiC با پایه آب، با درصد حجم‌های مختلف به منظور بهبود عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی استفاده شده‌اند. یک مدل‌سازی جامع که شامل مدل حرارتی برای لایه‌های فتوولتائیک کوپل شده با دینامیک سیال-حرارت در مدل‌سازی دوفازی سینک حرارتی میکروکانال بوده است، انجام شده است. مدل به منظور تخمین عملکرد پارامترهایی مانند دمای سطح سلول خورشیدی و بازده الکتریکی و حرارتی شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان داده‌اند که دمای سطح سلول خورشیدی در حالت استفاده از نانوسیال تا حد قابل توجهی نسبت به آب خالص کاهش یافته است.

سردارآبادی^۲ و همکاران [۷۸]، در سال ۲۰۱۷ به بررسی آزمایشگاهی و عددی استفاده از نانو سیالات اکسید فلزات/آب به‌عنوان خنک‌ساز در سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی پرداخته‌اند. نانو ذرات استفاده شده Al_2O_3 ، ZnO ، TiO_2 بوده‌اند که همگی در آب مقطر با درصد وزنی ۰/۲wt% پراکنده شده‌اند. به منظور اطمینان از نتایج، آنالیز عدم قطعیت روی داده‌های آزمایشگاهی انجام شده است. بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک بر اساس دمای سطح مازول فتوولتائیک و هم‌چنین، دمای خروجی بررسی شده است. نتایج عددی آزمایشگاهی نشان داده است که نانو سیالات TiO_2 /آب و ZnO /آب عملکرد بهتری نسبت به نانو سیال Al_2O_3 /آب داشته‌اند. بر اساس عملکرد حرارتی، نانوسیال ZnO /آب بالاترین بازده حرارتی را نسبت به آب خالص و سایر نانو سیالات داشته است. در پایان، مدل‌سازی عددی برای بررسی اثر وزنی نانو ذرات در محدوده ۵wt%-۱۰/۰ بر عملکرد الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی به‌کاربرده شده است.

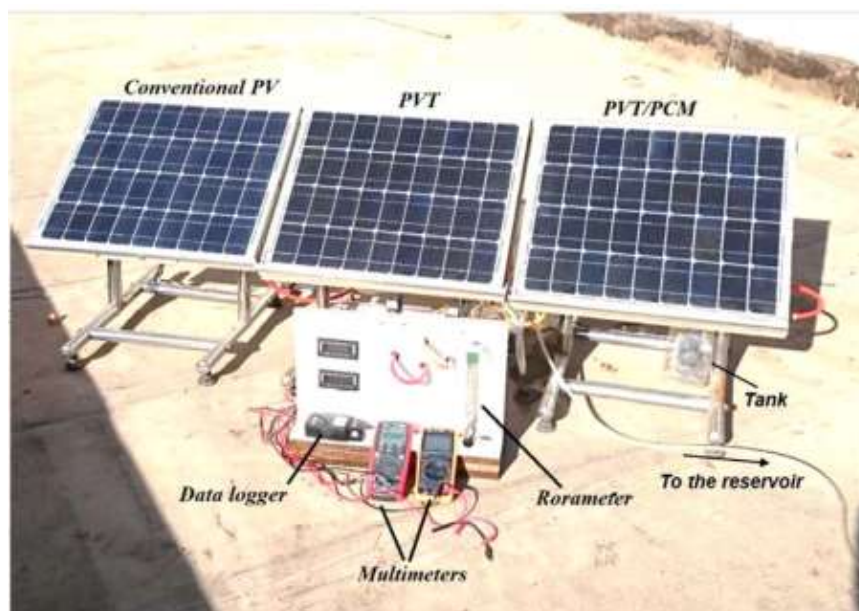
^۲ Radwan

^۳ Sardarabadi

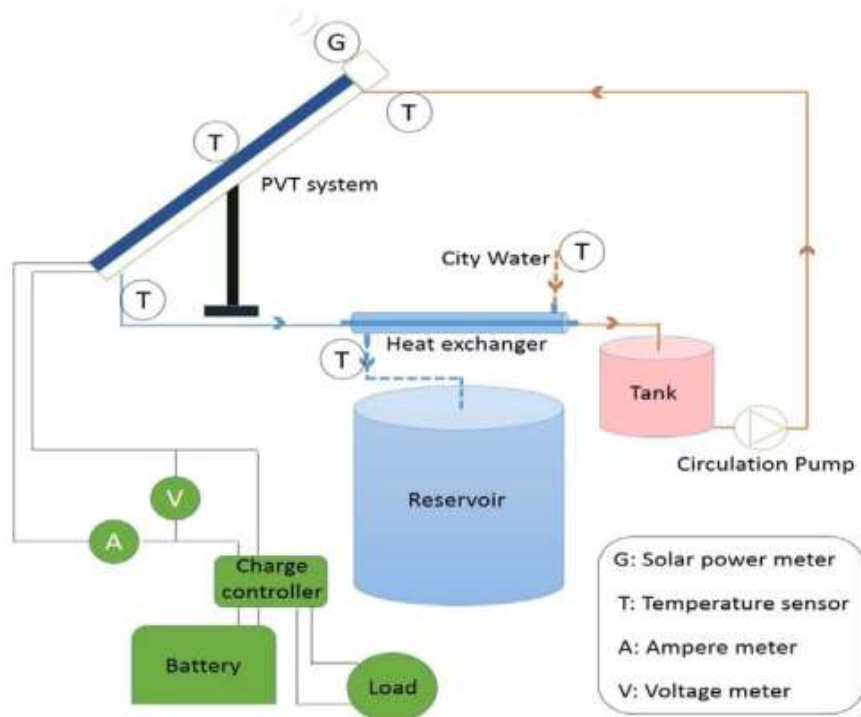
ال وائل^۱ و همکاران (۲۰۱۷) [۱]، به بررسی آزمایشگاهی استفاده از نانوسیال SiC در بهبود عملکرد و خنک‌سازی سیستم فتوولتائیک-حرارتی پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که اضافه کردن نانو ذرات با ۳ wt% به آب، دانسیته و ویسکوزیته سیال را به ترتیب ۰/۰۰۸۲ و ۱/۸ درصد افزایش می‌دهد؛ و ضریب هدایت حرارتی در دمای C ۲۵-۶۰° حدود ۲/۸ درصد افزایش یافته است. پایداری نانو سیال بررسی شده، و مشاهده شده است که بعد از گذشت ۶ ماه ضریب هدایت حرارتی حدود ۰/۰۳ W/m.k می‌باشد، که به معنای پایدار بودن سوسپانسیون بعد از ۶ ماه است. استفاده از ۳wt% نانو سیال SiC بازده حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی را به نسبت سیستم فتوولتائیک حدود ۲/۴ درصد افزایش داده است، در حالی که بازدهی حرارتی حدود ۱۹٪ درصد نسبت به آب خالص افزایش یافته است.

سردارآبادی و همکاران (۲۰۱۷) [۷۹]، مطالعه آزمایشگاهی مجموعه سیستم حرارتی فتوولتائیک مبتنی بر نانوسیال ZnO با پارافین ماده تغییر فاز دهنده (PCM) را انجام داده‌اند. عکس واقعی و شماتیکی از تجهیزات به کار گرفته شده در این تحقیق در شکل (۲-۳۵) و (۲-۳۶) ارائه شده است. در این مطالعه نانو سیال در لوله‌هایی که در مخزن PCM تعبیه شده بودند، جاری شده است. نتایج این کار آزمایشگاهی شامل دمای سطح ماژول، بازده الکتریکی و بازده حرارتی، با یک سیستم فتوولتائیک ساده بدون PC و نانوسیال به عنوان یک حالت مرجع مقایسه شده است. نتایج نشان داده‌اند که استفاده از نانوسیال ZnO به جای آب بازده حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی را حدود ۵ درصد افزایش داده است.

¹ Al-Waeli



شکل ۲-۳۵. عکس واقعی سیستم آزمایشگاهی به کار گرفته شده توسط سردارآبادی و همکاران [۷۹].



شکل ۲-۳۶. شماتیکی از سیستم آزمایشگاهی به کار گرفته شده توسط سردارآبادی و همکاران [۷۹].

یزدان فر^۱ و همکاران (۲۰۱۷) [۸۰]، یک مقاله مروری جامع در مورد استفاده از نانو سیالات در سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی انجام داده‌اند. در این تحقیق، آنان در ابتدا به بررسی جامع روش‌ها، ساختار و خروجی‌های سیستم‌های فتوولتائیکی که با نانو سیال کار می‌کنند، پرداخته‌اند. سپس، کارایی نانو سیال‌ها و پارامترهای مؤثر در عملکرد نانو سیالات در سیستم‌های فتوولتائیک در جریان آرام و درهم نیز بررسی شده است. در این مقاله نانو ذرات Al_2O_3 و TiO_2 به کار برده شده است، و جز حجمی نانوسیال ۴-۰ درصد، و اندازه آن ۱۰۰-۲۱ نانومتر در نظر گرفته شده است. همچنین، تاثیر سیال پایه (آب و مخلوط آب و اتیلن گلیکول) بررسی شده است. نتایج نشان داده‌اند که اضافه کردن نانو ذرات به سیال پایه در جریان آرام بسیار مؤثرتر از جریان درهم بوده است. همچنین، استفاده از نانو ذرات با اندازه بزرگ‌تر در جریان درهم منجر به افزایش هرچه بیشتر بازده کل شده است. مشاهده شده است که استفاده از نانو ذرات Al_2O_3 در آب به عنوان نانو سیال، بازده سیستم فتوولتائیک را نسبت به TiO_2 بسیار بیشتر افزایش داده است، و آب نیز به عنوان سیال پایه بازده انرژی اکسرژی بالاتری نسبت به اتیلن گلیکول داشته است.

آبرومند^۲ و همکاران (۲۰۱۸) [۸۱]، به بررسی بازده الکتریکی، حرارتی و اکسرژی سیستم PV/T که توسط نانو سیال $\text{Ag}/\text{ آب}$ خنک سازی می‌شود، پرداخته‌اند. نانو سیال مورد استفاده توسط روش یک مرحله‌ای انفجار الکتریکی سیم (EEW) تهیه شده است، و برای ثبات و یکنواختی طولانی مدت، مورد آزمایش قرار گرفته است. عکس واقعی و شماتیکی از تجهیزات به کار گرفته شده در این تحقیق در شکل (۲-۳۷) و (۲-۳۸) ارائه شده است. عملکرد سیستم PV/T با در نظر گرفتن طیف وسیعی از پارامترها برای تعیین شاخص‌های کلیدی عملکرد اندازه گیری شده است. به عنوان مثال بهره‌وری انرژی الکتریکی و حرارتی و همچنین، بهره‌وری اکسرژی از سیستم، بررسی شده است. اثرات دبی جرمی (یعنی رژیم‌های مختلف جریان آرام، گذرا و آشفستگی) بر روی کارایی‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داده‌اند که استفاده از نانو سیال برای خنک سازی سیستم

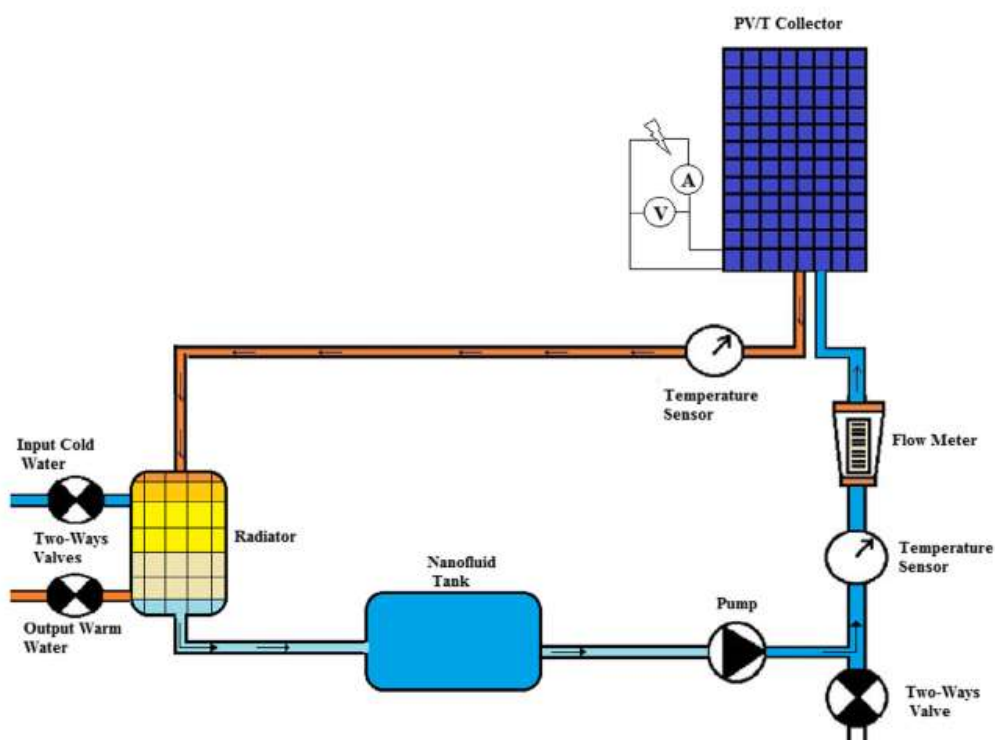
¹ Yazdanfar

² Aberoumand

PV/T می‌تواند بهره‌وری انرژی و اکسرژی را افزایش دهد. همچنین، مشخص شده است که در این سیستم، تاثیر مثبت افزایش غلظت نانو سیال و افزایش دبی جریان (به عنوان مثال حرکت به سوی جریان آشفته) به طور قابل توجهی بیشتر شده است.



شکل ۲-۳۷. عکس واقعی سیستم آزمایشگاهی به کار گرفته شده توسط آبرومند و همکاران [۸۱].

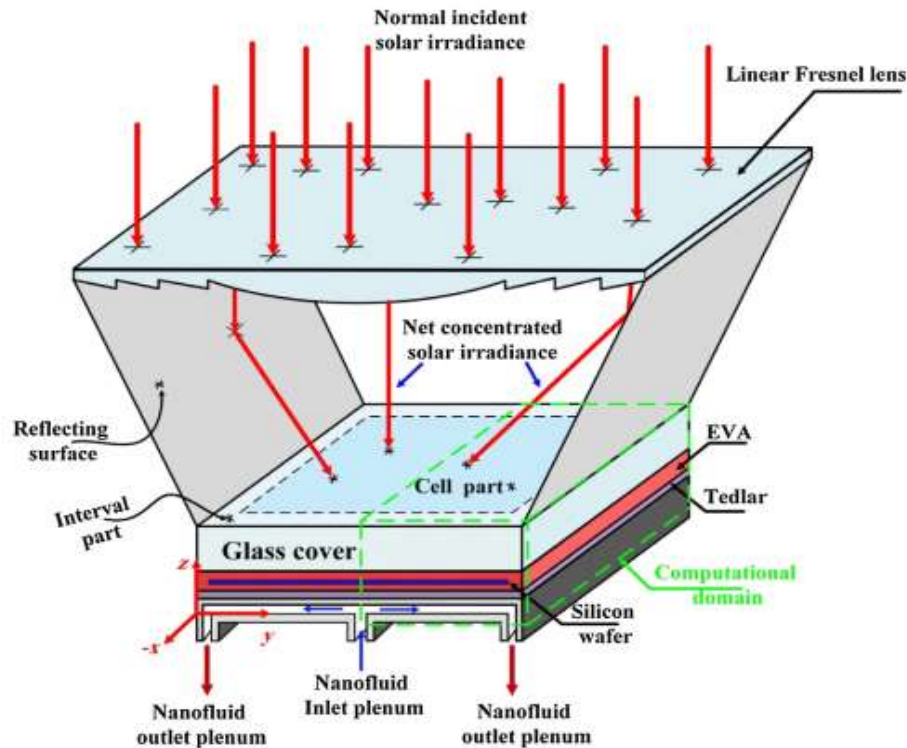


شکل ۲-۳۸. شماتیکی از سیستم آزمایشگاهی به کار گرفته شده توسط آبرومند و همکاران [۸۱].

رادوان^۱ و همکاران (۲۰۱۸) [۸۲]، یک روش خنک کننده جدید برای سیستم فتوولتائیک متمرکز با استفاده از نانو سیال و هیت سینک میکروکانال پیشنهاد کرده‌اند. شماتیکی از سیستم خنک‌کاری ماژول PV بکار گرفته شده در این پژوهش در شکل (۲-۳۹) ارائه شده است. در این پژوهش، یک مدل جامع سه بعدی توسعه یافته است. در این مدل، مدل چند فازي اولرین-اولرین^۲ برای انتقال گرما جریان نانو سیال در هیت سینک میکروکانال گسترده با مدل حرارتی سیستم‌های فتوولتائیک کوپل می‌شود. مدل با استفاده از داده‌های آزمایشی و عددی، شبیه سازی شده و معتبر است. تاثیرات نوع نانو ذرات، غلظت نانو ذرات و دبی جریان خنک کننده در رینولدزهای مختلف بر پارامترهای عملکرد ماژول خورشیدی بررسی شده است. نتایج نشان داده است که استفاده از نانو سیال آب / SiC در مقایسه با نانوسیال آب / Al_2O_3 کمترین دمای ماژول را دارد. افزایش نسبت کسر حجمی نانو ذرات به طور قابل توجهی کاهش دمای ماژول‌های خورشیدی، یکنواختی دمای ماژول و افزایش کارایی الکتریکی را به همراه داشته است. علاوه بر این، افزایش عدد رینولدز تا مقدار خاصی، به طور قابل توجهی توان تولیدی را افزایش داده است. با استفاده از نانوسیال ۴٪ آب / SiC حداکثر دمای ماژول خورشیدی بین ۸ تا ۳ درجه سانتیگراد در مقایسه با آب خالص با تغییر دبی جریان کاهش یافته است.

¹ Radwan

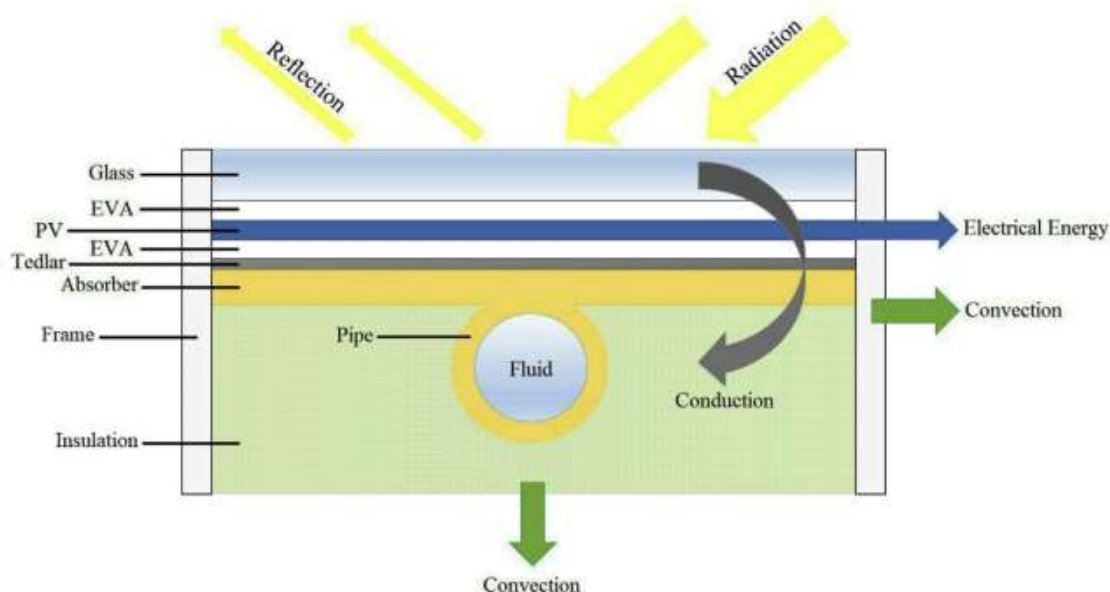
² Eulerian-Eulerian



شکل ۲-۳۹. شماتیکی از سیستم خنک کاری ماژول PV پیشنهادی توسط رادوان و همکاران [۸۲].

در مطالعه آباده^۱ و همکاران (۲۰۱۸) [۸۳]، یک ست آب آزمایشگاهی برای یک سیستم PVT طراحی و ساخته شده است، تا جنبه‌های اقتصادی و محیطی استفاده از سیالات مختلف نانو اکسیدها/ آب بررسی شود. برش عرضی از سیستم PV/T بررسی شده توسط این محققین در شکل (۲-۴۰) آمده است. مایعات خنک کننده انتخابی عبارتند از: آب خالص، آب/ZnO، آب/Al₂O₃ و آب/TiO₂. برای ساخت نانو سیالات، نانو ذرات در آب مقطر با درصد وزنی ۰/۲٪ (wt)٪، به صورت جداگانه پراکنده شدند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، میزان کاهش سالانه و هزینه صرفه جویی در خنک کننده‌های مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، دوره باز پرداخت PVTها با واحد PV معمولی مقایسه شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که سیستم PVT/ نانوسیال می‌تواند خروجی توان الکتریکی را ۷٪ نسبت به PV معمولی افزایش دهد. توان الکتریکی خروجی برای استفاده از آب خالص ۲٪ است.

¹ Abadeh



شکل ۲-۴۰. برش عرضی از سیستم PV/T بررسی شده توسط آباذه و همکاران [۸۳].

عبداله^۱ و همکاران (۲۰۱۹) [۸۴]، یک کار آزمایشگاهی در مورد استفاده از نانو سیالات به عنوان سیال عامل برای سیستم‌های فوتوولتاییک حرارتی (PV/T) را ارائه داده‌اند. سیستم‌های PV/T یک نوع سیستم ترکیبی در استفاده از انرژی هستند. این سیستم‌ها تابش خورشیدی را به دو نوع انرژی شامل برق و گرما تبدیل می‌کنند. در این تحقیق، آزمایشی جهت ارزیابی سیستم PV/T که از نانو سیال حاوی نانو لوله‌های کربنی چند دیواره MWCNT^۲ به عنوان عامل جذب گرما استفاده کرده است، انجام داده است. اثر نسبت غلظت حجمی نانو سیال در محدوده (۰-۰/۳ درصد) در دبی جریان ۱/۲ لیتر در دقیقه، مورد بررسی قرار گرفته است. با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی، مشاهده شده است که افزودن ذرات نانو به سیال پایه، باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای خواص حرارتی شده و کارایی حرارتی و الکتریکی سیستم PV/T را افزایش داده است. بهترین راندمان سیستم برای نانوسیال MWCNT بر پایه آب با غلظت ۰/۰۷۵ درصد حجمی بدست آمده است. در این غلظت، حداکثر دما برای پانل PV در حداکثر تابش، حدود ۱۲ درجه سانتیگراد بوده است، که منجر به کارایی کلی سیستم به میزان ۸۳/۲۶ درصد شده است.

^۱ Abdallah

^۲ Multi Walls Carbon Nano Tubes

فصل ۳ : مواد و روش ها

۳-۱ مقدمه

از آن جایی که در این پروژه برای بهبود انتقال حرارت، از سیستمی نوین حاوی جت‌های آزاد استفاده شده است، ضروری است تا به تشریح دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده پرداخته شود. لذا، در ادامه، ست آب آزمایشگاهی به تفصیل توصیف می‌شود. همچنین، روش‌های آزمایشگاهی انجام شده برای بررسی اثرات انتقال حرارتی سیستم مذکور نیز به جرئیات شرح داده می‌شوند. در نهایت، داده‌های تحلیل عدم قطعیت ارائه می‌شود، و طراحی آزمایش نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که، در این پروژه برای بهبود انتقال حرارت، در ابتدا از آب خالص استفاده شده است. سپس با بهینه کردن شرایط آزمایش، در پارامترهای فیزیکی بهینه شده، از نانوسیال حاوی SiC استفاده شده است، و اثرات انتقال حرارت در حضور نانوسیال نیز بررسی شده است.

۳-۲ ست آب آزمایشگاهی

۳-۲-۱ دستگاه‌های آزمایشگاهی و سیستم جمع آوری داده در حضور آب

خالص

در این پروژه، به منظور بررسی اثرات منفی افزایش دمای صفحات فتوولتیک (PV)، سیستم خنک کاری با ایجاد ضربه جت آب (JIC) طراحی شده است (شکل ۱-۳). این ست آب آزمایشگاهی شامل موارد زیر می‌باشد:

۱- پمپ آب

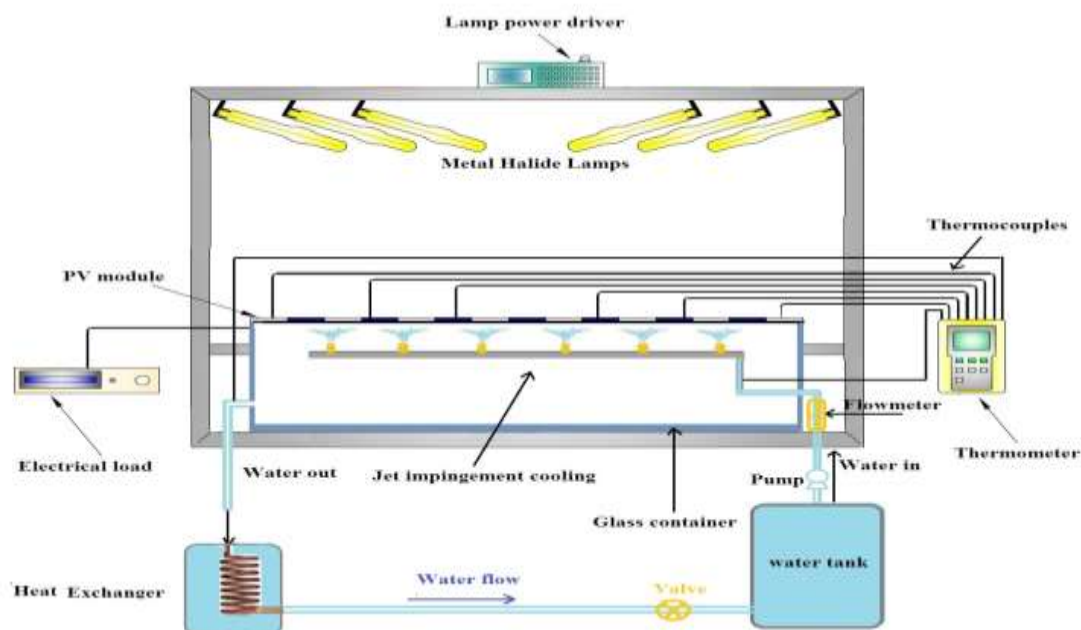
۲- سیستم خنک کاری با ضربه جت

۳- شبیه ساز نور خورشید

۴- ماژول PV

۵- مخزن آب

۶- سیستم جمع آوری داده



(الف)



(ب)

شکل ۳-۱. شماتیک (الف) و عکس واقعی (ب) ست آپ آزمایشگاهی طراحی شده

همان‌طور که در شکل (۳-۱) مشاهده می‌شود، در این ست آپ، برای نگه داشتن صفحات خورشیدی زیر لامپ-های هالیدی فلزی (مدل I HID-T400 W/D) قابی از جنس فیبر (MDF) و با تراکم متوسط ساخته شده است. لازم به ذکر است که ماژول PV از سیلیکون پلی کریستالی ساخته شده است (شکل ۳-۲). (الف). این سیستم

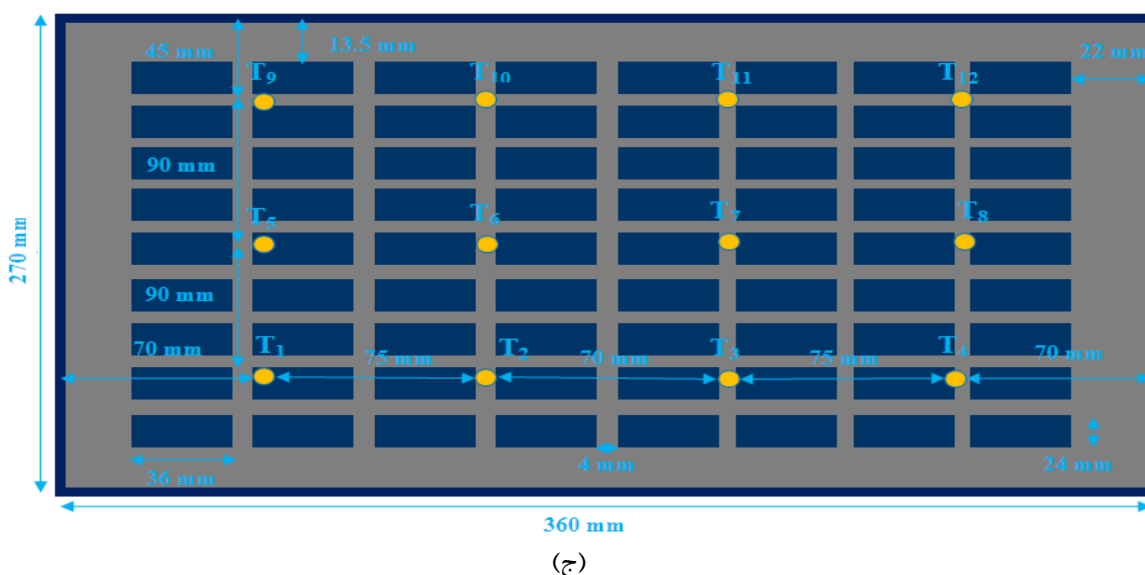
حاوی ۷۲ سلول است که به صورت سری و موازی کنار هم قرار گرفته‌اند. همچنین، محدوده‌ی فعال هر ماتریکس در ماژول PV برابر با 24×36 mm می‌باشد.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۳-۲. (الف) عکس واقعی ماژول PV، (ب) عکس پشت صفحه ماژول PV، (ج) ابعاد ماژول PV و مکان نمایی ترموکوپل‌ها

همان‌طور که در شکل (۳-۲) مشخص است، ۱۲ ترموکوپل در قسمت پشتی صفحه PV قرار گرفته است تا دمای قسمت‌های مختلف سطح ماژول PV اندازه‌گیری شود (شکل ۳-۲ (ب)). همچنین، دور صفحه جاذب یک قاب آلومینیومی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که برای عبور ترموکوپل‌ها، ۳ سوراخ به قطر ۸ میلی‌متر روی قسمت راست و چپ این قاب ایجاد شده است. یکی از قسمت‌های انتهایی ترموکوپل‌ها به سطح پشتی ماژول PV می‌چسبد، و انتهای دیگر از سوراخ ایجاد شده رد می‌شود و به ترمومتر (Lutron, BTM-4208SD) متصل

می‌شود. شکل ۳-۲ (ج) ابعاد ماژول PV و موقعیت ترموکوپل‌ها را نشان می‌دهد. هم‌چنین، ویژگی‌های الکتریکی ماژول پلی کریستالی PV در جدول (۱-۳) ارائه شده است.

جدول ۱-۳. ویژگی‌های الکتریکی ماژول پلی کریستالی PV		
ویژگی‌های فتوولتائیک	واحد	مقدار
مدل	تایوان، ACDC	ZT10-18-P
ابعاد	میلی متر	mm ۱۸×۲۷۵×۳۶۰
توان ماکزیمم (Pmax)	وات	۱۰
ولتاژ در توان ماکزیمم (Vm)	ولت	۱۷/۸۵
جریان در توان ماکزیمم (Im)	آمپر	۰/۶۲
ولتاژ مدار باز (Voc)	ولت	۲۱/۷۷
جریان اتصال کوتاه (Isc)	آمپر	۰/۵۹
دمای عملیاتی نرمال	درجه سانتیگراد	۲ ± ۴۵
مواد سازنده سل		پلی کریستال-سیلیکون
کلاس عملیاتی		C
آستانه تحمل خروجی		%۳±

یک دستگاه الکتریکی (مدل PSHP) به خروجی الکتریکی PV وصل می‌شود و داده‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. در طول تست‌ها، از بار الکتریکی برای تعیین ولتاژ ماژول PV در شدت جریان‌های مختلف استفاده می‌شود.

۱-۲-۳ شبیه ساز نور خورشید

در این پروژه، برای ایجاد نور خورشید از شبیه ساز نور خورشید استفاده شده است که اطلاعات مربوط به آن از کارهای صورت گرفته استخراج شده است. علت استفاده از شبیه ساز نور خورشید این می‌باشد که نور طبیعی خورشید همیشه در دسترس نیست. بدین منظور، برای ایجاد روشنایی مداوم از لامپ هالیدی فلزی^۱ (MH) استفاده می‌شود. هدف از استفاده از نور خورشید مصنوعی، ایجاد نوری است که نور خورشید را شبیه سازی کند، و امکان ایجاد تابش قابل تنظیم و قابل تغییر را در آزمایشگاه فراهم کند. در نتیجه، لامپ‌ها در سه ردیف و به صورتی که رو به رو هم نباشند، در سمت راست و چپ قاب موجود روی سقف چیده می‌شوند (شکل ۳-۱).

¹ Metal Halide

تابش خورشیدی توسط کنتور برق دیجیتالی خورشیدی (پیرانومتر (ساخته شده توسط شرکت تستو^۱) تولید می‌شود. تابش قدرت ورودی در این سیستم برابر با 1 W/m^2 تنظیم می‌شود.

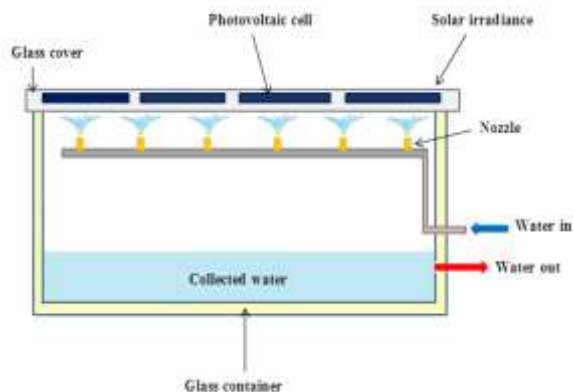
۲-۱-۲ سیستم خنک کاری با ایجاد ضربه توسط جت

در سیستم ایجاد ضربه با جت، آب سرد به طور ناگهانی به صفحه پشتی ماژول PV برخورد می‌کند (شکل ۳-۳ الف)). آب سرد مورد استفاده در دمای ثابت (در محدوده $17/4 - 18/2$) به سیستم JIC وارد می‌شود. به منظور ساخت سیستم ایجاد ضربه با جت، ابتدا ۲۴ نازل در چهار ردیف موازی بر روی چهار لوله فولادی نصب می‌شوند (شکل ۳-۳ ب)). این چهار لوله‌ی موازی از جنس فولاد هستند، و از دو قسمت انتهایی به لوله PVC متصل می‌شوند تا سیستم JIC ایجاد شود. به منظور ایجاد جریان موازی در لوله‌های فولادی، یک ورودی در وسط یکی از لوله‌های PVC قرار می‌گیرد، به طوری که در هر طرف این قسمت ورودی دو لوله نصب می‌شود. طول هر لوله فولادی ۲۲ سانتی‌متر و فاصله دو نازل مجاور ۴ سانتی‌متر است. برای ساختن JIC با تعداد نازل متفاوت، برخی از نازل‌ها توسط چسب فلزی مسدود می‌شوند. همانطور که در شکل (۳-۳ ج)) دیده می‌شود، چهار طرح متفاوت از سیستم JIC طراحی شده است که این طراحی با حذف برخی از نازل‌هایی که به رنگ زرد مشخص شده‌اند، به انجام می‌رسد. بنابراین، با استفاده از این روش، تاثیر تعداد نازل (۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۴) در خنک سازی ماژول PV در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که یک ظرف شیشه‌ای در پشت ماژول PV برای جمع آوری آب قرار داده شده است. عکس واقعی از ظرف شیشه‌ای مکعبی ($24 \times 36 \times 20$ سانتی متر مکعب) در شکل (۳-۳ ب)) نشان داده شده است. سیستم JIC با فاصله مشخصی در ظرف شیشه‌ای قرار گرفته می‌گیرد و ماژول PV در بالای آن نصب می‌شود. فاصله نازل از سطح پشتی ماژول PV (H) را می‌توان با قرار دادن یک مکعب از جنس فیبر در زیر سیستم JIC تغییر داد.

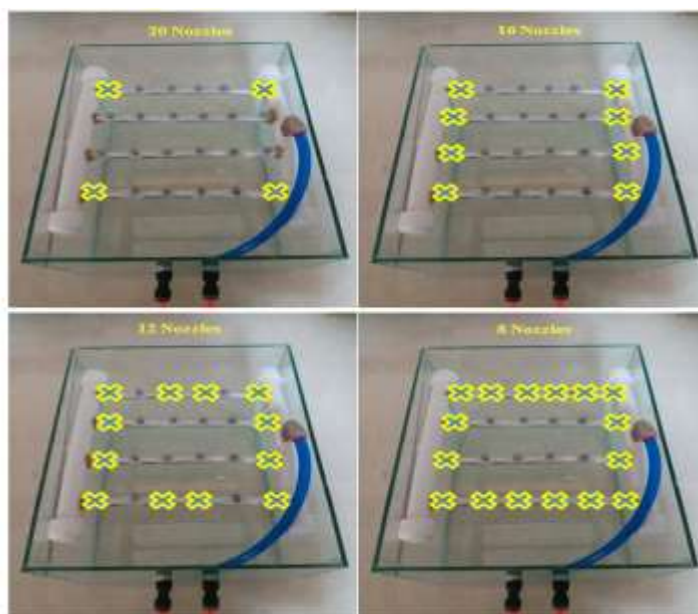
¹ Testo Company (Tes1333R)



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۳-۳. (الف) شماتیک سیستم JIC با مازول PV، (ب) طراحی نازل‌ها و ظرف شیشه‌ای جمع آوری آب، (ج) طراحی سیستم JIC با طرح‌های متفاوت از تعداد نازل‌ها

با استفاده از نرم افزار سالید ورک^۱، نازل‌هایی با پنج قطر مختلف (۱، ۱/۲۵، ۱/۵، ۱/۷۵ و ۲ میلی متر) طراحی و از جنس برنج ساخته می‌شوند. برای طراحی چهار سیستم برخورد جت، ۱۲۰ نازل با پنج قطر مختلف نازل ساخته شده است. همانطور که در شکل (۳-۴) مشخص است، هر نازل دارای یک لوله رزوه کوتاه و یک سر مخروطی است. همچنین، برای جلوگیری از نشت احتمالی آب، از چسب استفاده می‌شود.

¹ Solidworks



شکل ۳-۴. عکس واقعی نازل‌های طراحی شده

۳-۲-۱-۳ روش آزمایشگاهی

در این پروژه، برای ارزیابی عملکرد سیستم PV، آزمایش‌ها در شرایط پایا انجام می‌شوند. سیستم PV / JIC تحت تابش خورشیدی ۱۰۰۰ وات بر متر مربع قرار می‌گیرد. همچنین، تاثیر دبی جرمی سیال خنک کننده (۰/۰۲، ۰/۰۴۵، ۰/۰۷، ۰/۰۹۵ و ۰/۱۲ کیلوگرم در ثانیه) نیز در این پروژه بررسی می‌شود. ۱۲ ترموکوپل به سطح پشتی ماژول PV نصب می‌شوند تا میانگین دمای ماژول PV را اندازه گیری کنند و همچنین، دو ترموکوپل در ورودی و خروجی لوله‌های آب قرار داده می‌شوند تا دمای حاصل را ثبت کنند. مقادیر ولتاژ خروجی ماژول PV در جریان‌های الکتریکی مختلف با استفاده از سیستم بار الکتریکی تنظیم می‌شود. در طول آزمایش، خروجی الکتریکی ماژول PV به سیستم بار الکتریکی متصل می‌شود. پس از آن، با رسیدن سیستم به حالت پایا (پس از ۷۰-۸۰ دقیقه)، داده‌های ولتاژ-شدت جریان (V-I) برای ارزیابی حداکثر توان خروجی (Pmax)، حداکثر مقادیر جریان (Imax) و ولتاژ (Vmax) ثبت می‌شوند. مقدار میانگین دمای ۱۲ دماسنج به عنوان دمای نهایی ماژول PV در نظر گرفته می‌شود. همچنین، همه آزمایشات در دمای اتاق (۲۴-۲۵ درجه سانتیگراد) انجام می‌شود.

۳-۲-۲ دستگاه‌های آزمایشگاهی و سیستم جمع آوری داده در حضور نانو

سیال

پس از استفاده از آب خالص، به منظور بهبود اثرات انتقال حرارت، از نانو سیال SiC در سیستم پیشنهادی مرحله قبل استفاده شده است. ست آپ آزمایشگاهی استفاده شده در این قسمت دقیقاً مشابه با قسمت قبل است، و تنها تفاوت ایجاد شده در مقادیر عددی پارامترهای فیزیکی می‌باشد. در این قسمت به منظور جلوگیری از انسداد نازل‌ها در استفاده از نانوسیال و افزایش نقاط سکون که منجر به کاهش نواحی جت دیواره و رسیدن به خنک کاری بهتری شود. بررسی اثر تعداد سوراخ‌های نازل سیستم جت، طرح شکل (۳-۵ (الف)) با طرح جدید ارائه شده در شکل (۳-۵ (ب)) مورد مقایسه قرار گرفته است. تعداد نازل‌ها ۲۰ عدد و فاصله نازل از سطح پشتی ماژول فتوولتائیک ۵/۱ میلی‌متر و قطر نازل‌ها برابر ۱/۰۸ میلی‌متر بوده، که از بهینه سازی در مرحله قبل استفاده شده است. در طرح جدید، با تنظیم و بسته شدن نازل‌های زرد رنگ، قطر نازل‌ها را می‌توان در حدود ۱/۰۸ تا ۱/۱ میلی‌متر ثابت نگه داشت. آزمایشات ابتدا با استفاده از آب انجام شده است تا مقایسه‌ای بین نتایج طرح جدید (شکل ۳-۵ (ب)) و نتایج بدست آمده در مرحله قبل انجام شود. سپس، از نانوسیال SiC به منظور افزایش میزان خنک کاری ماژول استفاده شده است.

(الف)



(ب)



شکل ۳-۵. (الف) چیدمان سیستم جت با نازل‌های تک سوراخه (ب) چیدمان سیستم جت با نازل‌های ۸ سوراخه

۱-۲-۲-۳ آماده سازی نانو سیال

مواد مورد استفاده در این قسمت، نانو ذرات SiC و آب دی یونیزه خالص (DI) هستند. ذرات SiC، ساختاری نانو (خلوص ۹۹٪) با قطری در حدود ۴۵-۶۵ نانومتر دارند، که توسط شرکت تحقیقات نانو مواد ایالات متحده تهیه شده است. به منظور دستیابی به یک محلول یکنواخت و جلوگیری از ته نشینی نانو ذرات SiC، نانو سوسپانسیون تهیه شده توسط هموژنایزر اولتراسونیک (Hielscher UP400S، آلمان) با فرکانس ۲۴ کیلوهرتز تحت تاثیر امواج اولتراسونیک قرار گرفته است. اعمال اولتراسونیک با توان اسمی ۴۰۰ وات در دمای کنترل شده ۱۸-۲۰ درجه سانتیگراد انجام شده است. در طی همگن سازی توسط اولتراسونیک، دمای سوسپانسیون نانو سیال به گونه ای کنترل شده است، که محفظه آن توسط حمام خنک کننده یخ و آب احاطه شود. ۷۵-۸۰ دقیقه طول کشیده است تا یک نانو سیال تثبیت شده تهیه شود. همچنین، در این مطالعه، به منظور بررسی تاثیر غلظت نانو سیال، غلظت های رقیق نانوسیال ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۱ درصد وزنی تهیه شده است.

۱-۲-۲-۱-۱ محاسبه پارامترهای نانو سیال

برای محاسبه خواص نانوسیال در دما و غلظت دلخواه می توان از روابط زیر استفاده کرد [93-89]:

$$\rho_{nf} = \phi \rho_n + (1 - \phi) \rho_f \quad (1-3)$$

$$C_{p,nf} = \frac{\phi \rho_n C_{p,n} + (1 - \phi) \rho_f C_{p,f}}{\rho_{nf}} \quad (2-3)$$

که ρ_{nf} دانسیته نانو سیال، ρ_n و ρ_f نیز به ترتیب، دانسیته نانو ذرات و سیال پایه را نشان می دهد. ϕ جزء حجمی نانو ذرات در سوسپانسیون است، که به صورت زیر تعریف می شود [94-91].

$$\phi = \frac{m_n / \rho_n}{m_n / \rho_n + m_f / \rho_f} \quad (3-3)$$

که در آن m_n و m_f به ترتیب، جرم نانو ذرات و سیال هستند. ویسکوزیته مؤثر^۱ نانو سیال را می توان از رابطه زیر بدست آورد [93]:

$$\mu_{nf} = \mu_f \left(\frac{1}{(1 + \phi)^{0.25}} \right) \quad (۴-۳)$$

که در آن μ_f ویسکوزیته سیال پایه است. ضریب هدایت حرارتی مؤثر^۲ نانو سیال را می توان از رابطه زیر بدست آورد [93]:

$$k_{nf} = k_f \left[\frac{k_p + 2k_f - 2\phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \phi(k_f - k_p)} \right] \quad (۵-۳)$$

که در آن k_p و k_f به ترتیب ضریب هدایت حرارتی نانو ذرات و سیال پایه هستند.

۳-۳ تحلیل عدم قطعیت

در این پروژه، تمام وسایل اندازه گیری کالیبره شده اند و تجزیه و تحلیل خطاها نیز انجام شده است. ارزیابی خطاها در آزمایشات برای انجام یک آزمایش قابل اعتماد ضروری است. داده های اندازه گیری شده به عنوان "پارامتر اندازه گیری شده $\pm$ عدم قطعیت" ارائه می شوند. بدین منظور از فرمول زیر استفاده می شود [98, 99]:

$$\delta R = \sqrt{\left(\frac{\delta R}{\delta v_1} \delta v_1\right)^2 + \left(\frac{\delta R}{\delta v_2} \delta v_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta R}{\delta v_n} \delta v_n\right)^2} \quad (۶-۳)$$

که در آن δR عدم قطعیت تابع R است، و δv_i عدم قطعیت پارامتر v_i را نشان می دهد. $\delta R / \delta v_i$ انحراف جزئی R از v_i می باشد.

اگر عدم قطعیت در $v_1, v_2, \dots, v_m, v_{m+1}, \dots, v_n$ پارامتر مستقل باشد، عدم قطعیت جزئی با فرمول زیر محاسبه می شود [98]:

¹ Effective viscosity

² Effective thermal conductivity

$$\frac{\delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\delta v_1}{v_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta v_2}{v_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta v_m}{v_m}\right)^2 + \left(-\frac{\delta v_{m+1}}{v_{m+1}}\right)^2 + \dots + \left(-\frac{\delta v_n}{v_n}\right)^2} \quad (7-3)$$

عدم اطمینان به همراه دستگاه اندازه گیری و پارامترهای خروجی در جدول (۳-۲) آورده شده‌اند. بنابراین، عدم قطعیت‌های جزئی برای میانگین دمای سطح، ولتاژ، جریان و توان خروجی محاسبه شده‌اند. طبق جدول ۳-۲، حداکثر عدم قطعیت برای هر دو پارامتر خروجی، زیر ۰.۵٪ است. بنابراین، داده‌های اندازه گیری شده در آزمایشات قابل اعتماد هستند. به عنوان مثال برای محاسبه ماکزیمم عدم قطعیت در دمای میانگین باید خطای ترمومتر و ترموکوپل را در نظر گرفت. با توجه به اینکه خطای ترموکوپل ۰/۱۵ درجه سانتیگراد و خطای ترمومتر ۰/۴ درجه سانتیگراد است، بنابراین ماکزیمم عدم قطعیت برای محاسبه دمای سطح مائول مطابق فرمول (۳-۶) به صورت زیر محاسبه شد:

$$\delta R_{Temperature} = \sqrt{(0.15)^2 + (0.4)^2} = 4.2\%$$

این روش در مرجع [1] نیز برای محاسبه عدم قطعیت مورد استفاده قرار گرفته است. برای محاسبه ماکزیمم عدم قطعیت توان، خطای ولتاژ و جریان را در نظر میگیریم، بنابراین:

$$\delta R_{Power} = \sqrt{(3.1\%)^2 + (3.9\%)^2} = 4.9\%$$

جدول ۳-۲. اجزای سیستم، دقت و ماکزیمم عدم قطعیت مطلق پارامترهای خروجی

مدل و تجهیزات	اندازه‌گیری	دقت
پمپ آب	دبی جریان	$\pm 1\%$
ترمومتر (Lutron, BTM-4208SD)	دمای سطح و سیال	$\pm 0.4\%$
ترموکوپل مدل K	دمای سطح PV و سیال	$\pm 0.25^\circ\text{C} - \pm 0.15^\circ\text{C}$
پیرانومتر (Tes1333R)	تابش خورشیدی	$\pm 2\%$
بار الکتریکی	جریان	$\pm 3.1\%$
بار الکتریکی	ولتاژ	$\pm 3.9\%$
پارامترهای خروجی	عدم قطعیت مطلق	
دمای میانگین سطح ($^\circ\text{C}$)		۴/۲٪
قدرت (W)		۴/۹٪

۳-۴ طراحی آزمایش

طراحی آزمایش (DOE)^۱ به روش سطح پاسخ (RSM)^۲ در اولین سال ۱۹۵۰ میلادی شکل گرفت و کاربرد اولیه آن بیشتر برای صنایع شیمیایی بود ولی اخیراً به طور گسترده‌ای از روش سطح پاسخ (RSM) برای بهبود کیفیت، طراحی محصول و آنالیز عدم قطعیت استفاده می‌شود. دو روش متداول طراحی سطح پاسخ عبارتند از: طراحی باکس-بنکن (Box-Behnken design) و طراحی مرکب مرکزی (Central Composite Designs).

طراحی مرکب مرکزی با نام اختصاری و متداول CCD و یا با نام اولیه طراحی مرکب مرکزی Box-Wilson، از روش های متداول سطح پاسخ است. روش CCD مشابه طراحی عاملی یا عاملی کسری است که شامل نقاط مرکزی (center point) است. طراحی آزمایشات به روش CCD به علت استفاده از حدود پایین و بالای قسمت طراحی عاملی قدرت پیش بینی بسیار بالایی دارد.

طراحی باکس-بنکن یا به اختصار BBD، این روش از روش های طراحی سطح پاسخ است که در طراحی فرایندهای با سه یا چهار فاکتور، طراحی باکس-بنکن تعداد آزمایشات کمتری را شامل می شود. در ادامه این مطلب به مقایسه و بررسی کاربردهای متفاوت این دو روش می‌پردازیم:

- تعداد آزمایش‌ها در روش CDD به طور معمول از روش BBD بیشتر است.
- روش CCD قابل گردش است ولی روش BBD همیشه قابلیت گردش ندارد.
- روش CCD از طراحی عاملی دو سطحی با رزولوشن V و بیشتر ساخته شده است (طراحی عاملی + نقاط مرکزی + نقاط محوری).
- روش BBD از ترکیبی از طراحی عاملی دو سطحی تشکیل شده است.
- در روش CCD هر فاکتور پنج سطح متفاوت دارد (شامل سه نقطه در داخل حدود مشخص شده برای هر عامل و دو نقطه خارج از حدود مشخص شده برای هر عامل است).

¹ Design of experiments

² Response Surface Methodology

– در روش BBD هر فاکتور سه سطح متفاوت دارد (شامل سه نقطه در داخل حدود مشخص شده برای هر عامل است و هیچ نقطه‌ای خارج از حدود مشخص شده بالا و پایین برای هر عامل را ارائه نمی‌کند. به عبارت دیگر تمام نقاط آزمایش شده در محدوده‌ای از پیش تعیین شده قرار دارند. در نتیجه نقاط ابتدا و انتهای بازه دقت کمتری از سایر نقاط دارند).

– وقتی به دلیل محدودیت‌های فیزیکی یا مفهومی، آزمایش‌ها خارج از بازه مورد نظر ممکن نیست، روش BBD توصیه می‌شود. (مثلاً غلظت از صفر شروع می‌شود و حد منفی آن مفهوم ندارد).

با توجه به مطالب بیان شده، برای بهینه سازی پارامترهای هندسی نازل ها، تعداد نازل ها و همچنین دبی آب خنک کن، مدل CCD¹ به دلیل در نظر گرفتن سه سطح مرکزی و دو سطح بالا و پایین ترجیح داده می شود. طراحی آزمایشی تواند تاثیر تغییرات ایجاد شده در شرایط سرمایشی ماژول‌های PV توسط سیستم‌های JIC را بررسی کند. بهینه سازی هندسه نازل مسئله مهمی در بزرگ شدن اندازه سیستم PV/JIC دارد و از نظر اقتصادی بسیار مهم می‌باشد. از این رو، لازم است که به بهینه سازی این پارامتر مهم پرداخته شود. روش RSM یک روش ریاضی و آماری برای طراحی آزمایشات است، و در بهینه سازی فرایندهای خنک سازی استفاده می‌شود. تا جایی که متغیرهای متعدد سیستم بر خروجی‌ها تاثیر بگذارند، می‌توان از RSM برای تعیین رابطه بین متغیرهای مستقل و پاسخ وابسته و همچنین بهینه سازی استفاده کرد [100]. طراحی ترکیب مرکزی (CCD)، یکی از روش‌های موجود در RSM است که یکی از روش‌های مناسب برای ایجاد یک مدل درجه دوم می‌باشد. در این تحقیق، برای بهینه سازی هندسه یک نازل در سیستم JIC/PV از RSM استفاده شده است. میانگین دمای سطح و توان تولیدی ماژول PV با استفاده از روش RSM در نرم افزار طراحی آزمایش، نسخه ۱۱/۱ بهینه شده است. جواب‌ها با محدوده CCD برای چهار پارامتر مستقل مطابقت دارد. قطر نازل (d_n)، فاصله جت تا ماژول PV (H)، تعداد نازل (N) و دبی جرمی آب ($\dot{m}$) به عنوان چهار متغیر مستقل در فرایند خنک سازی انتخاب شده‌اند. این چهار متغیر مستقل می بایست موثر بوده و محدوده‌ی مربوط به آن‌ها نیز مناسب و منطقی

¹ Central-composite design

باشد که انتخاب این متغیرها و حدودشان، همگی بر اساس تحقیقات پیشین و مطالعات وسیع انجام گرفته و در جدول (۳-۳) ارائه شده‌اند.

جدول ۳-۳. سطوح تحقیق شده در متغیرهای آزمایشگاهی

پارامترهای موثر	واحد	متغیرها	سطوح			
			پایین	بالا	- آلفا	نقطه مرکزی + آلفا
فاصله نازل تا هدف (H)	mm	X ₁	۵	۵۵	۱۷/۵	۴۲/۵
تعداد نازل‌ها	-	X ₂	۸	۲۴	۱۲	۱۶
دبی جرمی	kg/s	X ₃	۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۰۴۵	۰/۰۹۵
قطر نازل‌ها	mm	X ₄	۱	۲	۱/۲۵	۱/۵

۲ⁿ اجرا، ۲n اجرای محوری و یک اجرای مرکزی در CCD در نظر گرفته شده است، که n همان تعداد فاکتورهای طراحی شده است. در این پروژه، مدلی با چهار متغیر مستقل شامل ۲^۴ نقطه فاکتوریل، ۸ نقطه محوری و ۱ اجرا در نقطه مرکزی در نظر گرفته شده است. بنابراین، ۲۵ آزمایش (= ۲^۴ + ۲ (۴) + ۱) باید انجام شود. هر آزمایش ۳ بار تکرار و مقدار میانگین آن‌ها گزارش می‌شود. تکرار نقطه مرکزی مهم بوده و جهت بدست آمدن خطای آزمایش ۶ بار انجام می‌گردد. مدل کلی مرتبه دوم در CCD را می‌توان به شرح زیر بیان کرد [101-103]:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} x_i x_j + e_i \quad (۸-۳)$$

که در آن Y پاسخ است. X_i و X_j متغیرها هستند. b₀ و b_i های دیگر پارامترهای تنظیم هستند و e_i خطا را نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل واریانس برای گرفتن فاکتورهای فرآیند و پاسخ‌ها انجام شده است. کیفیت مدل مرتبه دوم با تعیین ضرایبی مانند R² و Adj-R² در نظر گرفته شده است.

فصل ۴: بحث و نتیجه گیری

۴-۱ مقدمه

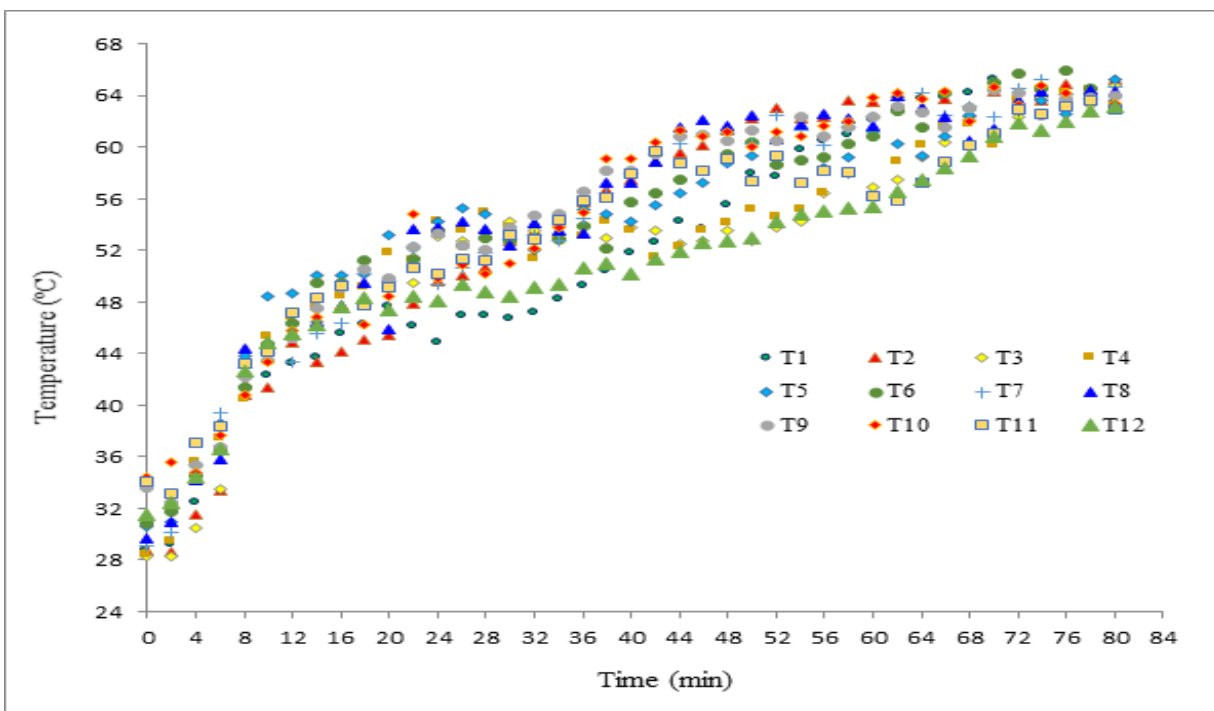
پس از توصیف دستگاه و روش‌های آزمایشگاهی، نتایج به دست آمده از این ست آپ، در این فصل توضیح داده شده است. در ابتدا، نتایج مربوط به استفاده از آب خالص در خنک سازی سیستم مذکور ارائه شده است. در این قسمت، داده‌های مربوط به توزیع دما و شاخص یکنواختی دما تشریح شده‌اند، و سپس، نتایج مربوط به تحلیل ANOVA ارائه شده است. در ادامه، رابطه توان خروجی از ماژول PV و دمای میانگین سطح با متغیرهای عملیاتی نظیر قطر نازل، تعداد نازل، فاصله جت تا پشت ماژول PV، و دبی جرمی بررسی شده است. همچنین، شرایط بهینه شده با روش RSM نیز به جزئیات مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، نتایج مربوط به استفاده از نانو سیال در بهبود انتقال حرارت نیز ارائه شده است.

۴-۲ نتایج استفاده از آب خالص به عنوان سیال خنک کننده

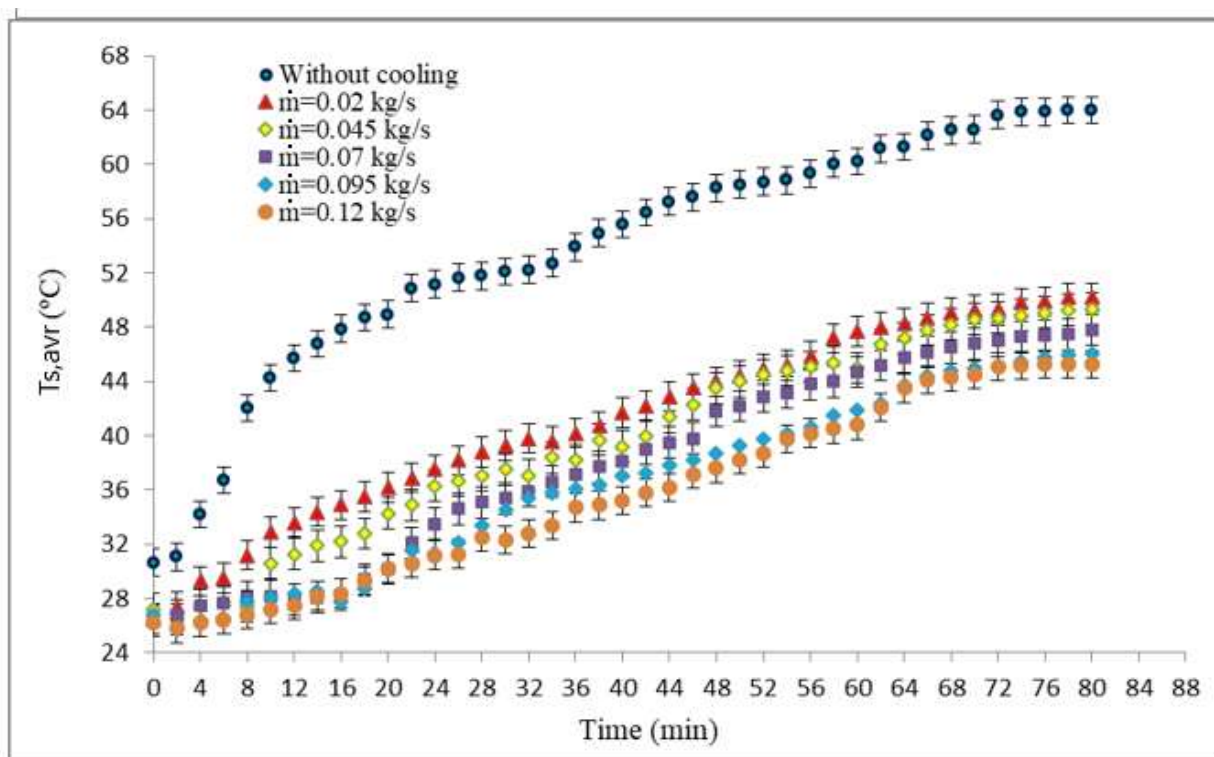
۴-۲-۱ داده‌های تجربی برای توزیع دما در ماژول PV

۴-۲-۱-۱ توزیع دما

در این پروژه، یکی از پارامترهایی که بسیار قابل توجه می‌باشد، توزیع دماست. توزیع دما در حالی اندازه گیری می‌شود که میزان دبی جرمی آب در هر آزمایش تغییر می‌کند. شکل (۴-۱) تغییر دمای محلی، میانگین دمای سطح در ماژول PV ($T_{s,av}$) و توزیع آن در برابر زمان را نشان می‌دهد. شکل (۴-۱ الف)) نمودار تغییرات دمای ۱۲ ناحیه روی سطح ماژول PV را در طول زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، دمای هر ناحیه با گذشت زمان افزایش می‌یابد و در نهایت تقریباً ثابت می‌شود. از شکل (۴-۱ ب)) مشخص است که $T_{s,av}$ در زمان صفر، از حداقل مقدار ۳۰/۶۵ درجه سانتیگراد به حداکثر مقدار ۶۳/۹۵ درجه سانتیگراد می‌رسد، که این تغییر با گذشت زمانی معادل با ۸۰ دقیقه انجام می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۴- ۱. (الف) دمای محلی برای حالتی که سیستم سرمایشی وجود ندارد، (ب) دمای میانگین مازول PV بر حسب زمان برای سیستم JIC و سیستمی که سرمایش ندارد ($H/d_n = 15$ ، $d_n = 2\text{mm}$ ، $N=8$).

همان‌طور که در شکل (۱-۴) نشان داده شده است، $T_{s,av}$ با گذشت زمان افزایش می‌یابد. علاوه بر این، قبل از شروع خنک کاری نیز $T_{s,av}$ بسیار زیاد می‌شود. در صورت وجود نداشتن سیستم خنک کننده، پس از سپری شدن ۵۰ دقیقه، دما در حدود ۲۶ درجه سانتیگراد تغییر می‌کند. در حالی که، دامنه تغییرات دما برای سایر طرح‌ها نزدیک به ۱۴ درجه سانتیگراد می‌باشد. هم‌چنین، لازم به ذکر است که با شروع فرآیند خنک سازی، سرعت افزایش $T_{s,av}$ در ۴۰ دقیقه اول فرآیند خنک کاری بیشتر است، و سپس با سرعت کمتری به دمای ثابت می‌رسد. در واقع، این کاهش $T_{s,av}$ به دلیل قابلیت بالای حذف حرارت در سیستم JIC است. در سیستم JIC، ماژول‌های PV با کاهش دما و ایجاد توزیع یکنواخت دما به خوبی خنک می‌شوند.

بر اساس این شکل، دامنه تغییر $T_{s,av}$ برای آب با دبی جرمی ۰/۰۲ کیلوگرم بر ثانیه، کم‌ترین مقدار را دارد. علاوه بر این، دمای ماژول PV در ۸۰ دقیقه به حداکثر دمای ۴۹/۵ درجه سانتی گراد می‌رسد. از طرف دیگر، با افزایش دبی جرمی، تنظیم حرارتی ماژول PV از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد شد. یکنواخت نبودن دمای ماژول PV از جمله مسائلی است که به علت کم بودن تماس سلول با بستر [104, 105] یا نتایج هندسه ماژول به وجود می‌آید [106].

از آن‌جایی که هدف اصلی این پروژه تهیه یک سیستم خنک کننده قابل استفاده است، لذا، توزیع یکنواخت دما در کل ماژول PV یک فاکتور مهم به حساب می‌آید. عدد رینولدز جت در جدول (۱-۴) و جدول (۲-۴) ارائه شده است، که برای محاسبه آن از مقدار متوسط سرعت جت استفاده می‌شود. از طرفی در محاسبه سرعت متوسط جت از دبی جرمی آب نیز استفاده می‌شود. عدد رینولدز جت و سرعت جت با معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$Re_{d_n} = \frac{\rho U d_n}{\mu} \quad (۱-۴)$$

$$U = \frac{\dot{m}}{N \left(\frac{\pi d_n^2}{4} \right)} \quad (۲-۴)$$

جدول ۴-۱. دمای میانگین، ماکزیمم و مینیمم در مازول PV، و دامنه تغییرات داده‌های دما در $d_n = 1 \text{ mm}$.

ردیف	دبی جرمی (kg/s)	عدد رینولدز	مینیمم T (°C)	ماکزیمم T (°C)	دامنه تغییرات (°C)	دمای میانگین سطح Ts,av (°C)				
۱	۰	۰	۵۶/۴	۷۰/۱	۱۳/۲۸	۶۳/۹۵				
فاصله تا صفحه ۵ mm										
			N=8	N=24	N=8	N=24				
۱	۰/۰۲	۷۹۵/۷۵	۳۷/۶	۳۹/۶	۴۰/۴	۴۵/۷	۱/۰۱	۳/۶۱	۳۷/۹۰	۴۲/۱۰
۲	۰/۰۴۵	۱۷۹۰/۵	۳۵/۵	۳۸/۲	۳۸/۴	۴۴/۲	۰/۸۰	۲/۱۰	۳۶/۵۰	۴۱/۲۰
۳	۰/۰۷	۲۷۸۵/۲	۳۴/۰	۳۸/۳	۳۶/۶	۴۱/۲	۰/۷۳	۱/۴۶	۳۵/۵۰	۳۹/۹۰
۴	۰/۰۹۵	۳۷۷۹/۹۲	۳۳/۱	۳۷/۲	۳۶/۳	۴۰/۸	۰/۷۲	۱/۱۴	۳۵/۰۳	۳۸/۶۰
۵	۰/۱۲	۴۷۷۴/۶۵	۳۳/۵	۳۶/۵	۳۶/۶	۳۹/۶	۰/۷۲	۱/۰۱	۳۴/۴۰	۳۷/۹۱
فاصله تا صفحه ۳۰ mm										
			N=8	N=24	N=8	N=24	N=8	N=24	N=8	N=24
۱	۰/۰۲	۷۹۵/۷۵	۳۸/۷	۴۴/۵	۴۳/۴	۴۸/۴	۱/۴۰	۴/۲۹	۴۰/۳۰	۴۴/۶۰
۲	۰/۰۴۵	۱۷۹۰/۵	۳۷/۸	۴۱/۸	۴۱/۵	۴۷/۳	۱/۳۹	۲/۹۸	۳۸/۷۰	۴۳/۹۰
۳	۰/۰۷	۲۷۸۵/۲	۳۶/۵	۴۰/۱	۴۰/۴	۴۴/۵	۱/۰۴	۱/۹۱	۳۷/۷۰	۴۲/۰۹
۴	۰/۰۹۵	۳۷۷۹/۹۲	۳۵/۴	۳۹/۳	۳۸/۸	۴۳/۴	۱/۰۲	۱/۷۴	۳۶/۵۱	۴۰/۹۰
۵	۰/۱۲	۴۷۷۴/۶۵	۳۴/۲	۳۸/۴	۳۷/۵	۴۱/۳	۰/۸۳	۱/۱۵	۳۵/۵۰	۳۹/۸۰
فاصله تا صفحه ۵۵ mm										
			N=8	N=24	N=8	N=24	N=8	N=24	N=8	N=24
۱	۰/۰۲	۷۹۵/۷۵	۳۷/۶	۴۰/۳	۴۳/۷	۴۷/۶	۲/۸۱	۴/۹۰	۴۰/۶۷	۴۴/۹۱
۲	۰/۰۴۵	۱۷۹۰/۵	۳۶/۲	۴۰/۶	۴۰/۵	۴۶/۶	۲/۱۹	۲/۹۱	۳۸/۷۰	۴۳/۹۰
۳	۰/۰۷	۲۷۸۵/۲	۳۶/۱	۴۰/۲	۴۰/۲	۴۵/۴	۱/۷۱	۲/۲۳	۳۷/۷۰	۴۲/۱۰
۴	۰/۰۹۵	۳۷۷۹/۹۲	۳۴/۸	۳۹/۳	۳۹/۱	۴۳/۸	۱/۵۵	۱/۷۴	۳۶/۵۰	۴۰/۹۰
۵	۰/۱۲	۴۷۷۴/۶۵	۳۴/۶	۳۷/۲	۳۷/۶	۴۱/۶	۰/۶۶	۱/۷۹	۳۵/۹۰	۳۹/۹۰

جدول ۴-۲. دمای میانگین، ماکزیمم و مینیمم در ماژول PV، و دامنه تغییرات داده‌های دما در $d_n = 2 \text{ mm}$.

ردیف	دبی جرمی (kg/s)	عدد رینولدز	مینیمم $T (^{\circ}\text{C})$	ماکزیمم $T (^{\circ}\text{C})$	دامنه تغییرات $(^{\circ}\text{C})$	دمای میانگین سطح $T_{s,av} (^{\circ}\text{C})$
۱	۰	۰	۵۶/۴	۷۰/۱	۱۳/۲۸	۶۳/۹۵
فاصله تا صفحه 5 mm						
			N=8	N=24	N=8	N=24
۱	۰/۰۲	۷۹۵/۷۵	۴۰/۶	۴۴/۶	۵۲/۱	۴۶/۸
۲	۰/۰۴۵	۱۷۹۰/۵	۴۰/۹	۴۲/۷	۴۸/۸	۴۵/۶
۳	۰/۰۷	۲۷۸۵/۲	۳۹/۱	۴۲/۲	۴۷/۱	۴۴/۸
۴	۰/۰۹۵	۳۷۷۹/۹۲	۳۸/۷	۴۱/۸	۴۵/۶	۴۳/۸
۵	۰/۱۲	۴۷۷۴/۶۵	۳۸/۴	۴۱/۲	۴۴/۱	۴۲/۹
فاصله تا صفحه 30 mm						
			N=8	N=24	N=8	N=24
۱	۰/۰۲	۷۹۵/۷۵	۴۲/۴	۴۷/۳	۵۶/۶	۵۰/۱
۲	۰/۰۴۵	۱۷۹۰/۵	۴۱/۲	۴۵/۲	۵۱/۴	۴۹/۳
۳	۰/۰۷	۲۷۸۵/۲	۴۱/۸	۴۵/۸	۵۱/۱	۴۷/۹
۴	۰/۰۹۵	۳۷۷۹/۹۲	۴۰/۵	۴۳/۱	۴۷/۶	۴۶/۱
۵	۰/۱۲	۴۷۷۴/۶۵	۴۰/۲	۴۳/۷	۴۶/۱	۴۴/۶
فاصله تا صفحه 55 mm						
			N=8	N=24	N=8	N=24
۱	۰/۰۲	۷۹۵/۷۵	۴۱/۳	۴۶/۳	۵۵/۲	۵۰/۰
۲	۰/۰۴۵	۱۷۹۰/۵	۴۱/۸	۴۴/۴	۵۲/۶	۴۹/۲
۳	۰/۰۷	۲۷۸۵/۲	۴۰/۵	۴۶/۲	۵۰/۴	۴۷/۶
۴	۰/۰۹۵	۳۷۷۹/۹۲	۴۰/۵	۴۲/۹	۴۹/۵	۴۶/۵
۵	۰/۱۲	۴۷۷۴/۶۵	۴۰/۲	۴۳/۲	۴۸/۵	۴۴/۳

برای ارزیابی انحراف توزیع دما از ماژول PV در دبی‌های جرمی متفاوت آب، از روش دامنه تغییرات برای میزان پراکندگی دما نیز استفاده شده است. در واقع، یکنواختی دما به وضوح کارایی خنک کننده پیشنهاد شده را نشان می‌دهد.

در جدول (۴-۱)، درجه حرارت حداکثر، حداقل و $T_{s,av}$ به همراه دامنه تغییرات داده‌های ۱۲ محدوده کوچک اندازه گیری شده، برای حالت حضور ماژول بدون خنک کننده و استفاده از سیستم JIC در دبی‌های جرمی مختلف آب ارائه شده است. در این جدول، داده‌های مربوط به استفاده از نازل‌هایی با $d_n = 1 \text{ mm}$ (حداقل قطر نازل) در دو حالت $N = 8$ و $N = 24$ (حداقل و حداکثر تعداد نازل‌ها) ارائه شده است. اثر تغییر فاصله نازل از سطح ماژول در سه حالت و در واقع، در سه مقدار $H = 5 \text{ mm}$ (حداقل فاصله)، $H = 55 \text{ mm}$ (حداکثر فاصله) و $H = 30 \text{ mm}$ (فاصله متوسط) بررسی شده است. نتایج جدول (۴-۱) نشان می‌دهد که در صورت عدم خنک کاری، بالاترین درجه حرارت $63/3$ درجه سانتی گراد می‌باشد. همچنین، اختلاف بین حداکثر و حداقل دما حدود $13/7$ درجه سانتی گراد است، و دامنه تغییرات داده‌ها زیاد می‌شود ($13/28$ درجه سانتیگراد). این موضوع، نشان دهنده توزیع غیر یکنواخت دما در نقاط مختلف سطح ماژول PV است. در هر سه مقدار H ، هنگامی که از ۲۴ نازل استفاده می‌شود ($N = 24$)، مقادیر دامنه تغییرات داده‌ها بسیار کمتر از $N = 8$ است، و بنابراین در $N = 24$ توزیع دما یکنواخت‌تر است. با افزایش تعداد نازل‌ها، نقاط بیشتری از سطح پشتی ماژول PV خنک می‌شوند، و انتظار می‌رود که افزایش تعداد N باعث بهبود توزیع یکنواخت دمای ماژول PV شود. علاوه بر این، جدول (۴-۱) نشان می‌دهد که با افزایش دبی آب، در تمام مقادیر N و H ، دامنه تغییرات داده‌های دما کم می‌شود و توزیع دما یکنواخت‌تر می‌شود. همچنین، افزایش دبی جرمی آب منجر به کاهش دمای ماکزیمم می‌شود که این امر باعث کاهش تنش‌های گرمایی و مشکلات تطبیق ناپذیری نیز می‌شود. از طرفی، جدول (۴-۱) نشان می‌دهد که در $H = 5$ میلی‌متر، $T_{s,av}$ کمترین مقدار خود را نسبت به $H = 30$ میلی‌متر و $H = 55$ میلی‌متر دارد. در $N = 24$ و $H = 5 \text{ mm}$ ، کمترین مقدار دمای میانگین ماژول PV، کمترین دامنه تغییرات داده‌ها و همچنین کمترین مقدار دمای ماکزیمم را می‌توان مشاهده کرد که با افزایش دبی آب این روند نزولی است. در مقایسه با سایر مقادیر H ، کمترین فاصله نازل از ماژول، یعنی $H = 5$ میلی‌متر، بیشترین توانایی را در ایجاد توزیع یکنواخت از دما دارد، زیرا در فواصل کوتاه، جت آب با شدت بیشتری به پشت ماژول PV برخورد می‌کند و دامنه انبساط آب در هنگام برخورد بیشتر می‌شود. بنابراین، انتظار می‌رود که نقاط بیشتری از سطح ماژول

PV خنک شود. جدول ۲-۴ اطلاعاتی مشابه با جدول ۱-۴ را ارائه کرده است. در این جدول تمامی اطلاعات مربوط به داده‌های نازل‌هایی با $d_n = 2$ میلی‌متر می‌باشد. در واقع، $d_n = 2$ mm بزرگترین قطر در نظر گرفته شده در این پروژه است و هدف از ارائه جداول ۱-۴ و ۲-۴ مقایسه تاثیر کوچکترین و بزرگترین قطر نازل‌ها بر توزیع دما در ماژول بوده است. مقایسه جدول ۲-۴ با جدول ۱-۴ نشان می‌دهد که در سیستم JIC، نازل‌هایی با $d_n = 1$ میلی‌متر گزینه مناسب‌تری برای ایجاد توزیع یکنواخت دما، ایجاد دمای میانگین سطح یکنواخت‌تر $T_{s,av}$ ، ایجاد حداکثر دما و دامنه تغییرات دمایی بهتر می‌باشند. این داده‌ها در مقایسه با مقادیر ارائه شده برای $d_n = 2$ mm بسیار کمتر هستند. جدول ۲-۴ تایید می‌کند که $N = 24$ در مقایسه با $N = 8$ عملکرد بهتری در ایجاد توزیع دمای یکنواخت دارد، و همچنین حداقل مقدار H (۵ میلی‌متر) منجر به ایجاد پایین‌ترین دمای میانگین بر روی ماژول (بالاترین میزان خنک کاری) می‌شود.

۴-۲-۱-۲ شاخص یکنواختی دما (TU_i)

همان‌طور که قبلاً ذکر شده است، برای اندازه‌گیری $T_{s,av}$ ، دمای ۱۲ ناحیه کوچک در سطح پشتی ماژول PV با استفاده از یک ترمومتر در طول آزمایش‌ها اندازه‌گیری می‌شود و میانگین این ۱۲ دما به صورت $T_{s,av}$ گزارش می‌شود. شکل (۲-۳) ناحیه‌ای که در آن ترموکوپل‌ها به پشت ماژول PV متصل شده‌اند را به همراه فاصله ترموکوپل‌های مجاور از یکدیگر و از لبه ماژول نشان می‌دهد. اگر فرض شود که درجه حرارت هر ناحیه در یک منطقه کوچک در اطراف آن غالب است، بنابراین، با توجه به فاصله نقاط از یکدیگر:

$$A_1 = A_2 = A_3 = 9675 \text{ (mm)}^2$$

$$A_4 = A_5 = A_6 = 6525 \text{ (mm)}^2$$

$$A_7 = A_8 = A_9 = 6525 \text{ (mm)}^2$$

$$A_{10} = A_{11} = A_{12} = 9675 \text{ (mm)}^2$$

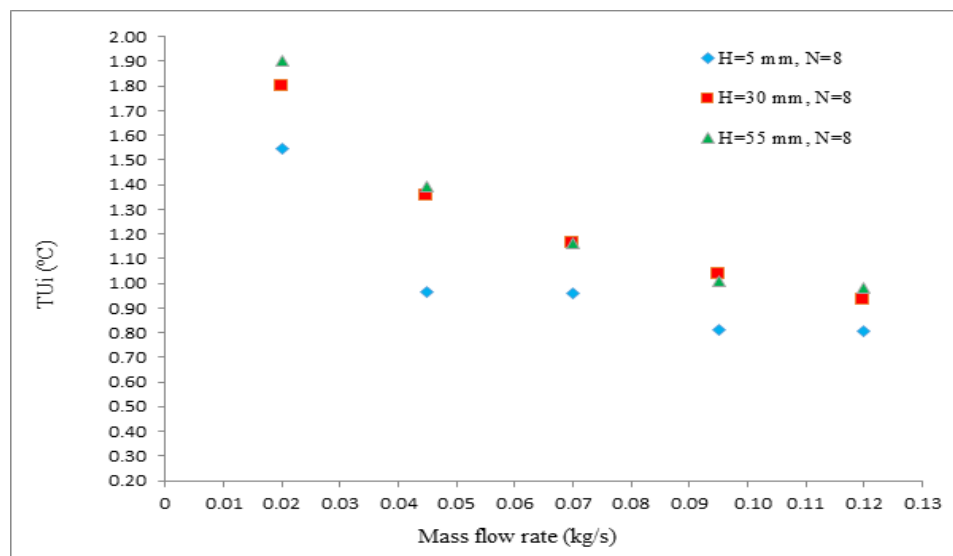
و مساحت کل (A_t) برابر با مجموع مساحت‌های $A_1, A_2, \dots, A_{12}$ می‌باشد.

به منظور بررسی یکنواختی دمای ماژول PV، پارامتر شاخص یکنواختی دما (TU_i) تعریف می‌شود:

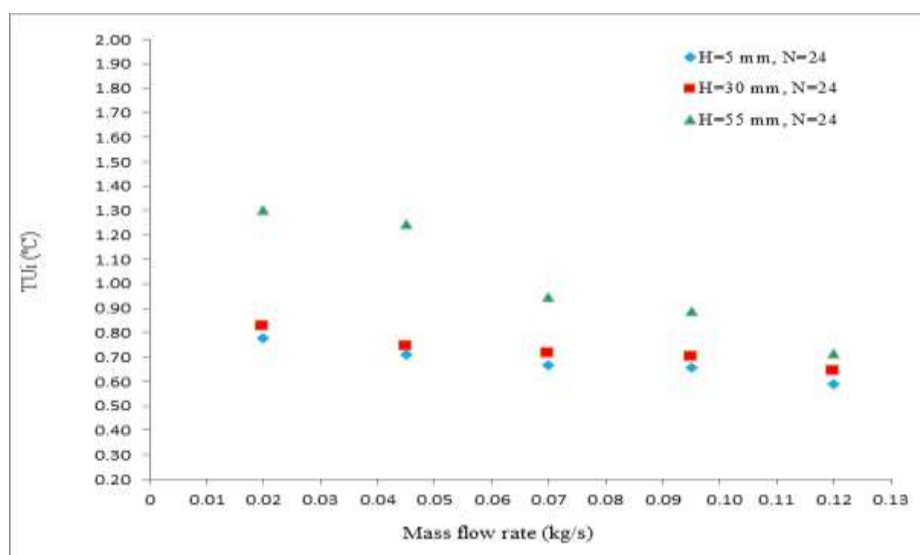
$$TU_i \cong \frac{\sum |T_s - T_{s,av}| \Delta A_s}{A_t} \quad (3-4)$$

که در این فرمول، T_s دمای محلی سطح (°C)، $T_{s,av}$ میانگین دمای سطح (°C)، ΔA_s مساحت اطراف ناحیه کوچک (mm^2)، و A_t مساحت کل ماژول PV (mm^2) است. با توجه به فرمول ارائه شده، هرچه مقدار TU_i پایین‌تر، توزیع دمایی ماژول PV یکنواخت‌تر می‌شود. شکل (۲-۴) میزان تغییر TU_i را با دبی جرمی در $d_n = 1$ میلی‌متر و سه فاصله متفاوت نازل تا هدف (H) را نشان می‌دهد. شکل (۲-۴) (الف) و شکل (۲-۴) (ب)، به ترتیب مقادیر TU_i را بر حسب دبی جرمی برای سیستم JIC با $N = 8$ و $N = 24$ را نشان می‌دهند. مقایسه شکل‌های (۲-۴) (الف) و (۲-۴) (ب) نشان می‌دهد که در هر سه مقدار از H، هنگام استفاده از ۲۴ نازل، مقادیر TU_i نسبت به حالتی که ۸ نازل استفاده می‌شود، بسیار کمتر است. در حقیقت، این موضوع نشان می‌دهد که در $N = 24$ یکنواختی دما بیشتر است. از آن‌جا که با افزایش تعداد نازل‌ها، نقاط بیشتری از سطح پشتی ماژول PV خنک می‌شود، می‌توان انتظار داشت که افزایش تعداد نازل‌ها باعث توزیع یکنواخت دمای ماژول PV و در نتیجه کاهش TU_i شود. هم‌چنین، در شکل (۲-۴) نشان داده شده است که افزایش دبی جرمی آب، در هر دو مقدار N و هم‌چنین تمام مقادیر H، منجر به کاهش TU_i می‌شود، که این امر نشان دهنده‌ی توزیع یکنواخت دمای ماژول می‌باشد. از طرفی، این شکل نشان می‌دهد که در $H = 5 \text{ mm}$ ، TU_i کم‌ترین مقدار خود را در مقایسه با $H = 30$ و $H = 55$ میلی‌متر دارد. اما، در مورد $H = 30 \text{ mm}$ و $H = 55 \text{ mm}$ هیچ روند ثابتی در مقادیر TU_i وجود ندارد. برای مثال، TU_i برای $\dot{m} = 0.095 \text{ kg/s}$ ، در $H = 30 \text{ mm}$ ، نسبت به $H = 55 \text{ mm}$ مقدار بالاتری دارد. با توجه به این شکل، در $N = 24$ و $H = 5$ میلی‌متر، مقادیر TU_i کم‌ترین مقدار خود را دارند که با افزایش دبی جرمی آب این روند کاهش پیدا می‌کند. لازم به ذکر است که، در مقایسه با سایر مقادیر H، کم‌ترین فاصله نازل از ماژول PV، یعنی $H = 5 \text{ mm}$ ، بالاترین قابلیت ایجاد دمای یکنواخت را دارد. در واقع، در فواصل نزدیک، جت‌های آب با شدت بیشتری به سطح پشتی ماژول برخورد می‌کنند و دامنه انبساط آب در هنگام برخورد بیشتر می‌شود. در نتیجه، می‌توان انتظار داشت که نقاط بیشتری از ماژول PV خنک شود، و هم-

چنین یکنواختی دما بیشتر شود. به منظور بررسی‌های بیشتر، تمامی موارد نشان شده در شکل (۴-۲)، برای قطر نازلی برابر با ۲ میلی‌متر، در شکل (۳-۴) به تصویر کشیده شده است. مقایسه شکل‌های (۴-۲) و (۴-۳) نشان می‌دهد که برای دبی‌های جرمی که در محدوده $0.02/0.095$ کیلوگرم در ثانیه می‌باشند، سیستم JIC می‌تواند در $d_n = 1 \text{ mm}$ دمای یکنواخت‌تری را ایجاد کند. با این حال، در $H = 5 \text{ mm}$ ، $N = 24$ ، و در دبی‌های جرمی نسبتاً بالا ($0.095 - 0.12$ کیلوگرم در ثانیه)، مکانیسم انتقال حرارت برای $d_n = 2 \text{ mm}$ نسبت به $d_n = 1 \text{ mm}$ تغییر می‌کند، و طبیعتاً مقادیر TU_i متفاوت می‌شوند. در واقع، در صورتی که $H/d_n > 2.5$ باشد، و به همراه آن، دبی‌های جرمی مقادیر بالایی را اتخاذ کنند ($0.095 - 0.12$ کیلوگرم در ثانیه)، جت‌های آزاد به علت کاهش سرعت برخورد جت، پخش نمی‌شوند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که وقتی دبی جرمی آب خارج شده از نازل‌ها به اندازه کافی بزرگ باشد، با افزایش قطر نازل‌ها، میزان پراکندگی شعاعی آب در اطراف منطقه راکد بیشتر می‌شود و متعاقباً جت‌ها بیشتر پخش می‌شوند. در حقیقت، هنگامی که $H = 5 \text{ mm}$ است و نازل‌ها به اندازه کافی نزدیک به سطح می‌باشند، هرچه قطر نازل‌ها بیشتر شود، مساحت بیشتری از سطح پشتی ماژول PV سرد می‌شود، که این امر به علت پخش شعاعی بیشتر ۲۴ جت نیز می‌باشد. در نتیجه، زمانی که عدد رینولدز بین $7559 - 9549$ تغییر کند و $2/5 \leq H/d_n < 55$ باشد، افزایش قطر نازل باعث افزایش دفع گرما از سطح PV می‌شود. این نتیجه در پروژه‌های قبلی مربوط به جت‌های آزاد نیز مشاهده شده است. به طور کلی، در کم‌ترین فاصله نازل از ماژول PV، یعنی $H = 5 \text{ mm}$ ، و بالاترین دبی جرمی آب ($\dot{m} = 0.12 \text{ kg/s}$)، نازل‌هایی با قطر ۲ میلی‌متر باعث ایجاد یکنواختی دمایی بیشتری می‌شوند. همچنین، شکل ۴-۳ نیز تایید می‌کند که عملکرد سیستمی که ۲۴ نازل دارد، نسبت به سیستمی که دارای ۸ نازل است، بهتر می‌باشد، و در حداقل مقدار H ، کمترین مقادیر TU_i و بالاترین یکنواختی دما مشاهده می‌شود. علاوه بر این، این شکل مقادیر کمتری از H را برای دستیابی به توزیع یکنواخت‌تر دما به تصویر می‌کشد و نشان می‌دهد که روند یکنواختی در این توزیع یکنواخت دما وجود دارد.

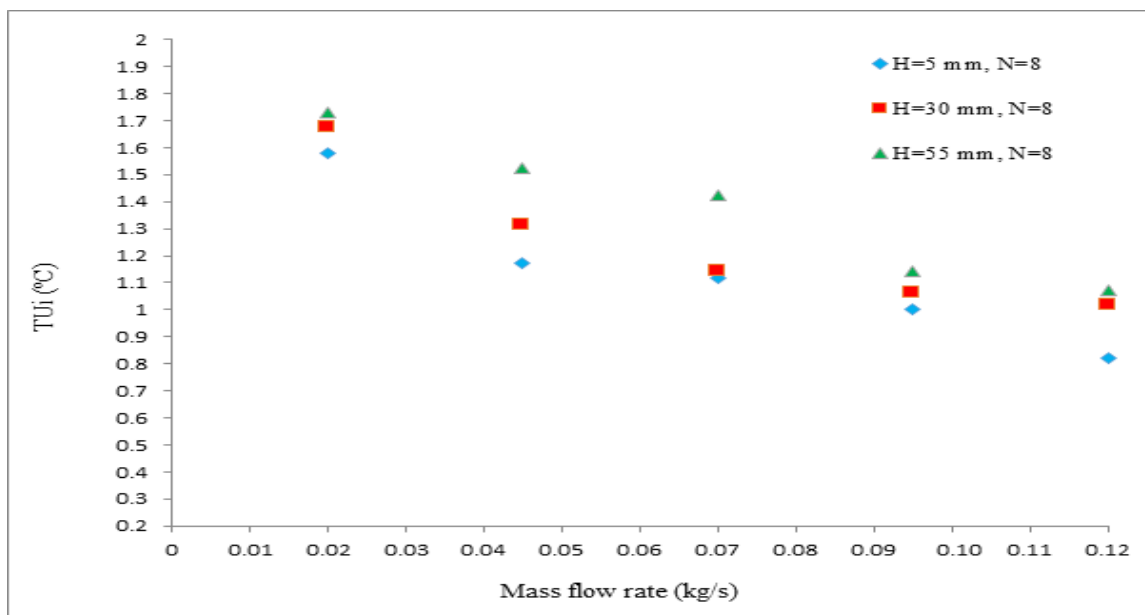


(الف)

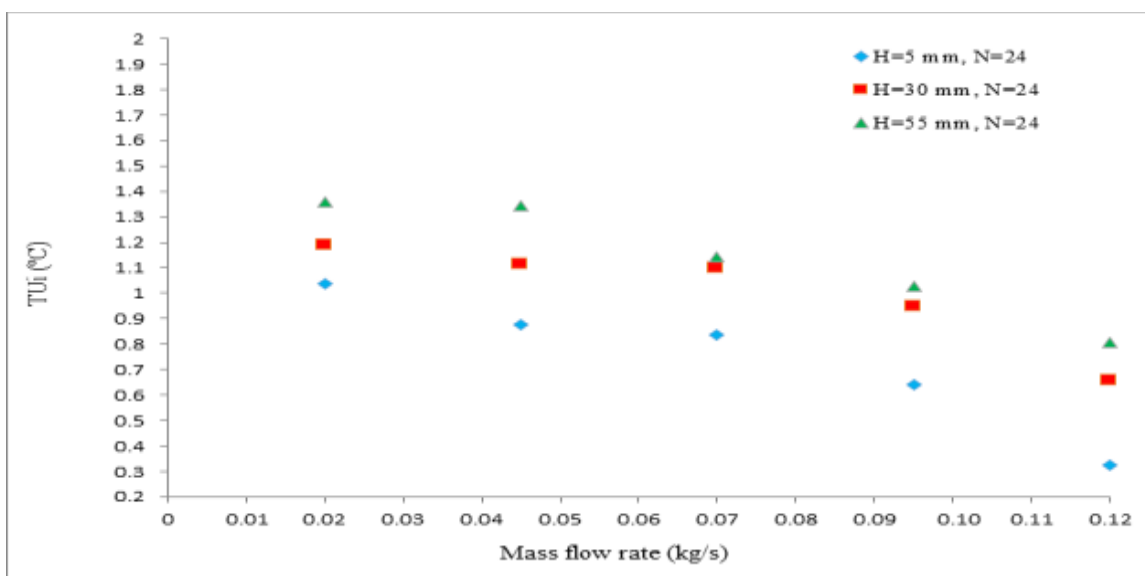


(ب)

شکل ۴-۲. تغییرات شاخص یکنواختی دما (TU_i) بر حسب دبی جرمی در $d_n = 1\text{ mm}$ و سه فاصله متفاوت از نازل تا هدف. (الف) $N = 8$ ، (ب) $N = 24$.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۳. تغییرات شاخص یکنواختی دما (T_{Ui}) بر حسب دبی جرمی در $d_n = 2 \text{ mm}$ و سه فاصله متفاوت از نازل تا هدف. (الف) $N = 8$ ، (ب) $N = 24$.

۲-۲-۴ نتایج دقت مدل

بعضی اوقات، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی یک مدل ریاضی فیت می‌شود که توانایی تشریح داده‌های آزمایشگاهی را به عنوان متغیر مستقل ندارد. از این رو، باید از روشی استفاده کرد تا مدل ریاضی مناسب را پیدا کرد. تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) یک روش مفید و کاربردی برای در نظر گرفتن مدل ریاضی مناسب است [100, 102]. با استفاده از این روش، دمای سطح ماژول PV (Y_1)، و همچنین قدرت خروجی آن (Y_2)، به عنوان عوامل پاسخ بررسی می‌شوند. ترتیب انجام آزمایش‌ها اهمیتی ندارد اما به منظور صرفه جویی در وقت و هزینه برای بازوبسته کردن سیستم جت، مطابق جدول (۳-۴)، سری اول آزمایش‌ها با قطر ۱ میلی متر نازل، برای تعداد ۸ تایی نازل‌ها با دبی 0.02 (kg/s) سپس 0.012 (kg/s) و در نهایت همین آزمایش‌ها برای تعداد ۲۴ تایی از نازل‌ها انجام گردید. مراحل بعدی انجام آزمایش‌ها به ترتیب برای قطر ۲، ۱/۵، ۱/۷۵، ۱/۲۵ میلی متر نازل‌ها همانند سری اول با تغییر دبی و فاصله نازل تا هدف انجام شد. مقادیر بدست آمده از هر دو پاسخ که وابسته به ماتریس طراحی می‌باشند، در جدول ۳-۴ ارائه شده‌اند.

جدول ۴-۳. محدوده آزمایشگاهی پارامترهای مستقلی که در طراحی CCD استفاده شده‌اند.

توان (W) Y_2	دمای میانگین سطح $T_{s,av}$ (°C) Y_1	اجرا	H X_1 (mm)	تعداد نازل‌ها X_2 (-)	دبی جرمی X_3 (kg/s)	قطر نازل‌ها X_4 (mm)
۷/۳	۴۲/۱	۱۵	۵	۸	۰/۰۲	۱
۶/۹	۴۴/۹	۲۴	۵۵	۸		
۸/۲۱	۳۷/۸	۱۳	۵	۲۴		
۷/۶۸	۴۰/۵	۱۴	۵۵	۲۴		
۷/۶۵	۳۷/۹	۷	۵	۸	۰/۱۲	
۷/۴	۳۹/۹	۹	۵۵	۸		
۸/۶۱	۳۴/۴	۸	۵	۲۴		
۸/۳	۳۵/۹	۳	۵۵	۲۴		
۶/۳۵	۴۶/۸	۶	۵	۸	۰/۰۲	۲
۵/۹۸	۵۰	۲۲	۵۵	۸		
۷/۱۳	۴۲/۴	۱۲	۵	۲۴		
۶/۶۸	۴۵/۵	۱۱	۵۵	۲۴		
۶/۶۲	۴۲/۹	۲۱	۵	۸	۰/۱۲	
۶/۴۶	۴۵/۳	۱۷	۵۵	۸		
۷/۵۱	۳۸/۹	۲	۵	۲۴		
۷/۱۷	۴۱/۲	۲۵	۵۵	۲۴		
۷/۵۶	۴۲/۷	۲۳	۱۷/۵	۱۶	۰/۰۷	۱/۵
۷/۳۹	۴۳/۲	۱۹	۴۲/۵	۱۶		
۷/۳	۴۳/۷	۱۰	۳۰	۱۲		
۷/۵	۴۱/۶	۱۶	۳۰	۲۰		
۷/۳۵	۴۳/۶	۱۸	۳۰	۱۶	۰/۰۴۵	۱/۵
۷/۵۷	۴۱/۴	۱	۳۰	۱۶	۰/۰۹۵	
۷/۶۲	۴۲/۶	۵	۳۰	۱۶	۰/۰۷	
۷/۱	۴۵/۳	۲۰	۳۰	۱۶	۰/۰۷	۱/۷۵
۷/۴۴	۴۲/۹	۴	۳۰	۱۶		۱/۲۵

نتایج ANOVA برای فاکتورهای مهم، متغیرهای چهارگانه و برهم کنش موجود بین داده‌های بدست آمده نیز در جدول (۴-۴) نشان داده شده است.

جدول ۴-۴. تست ANOVA برای توابع پاسخ Y_1 (دمای میانگین سطح) و Y_2 (توان)

p-value		F-value		square Mean		d.f.		Sum of squares		
Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	
۰/۰۰۰۱>	۰/۰۰۰۱>	۲۴۶/۹۸	۵۲۳/۸۶	۰/۶۱۳۸	۲۰/۳۶	۱۴	۱۴	۸/۵۹	۲۸۵/۰۱	Model
۰/۰۰۰۱>	۰/۰۰۰۱>	۲۰۴/۳۸	۶۳۹/۵۱	۰/۵۰۷۹	۲۴/۸۵	۱	۱	۰/۵۰۷۹	۲۴/۸۵	x_1 : Jet-to-target spacing (H)(mm)
۰/۰۰۰۱>	۰/۰۰۰۱>	۱۱۰۴/۵۳	۱۸۲۹/۴۵	۲/۷۵	۷۱/۰۹	۱	۱	۲/۷۵	۷۱/۰۹	x_2 : Number of nozzles
۰/۰۰۰۱>	۰/۰۰۰۱>	۳۱۶/۰۵	۱۸۷۷/۸۴	۰/۷۸۵۵	۷۲/۹۸	۱	۱	۰/۷۸۵۵	۷۲/۹۸	x_3 : Mass flow rate (kg/s)
۰/۰۰۰۱>	۰/۰۰۰۱>	۱۷۲۴/۸۰	۲۶۱۵/۲۲	۴/۲۹	۱۰۱/۶۳	۱	۱	۴/۲۹	۱۰۱/۶۳	x_4 : Diameter of nozzles
۰/۰۴۷۶	۰/۳۳۴۲	۵/۰۹	۱/۰۳	۰/۰۱۲۷	۰/۰۴۰۰	۱	۱	۰/۰۱۲۷	۰/۰۴۰۰	x_1x_2
۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۱۰	۱۱/۹۷	۲۰/۸۴	۰/۰۲۹۸	۰/۸۱۰۰	۱	۱	۰/۰۲۹۸	۰/۸۱۰۰	x_1x_3
۰/۴۱۳۹	۰/۰۲۹۵	۰/۷۲۶۸	۶/۴۳	۰/۰۰۱۸	۰/۲۵۰۰	۱	۱	۰/۰۰۱۸	۰/۲۵۰۰	x_1x_4
۰/۱۷۶۵	۰/۰۲۹۵	۲/۱۱	۶/۴۳	۰/۰۰۵۳	۰/۲۵۰۰	۱	۱	۰/۰۰۵۳	۰/۲۵۰۰	x_2x_3
۰/۰۴۰۲	۰/۳۳۴۲	۵/۵۶	۱/۰۳	۰/۰۱۳۸	۰/۰۴۰۰	۱	۱	۰/۰۱۳۸	۰/۰۴۰۰	x_2x_4
۰/۲۳۸۵	۰/۳۳۴۲	۱/۵۷	۱/۰۳	۰/۰۰۳۹	۰/۰۴۰۰	۱	۱	۰/۰۰۳۹	۰/۰۴۰۰	x_3x_4
۰/۲۲۶۱	۰/۲۳۷۹	۱/۶۶	۱/۵۸	۰/۰۰۴۱	۰/۰۶۱۲	۱	۱	۰/۰۰۴۱	۰/۰۶۱۲	x_1^2
۰/۲۷۱۴	۰/۰۰۳۹	۱/۳۶	۱۳/۹۷	۰/۰۰۳۴	۰/۵۴۳۰	۱	۱	۰/۰۰۳۴	۰/۵۴۳۰	x_2^2
۰/۴۴۲۷	۰/۰۰۰۶	۰/۶۳۸۷	۲۴/۷۹	۰/۰۰۱۶	۰/۹۶۳۵	۱	۱	۰/۰۰۱۶	۰/۹۶۳۵	x_3^2
۰/۰۳۲۹	۰/۰۰۰۱>	۶/۱۲	۴۹/۲۸	۰/۰۱۵۲	۱/۹۲	۱	۱	۰/۰۱۵۲	۱/۹۲	x_4^2
				۰/۰۰۲۵	۰/۰۳۸۹	۱۰	۱۰	۰/۰۲۴۹	۰/۳۸۸۶	Residual
						۲۴	۲۴	۸/۶۲	۲۸۵/۴۰	Total
Y_1 R^2 0.9986, adj R^2 0.9967, Adeq precision 103.3134										
Y_2 R^2 0.9971, adj R^2 0.9931, Adeq precision 67.9114										

مقادیر اف-ولیو^۱ محاسبه شده برای دو مدل برابر با ۵۲۳/۵۸ و ۲۴۶/۹۸ است، که این مقادیر، اعداد بالایی هستند. همچنین، با توجه به جدول (۴-۴)، مقادیر مربوط به پی-ولیو^۲، که میزان پراکندگی داده ها را نشان می دهد و می بایست کمتر از ۰/۰۵ باشد، اعداد کمی هستند (۰/۰۰۰۱ <) و این موضوع مدل را از نظر آماری تایید می کند. ضریب همبستگی و R^2 تنظیم شده، میزان تطابق داده های آزمایشگاهی را با مقادیر پیش بینی شده نشان داده، که می توانند با بر هم کنش ها و متغیرهای مستقل آن ها، مشخص شوند. برای Y_1 (میانگین دمای سطح) و Y_2 (قدرت) مقادیر R^2 به ترتیب برابر ۰/۹۹۸۶ و ۰/۹۹۷۱ می باشد، که این موضوع نشان دهنده ی این است که ۹۹/۸۶ و ۹۹/۷۱٪ داده های آزمایشی ما با مقادیر پیش بینی شده تطابق دارد. با این حال، ضرایب تنظیم شده ($adj R^2$) که مکمل R^2 بوده و برای Y_1 و Y_2 به ترتیب برابر با ۰/۹۹۶۷ و ۰/۹۹۳۱ است. نشان دهنده توانایی بالای مدل برای پیش بینی بوده و کارآیی مدل را تایید می کند. علاوه بر این، دقت کافی^۳ از پارامترهای دیگری است که برای در نظر گرفتن دقت مدل نیاز است که این دقت برای Y_1 و Y_2 به ترتیب ۱۰۳/۳۱۳۴ و ۶۷/۹۱۱۴ می باشد. مشخص است که هر دو عدد، مقادیر بالایی هستند، و این نشان می دهد که مدل دقت کافی را دارد. علاوه بر این، برهم کنش x_1x_3 عبارت مهمی است که با $p\text{-value} < 0.05$ نشان می دهد که x_1 (فاصله جت به هدف H) و x_3 (دبی جرمی آب) و تعامل آن ها از فاکتورهای کلیدی هستند. بر اساس مقادیر اف-ولیو، اهمیت تاثیر متغیرهای مستقل بر پاسخ ها به شرح زیر تنظیم می شود:

$$x_1 \text{ (فاصله جت به هدف H)} < x_3 \text{ (نرخ دبی جرمی)} < x_4 \text{ (قطر نازل)} < x_2 \text{ (تعداد نازل ها)}$$

به همراه محاسبات ANOVA، برای پیدا کردن داده های متناقض و بررسی تناسب مدل فیت شده، طرح خاصی استفاده می شود. همان طور که در شکل (۴-۴) دیده می شود، برای هر دو متغیر $T_{s,av}$ و توان، داده های آزمایشی تقریباً به صورت مستقیم پخش می شوند، که یک همبستگی مناسب بین مقادیر پیش بینی شده و داده های

¹ F-Value

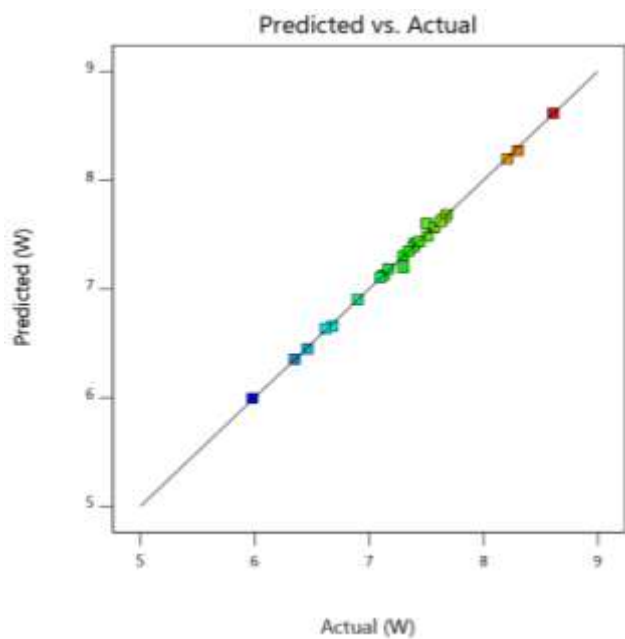
² P-Value

³ Adequate Precisions

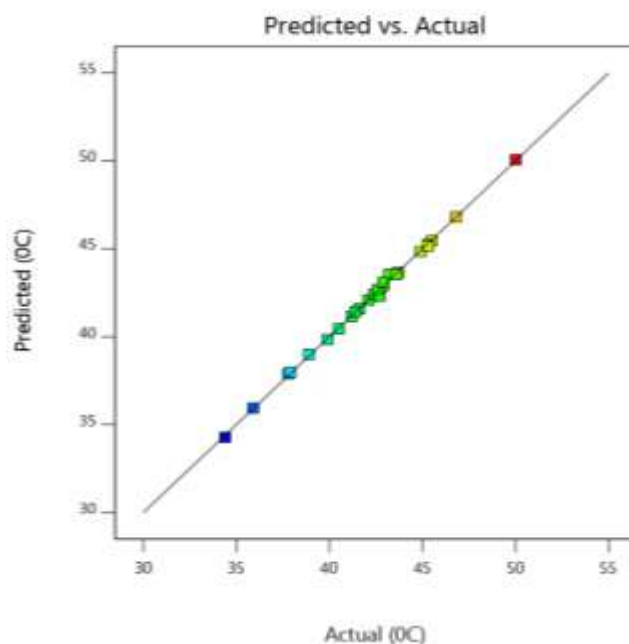
تجربی را نشان می‌دهد. این نمودار برای به تصویر کشیدن رابطه بین داده‌های آزمایشی و مقادیر پیش بینی شده

بسیار مفید است.. و برای کمک به تشخیص و نمایش مقادیر یا گروهی از مقادیر که توسط مدل پیش بینی نشده است کاربرد دارد.

از طرف دیگر، نمودارهای معمولی مربوط به باقیمانده، جزئیات مهم مربوط به مدل را به خوبی نشان می‌دهند و باید برای بررسی کیفیت فیت کردن داده‌ها استفاده شوند. در نهایت می‌توان با توجه به آن نتیجه گرفت که مدل استفاده شده مدل مناسبی است یا خیر.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۴. نمودار مقادیر پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی (الف) دمای میانگین و (ب) توان سطح.

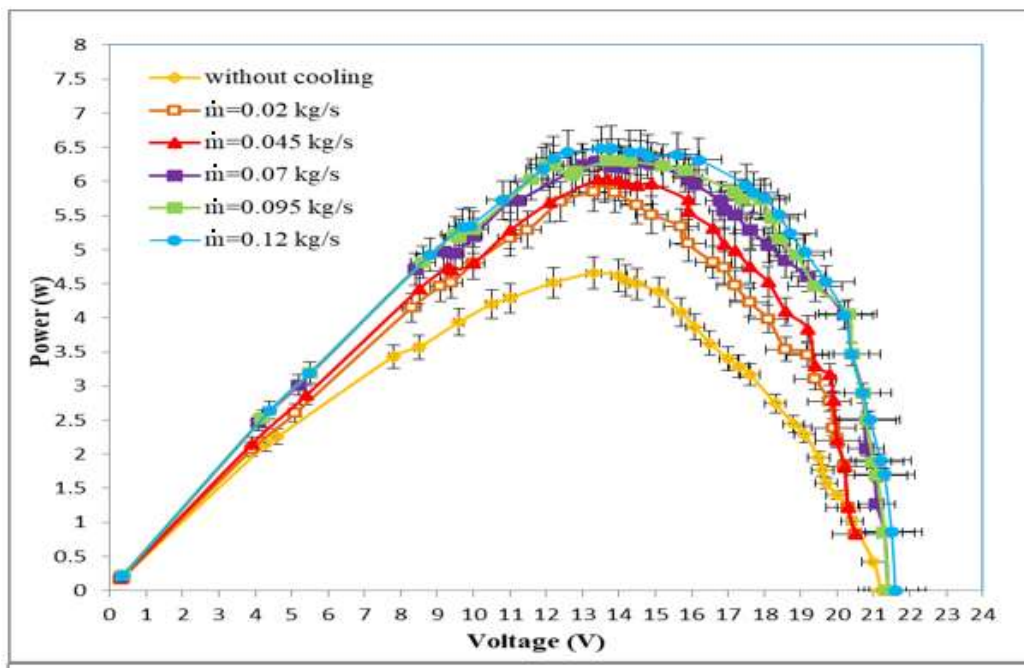
۳-۲-۴ خروجی الکتریکی ماژول PV

به منظور بررسی تاثیرات سیستم JIC در تولید برق توسط صفحه PV، ابتدا تغییرات دما و توان خروجی صفحات، بدون حضور سیستم خنک کاری ارزیابی می‌شود. سپس، داده های V-I به دست آمده از آزمایشات برای پنج دبی جرمی مختلف جمع آوری می‌شوند. داده‌های V-I برای سیستمی که فاقد خنک کاری است به همراه سیستمی که از JIC استفاده می‌کند، در دبی‌های جرمی متفاوت آب، $N = 8$ ، $d_n = 2 \text{ mm}$ و $H / d_n = 15$ ، پس از رسیدن به حالت پایا (۸۰ دقیقه) در شکل (۴-۵) (الف) نشان داده شده‌اند. سطح زیر منحنی V-I برای حالتی که سیستم خنک کاری وجود ندارد و حالتی که از سیستم JIC استفاده شده است، مقایسه شده‌اند، و نشان داده شده است که افزایش دبی جرمی آب تاثیر مثبتی در افزایش سطح منحنی V-I دارد. در واقع، مساحت زیر منحنی V-I قدرت خروجی صفحه PV را نشان می‌دهد، که این نتایج به معنای افزایش تولید برق در سیستم حاوی JIC نسبت به حالتی است که سیستم خنک کننده در محیط وجود ندارد. همچنین، با استفاده از مقادیر V-I به دست آمده برای ماژول PV می‌توان توان خروجی تولید شده توسط ماژول PV را محاسبه کرد. حداکثر مقدار توان خروجی القا شده توسط ماژول PV ($P_{\max}$) را می‌توان به شرح زیر به دست آورد [30, 85, 107, 108]:

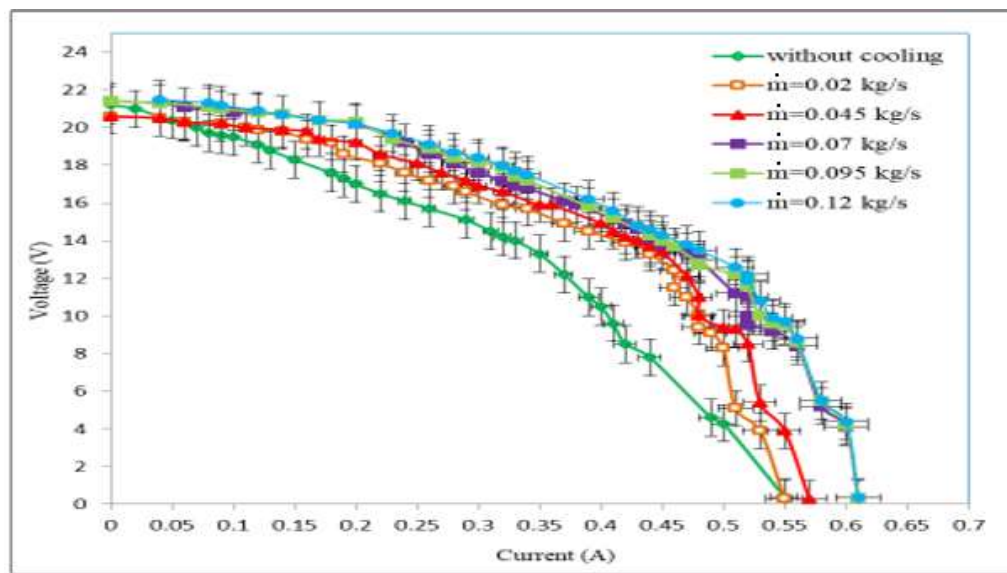
$$P_{PV} = I_{PV} \times V_{PV} \quad (۴-۴)$$

توان تولید شده توسط ماژول PV که با سیستم JIC خنک می‌شود، به عنوان تابعی از ولتاژ در شکل (۴-۵) (ب) رسم شده است. همان‌طور که پیش بینی شده است، در سیستم JIC با تزریق آب با هر دبی جرمی، ظرفیت تولید برق توسط ماژول PV زیاد می‌شود. مقایسه نتایج حاصل از توان تولید شده در سیستمی فاقد خنک کاری و سیستمی که از JIC استفاده می‌کند، تاثیر وجود خنک کننده در حضور جت سیال را بر عملکرد الکتریکی ماژول PV برجسته می‌کند. علاوه بر این، با توجه به شکل (۴-۵) (ب) می‌توان دریافت که با افزایش دبی، سیستم دارای خنک کاری ماژول PV نسبت به سیستم بدون خنک کاری توان خروجی بالاتری دارد. نتایج

نشان می‌دهد که حداکثر مقدار توان تولیدی برابر با $W=6.5$ است که در $N = 8$ ، $d_n = 2 \text{ mm}$ و $H / d_n = 15$ اتفاق می‌افتد. در این توان، ولتاژ $13/9$ ولت است.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۵. تاثیر دبی جرمی آب بر مشخصات (الف) توان-ولتاژ و (ب) جریان-ولتاژ در مازول PV ($N=8$ ، d_n ، $H/d_n = 15$ ، $d_n=2\text{mm}$)

۴-۲-۴ تاثیر JIC بر عملکرد حرارتی و توان خروجی ماژول PV

شرایط بهینه جت های برخوردی، به هندسه نازل ها، اثرات حرارتی سطح خنک شده، و شرایط جریان، مانند قطر جت، فاصله جت تا هدف و میزان دبی جرمی مایع بستگی دارد [106]. در این پروژه، محدوده های در نظر گرفته شده برای متغیرها به شرح زیر می باشد:

۱- فاصله بدون جت تا ماژول PV: $2.5 < H/d_n < 55$

۲- تعداد نازل: $8 < N < 24$

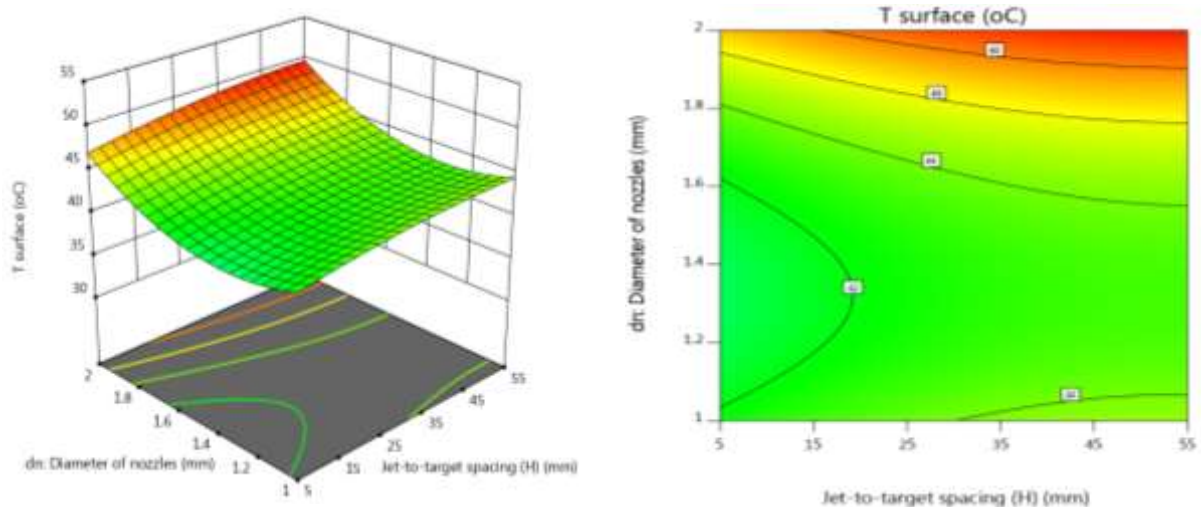
۳- عدد رینولدز: $1590 < Re_{dn} < 9550$

۴- دبی جرمی: $0.02 < \dot{m} < 0.12$

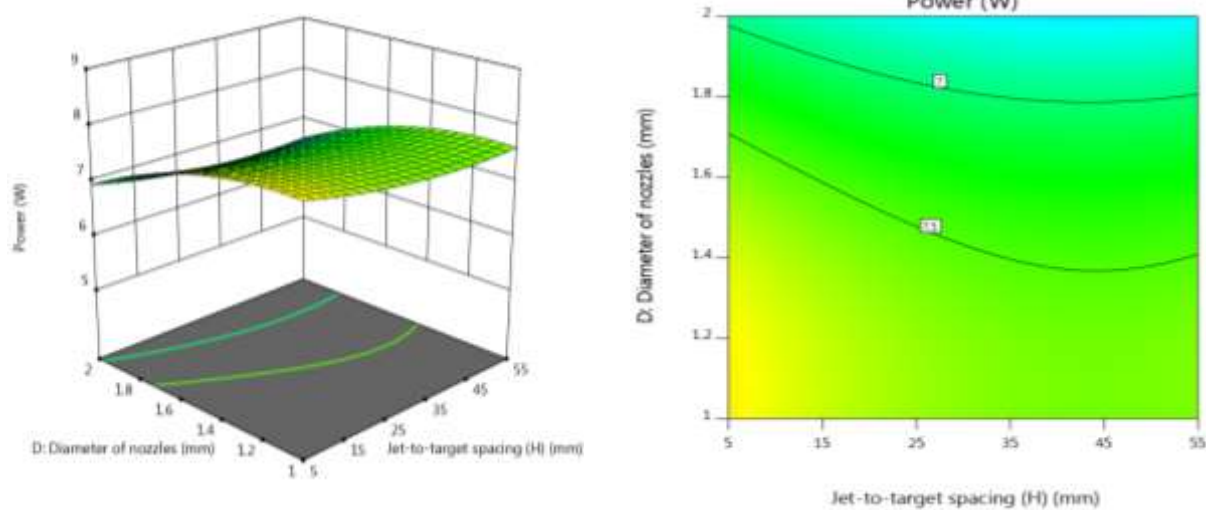
علاوه بر موارد مذکور، از آن جایی که تعداد زیادی از جت ها به سطح پشتی ماژول PV برخورد می کنند ($N = 20, 16, 12, 8$ و 24)، تاثیر دبی جرمی آب نیز در این سیستم بسیار مهم می باشد. سطوح سه بعدی، تاثیر پارامترهای مهم طراحی را روی میانگین دمای سطح ($T_{s,av}$) و توان خروجی (P_{PV}) نشان می دهند که این نتایج در شکل های (۴-۶) تا (۴-۹) نشان داده شده اند.

شکل (۴-۶) بر هم کنش های دوتایی قطر نازل (d_n) و فاصله جت تا هدف (H) و تاثیرشان بر $T_{s,av}$ و P_{PV} را نشان می دهد، در حالی که دو پارامتر دیگر طراحی (N و $\dot{m}$) در مقدار متوسط خود قرار دارند. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، $T_{s,av}$ با افزایش H و d_n زیاد می شود، و P_{PV} کاهش می یابد. در حقیقت، هنگامی که دبی جرمی ثابت نگه داشته می شود، P_{PV} با کاهش مقادیر d_n و H افزایش می یابد، که این موضوع به علت افزایش سرعت جت وانتقال حرارت بهتری باشد. نمودارهای دوبعدی نشان می دهند که برای $T_{s,av}$ و P_{PV} ، فاصله بدون جت تا هدف که مقادیری بین $2.5 < H/d_n < 55$ دارد، بسیار مهم است، زیرا سطح پشتی ماژول PV از هسته بالقوه جت های منتشر شده می باشد. نتایج ارائه شده در شکل (۴-۶) نشان می دهد که افزایش قطر نازل باعث کاهش سرعت خروجی جت و کاهش انتقال حرارت موضعی نسبت به نقطه سکون می شود.

مقدار ضریب انتقال حرارت کمتر منجر به بالا رفتن دمای سطح می شود و متعاقبا خروجی الکتریکی ماژول PV بسیار کم می شود.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۶. نمودار پاسخ سطح برای بررسی تاثیر D_n و H بر (الف) دمای سطح و (ب) توان خروجی ماژول PV ($N=16$).

وابستگی پاسخهای منحصر به فرد، دمای سطح ماژول PV (Y_1) و توان خروجی ماژول PV (Y_2)، از طریق فاکتورهای واقعی با مدل برهم کنشهای چهار عاملی به شرح زیر می باشد:

$$Y_1(^{\circ}C) = 59.187 + 0.1089x_1 + 0.6483x_2 + 90.1206x_3 - 35.9946x_4 - 0.00025x_1x_2 - 0.180x_1x_3 + 0.01x_1x_4 + 0.31x_2x_3 - 0.0125x_2x_4 + 2.000x_3x_4 - 0.00971x_1^2 - 0.02823x_2^2 - 962.7230x_3^2 + 13.572x_4^2 \quad (5-4)$$

$$Y_2(W) = 5.035 - 0.023x_1 + 0.134x_2 - 1.93x_3 + 2.740x_4 - 0.00014x_1x_2 + 0.0345x_1x_3 + 0.00085x_1x_4 + 0.4531x_2x_3 - 0.00734x_2x_4 - 0.625x_3x_4 + 0.00025x_1^2 - 0.002224x_2^2 + 39.07610x_3^2 - 1.20924x_4^2 \quad (6-4)$$

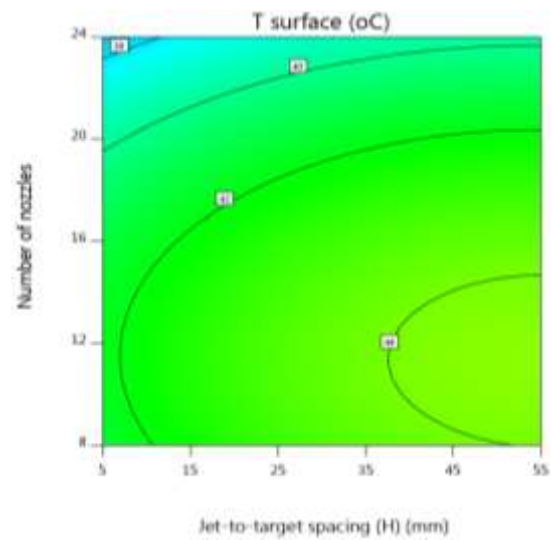
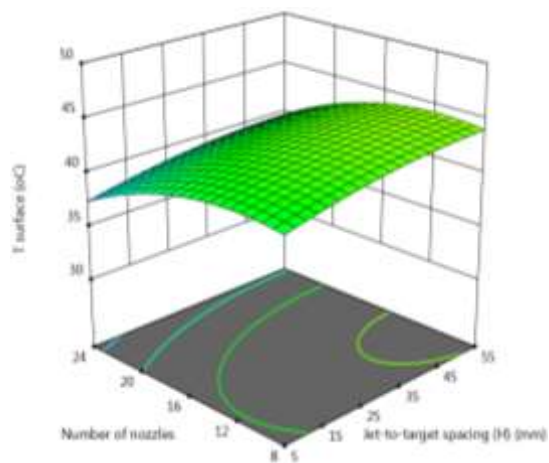
مدل بالامیزان تاثیر پارامتر ها و اثرات متقابل آن ها ، و همچنین مستقیم (+) یا معکوس (-) بودن اثرشان بر پاسخ ها را نشان می دهد. از این مدل می توان برای پیش بینی $T_{s,av}$ و P_{PV} در محدوده فاکتورهای مورد مطالعه استفاده کرد.

شکل (4-7) تاثیر بر هم کنش های دوتایی، تعداد نازل (N) و فاصله نازل تا صفحه (H) را بر $T_{s,av}$ و P_{PV} نشان می دهد. هنگامی که دبی جرمی و قطر نازل ثابت نگه داشته می شوند، با افزایش تعداد N، P_{PV} زیاد می شود. علت این موضوع افزایش نقاط سکون و کاهش منطقه مرتبط با جت دیواره می باشد. که در نهایت منجر به کاهش $T_{s,av}$ و افزایش P_{PV} می شود.

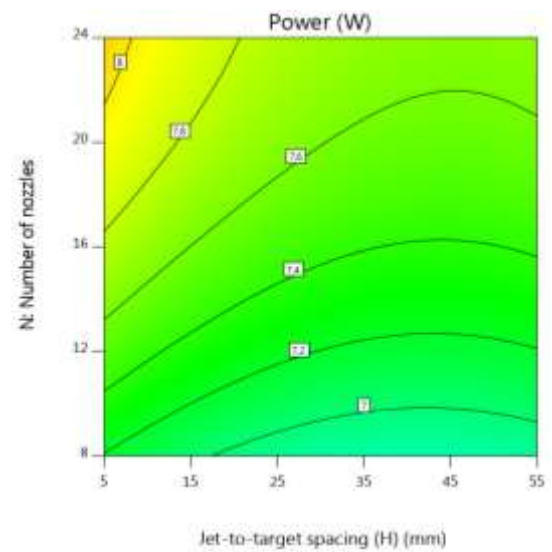
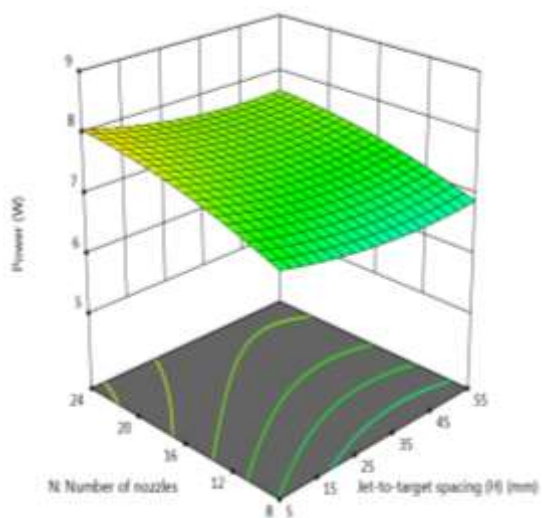
تاثیر تغییر دبی جرمی آب و تعداد نازل ها بر روی توان و دمای سطح PV ، با ثابت نگه داشتن دو پارامتر دیگر (H و dn) ، در مقدار متوسط خود ، در شکل (4-8) بررسی شده است. این آزمایشات در دبی های جرمی مختلف آب (۰/۱۲ - ۰/۰۲ کیلوگرم بر ثانیه) و $N = 8-24$ انجام شده است. شکل (4-8) نشان می دهد که با افزایش تعداد نازل ها، دمای سطح مائول PV کاهش می یابد، و در نتیجه، P_{PV} افزایش می یابد. نتایج به دست آمده در مورد تاثیر تعداد نازل ها (فاصله بین نازل ها) با نتایج کارهای مشابهی انجام شده متناسب می باشد [109]. همچنین، ابو زاهد و همکاران^۱ در کار خود مشاهده کردند که با افزایش دبی جرمی سیال خنک کننده، دمای سلول کاهش می یابد و در نتیجه P_{PV} زیاد می شود [68, 110, 111].

¹ Abo-Zehhad

علاوه بر این، همان‌طور که در شکل (۴-۸) نشان داده شده است، با افزایش تعداد نازل‌ها، P_{PV} به صورت قابل ملاحظه‌ای زیاد شده و $T_{s,av}$ در ماژول PV کم می‌شود. لازم به ذکر است که در $N = 24$ کمترین $T_{s,av}$ و بنابراین بالاترین مقدار P_{PV} مشاهده می‌شود. زیرا تبدیل فتوولتائیک انرژی خورشیدی به برق به دلیل کاهش دمای ماژول خورشیدی، افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که توان خروجی با کاهش قطر نازل‌ها به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.



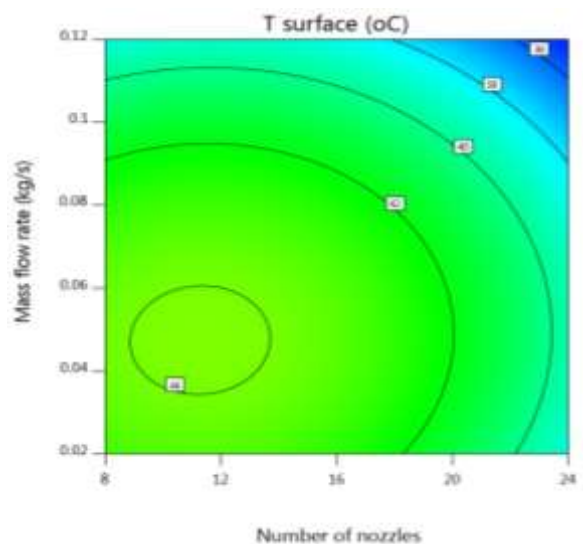
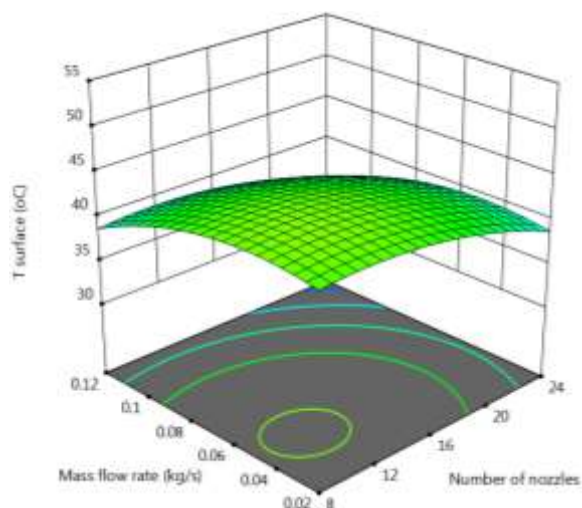
(الف)



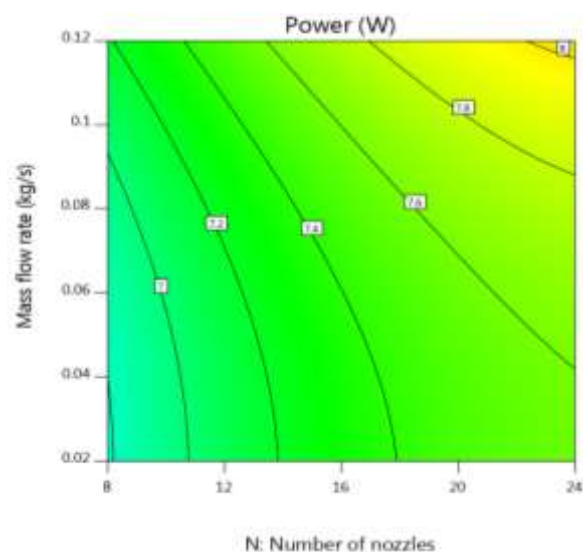
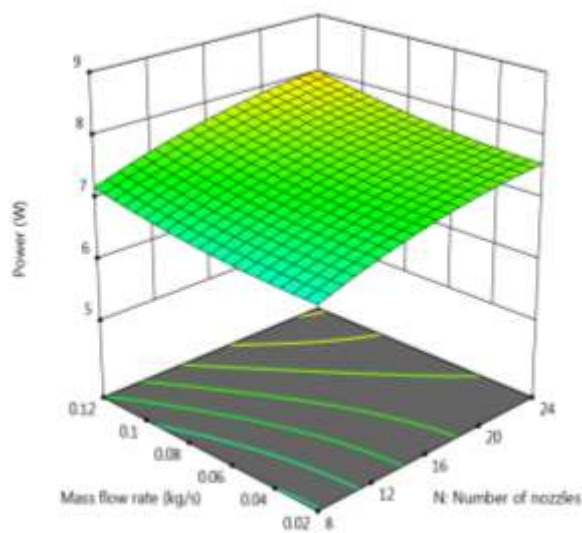
(ب)

شکل ۴-۷. نمودار پاسخ سطح در بررسی تاثیرات N و H بر روی (الف) دمای سطح و (ب) توان خروجی ماژول PV

$$(\dot{m} = 0.07 \frac{kg}{s} \text{ و } d_n = 1.5 \text{ mm})$$



(الف)



(ب)

شکل ۴-۸. نمودار پاسخ سطح در بررسی تاثیرات N و دبی جرمی بر روی (الف) دمای سطح و (ب) توان خروجی ماژول PV ($d_n = 1.5 \text{ mm}$ و $H = 30 \text{ mm}$).

با تحلیل اشکال (۴-۶) تا (۴-۹)، نتیجه‌گیری می‌شود که با افزایش دبی جرمی آب در سیستم حاوی JIC، توان PV افزایش یافته، و به طور همزمان دمای متوسط PV نیز کم می‌شود. با این حال، امکان دارد با افزایش دبی جرمی آب و کاهش قطر نازل، قدرت پمپاژ مربوط به نازل ایجاد کننده‌ی جت‌ها افزایش یابد و در نتیجه، عملکرد کلی ماژول PV کم شود. بنابراین، در سیستم JIC نیاز به تعیین قدرت پمپاژ می‌باشد. توان پمپاژ (P_{pump}) مورد نیاز برای هر دستگاه دارای جا به جایی اجباری به میزان دبی آب و افت فشار وابسته است [67, 109].

$$P_{pump} = Q \cdot \Delta P \quad (۷-۴)$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{\rho Q^2}{\left(\frac{\pi}{4} d_n^2 \cdot N \cdot C_d\right)^2} \quad (۸-۴)$$

که در این فرمول‌ها، ΔP افت فشار، ρ دانسیته سیال خنک کننده، Q دبی حجمی، N تعداد نازل، C_d ضریب تخلیه نازل و d_n قطر نازل هستند. توان خالص به دست آمده از معادله زیر محاسبه می شود [67, 112]:

$$P_{net} = P_{PV} - P_{pump} \quad (۹-۴)$$

همچنین، مقایسه عملکرد توان خنک کاری خروجی در صفحات خنک شده توسط سیستم JIC با مازول PV و سیستمی که عامل خنک کننده ندارد با فرمول زیر محاسبه می شود [67, 113]:

$$\%P_{(max)increase} = \left(\frac{P_{PV/JIC} - P_{PV, uncooled}}{P_{PV, uncooled}} \right) \quad (۱۰-۴)$$

کارایی اقتصادی سیستم PV / JIC که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، برای توزیع توان باقیمانده به منظور دستیابی به توان خالص تولید شده توسط مازول PV به صورت کمی قابل محاسبه می باشد:

$${}^1COE = \left(\frac{P_{PV/JIC} - P_{pump}}{P_{PV, uncooled}} \right) \quad (۱۱-۴)$$

که در این فرمول‌ها، $P_{PV/JIC}$ و $P_{PV,Uncooled}$ به ترتیب ماکزیمم توان خروجی در سیستم PV/JIC و توان PV در حالت بدون سرمایش (حالت مرجع) است. از آنجایی که افت فشار و توان خالص در این سیستم‌ها به شدت به میزان دبی جرمی و قطر نازل‌ها بستگی دارند، بنابراین؛ برای ارزیابی عملکرد سیستم JIC پیشنهادی، مقادیر P_{net} ، P_{pump} و COE برای $N = 24$ ، $H = 5 \text{ mm}$ و در قطرهای (d_n) و دبی‌های جرمی ($\dot{m}$) متفاوت در جدول (۵-۴) ارائه شده است.

¹Coefficient Of Energy

جدول ۴-۵. مقادیر P_{net} , P_{Pump} , $P_{(\text{max}) \text{ increase}}$ و COE برای $H = 5 \text{ mm}$, $N = 24$ در دبی‌های جرمی و d_n های متفاوت

dn= 1mm						
COE	% $P_{(\text{max}) \text{ increase}}$	P_{net} (W)	$P_{\text{PV/JIC}}$ (W)	P_{Pump} (W)	ΔP (Pa)	$\dot{m}$ (kg/s)
۱/۷۶	۷۶/۵۶	۸/۲۰	۸/۲۱	۰/۰۱۲	۵۹۹/۴۵	۰/۰۲
۱/۷۶	۷۸/۷۱	۸/۱۷	۸/۳۱	۰/۱۳۷	۳۰۳۴/۷۱	۰/۰۴۵
۱/۷۰	۸۰/۶۵	۷/۸۸	۸/۴	۰/۵۱۵	۷۳۴۳/۲۴	۰/۰۷
۱/۵۶	۸۳/۲۳	۷/۲۳	۸/۵۲	۱/۲۸۷	۱۳۵۲۵/۰۵	۰/۰۹۵
۱/۲۹	۸۵/۱۶	۶/۰۲	۸/۶۱	۲/۵۹۵	۲۱۵۸۰/۱۴	۰/۱۲
dn= 1.25mm						
COE	% $P_{(\text{max}) \text{ increase}}$	P_{net} (W)	$P_{\text{PV/JIC}}$ (W)	P_{Pump} (W)	ΔP (Pa)	$\dot{m}$ (kg/s)
۱/۶۹	۶۸/۸۲	۷/۸۴۵	۷/۸۵	۰/۰۰۵	۵۹۹/۴۵	۰/۰۲
۱/۶۹	۶۹/۸۹	۷/۸۴	۷/۹	۰/۰۵۶	۳۰۳۴/۷۱	۰/۰۴۵
۱/۶۷	۷۱/۶۱	۷/۷۷	۷/۹۸	۰/۲۱۱	۷۳۴۳/۲۴	۰/۰۷
۱/۶۳	۷۳/۹۸	۷/۵۶	۸/۰۹	۰/۵۲۷	۱۳۵۲۵/۰۵	۰/۰۹۵
۱/۶۱	۸۳/۶۶	۷/۴۸	۸/۵۴	۱/۰۶۳	۲۱۵۸۰/۱۴	۰/۱۲
dn= 1.5mm						
COE	% $P_{(\text{max}) \text{ increase}}$	P_{net} (W)	$P_{\text{PV/JIC}}$ (W)	P_{Pump} (W)	ΔP (Pa)	$\dot{m}$ (kg/s)
۱/۶۸	۷۲/۰۴	۷/۷۹	۷/۷۹	۰/۰۰۳	۱۶۵/۶۹	۰/۰۲
۱/۷۰	۷۳/۷۶	۷/۷۸	۷/۸۲	۰/۰۳۸	۸۳۸/۸۲	۰/۰۴۵
۱/۶۹	۷۵/۴۸	۷/۷۱	۷/۸۶	۰/۱۴۲	۲۰۲۹/۷۳	۰/۰۷
۱/۶۷	۷۸/۹۲	۷/۶۸	۸/۰۴	۰/۳۵۶	۳۷۳۸/۴۳	۰/۰۹۵
۱/۶۲	۸۰/۸۶	۷/۴۲	۸/۱۴	۰/۷۱۷	۵۹۶۴/۹۲	۰/۱۲
dn= 1.75mm						
COE	% $P_{(\text{max}) \text{ increase}}$	P_{net} (W)	$P_{\text{PV/JIC}}$ (W)	P_{Pump} (W)	ΔP (Pa)	$\dot{m}$ (kg/s)
۱/۵۷	۵۶/۷۷	۷/۲۹	۷/۲۹	۰/۰۰۳	۱۴۶/۸۲	۰/۰۲
۱/۵۶	۵۷/۲۰	۷/۲۸	۷/۳۱	۰/۰۳۴	۷۴۳/۲۷	۰/۰۴۵
۱/۵۶	۵۹/۱۴	۷/۲۷	۷/۴۰	۰/۱۲۶	۱۷۹۸/۵۴	۰/۰۷
۱/۵۶	۶۲/۳۷	۷/۲۳	۷/۵۵	۰/۳۱۵	۳۳۱۲/۶۱	۰/۰۹۵
۱/۵۳	۶۶/۲۴	۷/۰۹	۷/۷۳	۰/۶۳۶	۵۲۸۵/۴۹	۰/۱۲
dn= 2mm						
COE	% $P_{(\text{max}) \text{ increase}}$	P_{net} (W)	$P_{\text{PV/JIC}}$ (W)	P_{Pump} (W)	ΔP (Pa)	$\dot{m}$ (kg/s)
۱/۵۳	۵۳/۳۳	۷/۱۳	۷/۱۳	۰/۰۰۲	۸۶/۰۶	۰/۰۲
۱/۵۳	۵۳/۷۶	۷/۱۲	۷/۱۵	۰/۰۲۰	۴۳۵/۶۹	۰/۰۴۵
۱/۵۳	۵۵/۰۵	۷/۱۱	۷/۲۱	۰/۰۷۴	۱۰۵۴/۲۷	۰/۰۷
۱/۵۳	۵۸/۲۸	۷/۱۰	۷/۳۶	۰/۱۸۵	۱۹۴۱/۷۹	۰/۰۹۵
۱/۵۰	۶۱/۵۱	۶/۹۹	۷/۵۱	۰/۳۷۳	۳۰۹۸/۲۶	۰/۱۲

جدول (۴-۵) مقادیر توان مصرفی پمپ را نشان می‌دهد، و با توجه به این جدول می‌توان نتیجه گرفت که توان مصرفی پمپ در مقایسه با توان خروجی ماژول PV که توسط سیستم JIC خنک می‌شود، در تمام دبی‌های جرمی آب ناچیز است. در حقیقت، قدرت خروجی ماژول PV بدون حضور خنک کننده ۴/۶۵ وات است، که به منظور ارزیابی عملکرد سیستم JIC، درصد افزایش توان ماکزیمم ($\%P_{(max)increase}$) نیز بررسی و مقادیر مربوط به آن در جدول (۴-۵) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد در تمام قطرهای نازل، با افزایش دبی جرمی آب، $\%P_{(max)increase}$ روند افزایشی دارد. در واقع، با افزایش دبی جرمی آب مقدار توان تولید شده توسط ماژول PV به علت خنک کاری بیشتر افزایش می‌یابد. با این حال، لازم به ذکر است که با افزایش دبی جرمی آب، P_{pump} زیاد می‌شود، و در نتیجه توان خالص خروجی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است، طبق معادلات ۷-۱۰، با افزایش تعداد نازل، افت فشار و P_{pump} کاهش می‌یابد و از طرف دیگر، مقدار توان خالص P_{net} زیاد می‌شود. همان‌طور که گفته شد، جدول (۴-۵) نتایج مربوط به $N = 24$ را نشان می‌دهد، بنابراین؛ مطمئناً برای تعداد نازل‌های ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ مقدار P_{pump} بسیار بیشتر است و ممکن است P_{net} در بعضی موارد به صفر نزدیک شود. بنابراین، می‌توان گفت که افزایش تعداد نازل نقش بسیار مهمی در این فرآیند دارد. از طرف دیگر، افزایش تعداد نازل‌ها منجر به پخش بهتر آب در پشت ماژول PV می‌شود، اما سرعت جت‌های آب و در نتیجه سرعت انتقال گرما کاهش می‌یابد. بنابراین، با افزایش دبی جرمی آب و کاهش قطر نازل‌ها می‌توان این مشکل را حل کرد. دو ردیف اول جدول (۴-۵) مربوط به قطر نازل ۱ میلی‌متر و ۱/۲۵ میلی‌متر می‌باشد که برای $d_n = 1$ میلی‌متر در $\dot{m} = 0.02, 0.045, 0.07$ کیلوگرم در ثانیه، مقدار P_{net} نسبت به سایر قطرهای نازل بیشتر است اما برای ۰.۱۲، ۰.۰۹۵، ۰.۰۷۵ کیلوگرم در ثانیه، مقدار P_{net} در $d_n = 1.25$ خیلی بیشتر از $d_n = 1$ میلی‌متر است. به طور کلی، می‌توان گفت که بر روی توان خالص خروجی سه پارامتر تاثیر می‌گذارند که این سه پارامتر عبارتند از دبی جرمی آب، تعداد و قطر نازل‌ها. همچنین، نتایج نشان می‌دهد، قطر نازل ۱ و ۱/۲۵ میلی‌متر بهترین عملکرد را دارند. با توجه به نتایج ارائه شده در این پروژه و کارهای مشابه [۳۲]، کاهش d_n یکی از روش‌هایی است که نسبت به روش‌های دیگر ترجیح داده می‌شود، کاهش d_n تاثیر کمتری روی P_{pump} دارد. مقادیر COE نشان داده شده در

جدول (۴-۵) بیشتر از ۱ می‌باشد و این موضوع ثابت می‌کند که سیستم خنک کاری ماژول PV با تعداد ۲۴ عدد نازل از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است.

حداکثر توان تولیدی ماژول PV بدون خنک کاری حدود ۴/۵ وات بوده، در حالی که برای حالت استفاده از سیستم خنک کاری جت برخوردی، نزدیک به ۹ وات است که به معنای افزایش چشمگیر توان خروجی می‌باشد. با توجه به هزینه برق مصرفی پمپ و افزایش توان تولیدی ۸۰ وات در روز توسط ماژول PV، حدود ۲/۵ کیلو وات در ماه، برق تولید می‌شود که ۱/۲۰ کیلو وات آن مصرف شده و در نهایت حدود ۱/۳۰ کیلو وات توان خالص حاصل می‌گردد که با توجه به قیمت پایه متوسط به ازای هر کیلو وات ساعت ۶۰۰ ریال حدوداً یک صد هزار تومان توان اضافی در ماه تولید می‌گردد. با توجه به اینکه که میزان توان تولیدی پنل‌ها به اندازه آنها و راندمان پنل مربوط می‌شود. به طوری که به ازای یک ساعت تابش بر ۱۰ متر مربع ۱ کیلو وات برق تولید می‌شود و با فرض ۱۰ ساعت تابش در روز حدوداً ۳۰۰ کیلو وات ساعت، برق ماهیانه حاصل می‌گردد. پس میتوان با استفاده از پنل‌های بزرگ و با کیفیت و راندمان بالا مقدار قابل توجهی برق تولید کرد، که به ازای برق مصرفی پمپ متناظر با آن، بسیار به صرفه خواهد بود.

۵-۲-۴ بهینه سازی

در فرآیند ایجاد خنک کاری توسط ماژول PV در سیستم JIC، برای بهینه سازی چهار متغیر عددی، آزمایش-های متفاوتی طراحی شده است. برای دما و توان خروجی ماژول PV در معادلات چند جمله ای، بر هم کنش-های چهار عاملی به عنوان پاسخ در نظر گرفته شده است. کیفیت پاسخ‌ها با تجزیه و تحلیل ANOVA بررسی شده است و نتایج نشان می‌دهد که این متغیرها برای افزایش عملکرد ماژول PV مهم هستند. مرحله بهینه سازی بعد از آنالیزهای لازم و کافی و تایید تناسب مدل انجام می‌گردد. در این مرحله وقتی که حد متغیرها، ماکزیمم - مینیمم یا حد خواسته شده پاسخ‌ها مشخص شد، نرم افزار، مقادیر بهینه پارامترهای مستقل را پیشنهاد و توصیه میکند. می‌بایست جهت راستی آزمایی، آزمایش‌ها در هندسه و شرایط بهینه انجام و تکرار شده و با مقادیر بدست آمده از مدل مقایسه شود. در این مرحله حد پیش بینی شده، حد تolerانس و محدوده اطمینان برای پاسخ‌ها کاملاً مشخص می‌باشد. خود نرم افزار به عنوان پیش فرض ۳ بار تکرار را برای هر آزمایش دارد که می‌توان تا ۶ بار آن را افزایش داد. در این تحقیق، آزمایش‌ها در نقطه بهینه ۳ بار تکرار شد. به این صورت که بعد از انجام هر آزمایش مقادیر بدست آمده (خروجی)، وارد می‌شود. میانگین مقادیر بدست آمده از تکرارها باید در محدوده پیش بینی قرار گیرد و اگر در این محدوده تعریف شده از سوی نرم افزار نباشد به رنگ قرمز درآمده و بهینه سازی تایید نمی‌شود در این صورت باید تعداد تکرارها را افزایش داد، ۴ الی ۶ بار، که در نهایت ما را به آن حد مجاز رسانده و بهینه سازی تایید می‌گردد. همچنین در مرحله بهینه سازی اعتبار سنجی یافته‌ها و نقاط بهینه انجام می‌گیرد و مقدار درصد خطا (ADD%) که حاصل تفاضل مقادیر واقعی و مدل، تقسیم بر مقادیر واقعی هست، برای همه مقادیر دمای میانگین سطح و توان خروجی ماژول بدست می‌آید. در تحقیق انجام شده مقدار درصد خطا کمتر از ۷ درصد بود که نشان دهنده اعتبار مدل می‌باشد. شرایط بهینه شده برای دما و توان خروجی که در قسمت بهینه سازی عددی در RSM به دست آمده‌اند، قابل قبول هستند. گروه هدف، محدوده بالا و پایین متغیرها و پاسخ‌ها، به همراه مقادیر مطلوب متغیرها و پاسخ‌ها در جدول (۴-۶) ارائه شده‌اند. بهینه سازی عددی با هدف به حداکثر رساندن توان خروجی و به حداقل رساندن دمای سطح ماژول

PV انجام می شود، و همان طور که قابل مشاهده است، چهار متغیر مورد نظر در محدوده های تعریف شده قرار دارند. همان گونه که قابل مشاهده می باشد، بین پاسخ های حاصل داده های جمع آوری شده از بهینه سازی ($T_{s,av}$ و توان خروجی)، سازگاری وجود دارد. نتایج به دست آمده از بهینه سازی نشان می دهد که دمای میانگین سطح (Y_1 یا $T_{s,av}$) در محدوده $33.68-34.35$ درجه سانتیگراد و توان خروجی (Y_2 یا P) در محدوده $8.61-8.8$ وات تغییر می کنند. ضریب مطلوبیت در فرمول سازی برابر است با ۱ محاسبه شده است، و این مقدار در سیستم PV / JIC به معنای درست بودن پاسخ ها است. پاسخ های بهینه شده برای دما و توان خروجی برابر با $T_{s,av}=33.680$ درجه سانتیگراد و $P_{PV}=8.610$ وات می باشند، که این مقادیر در $\dot{m} = 0.12$ کیلوگرم بر ثانیه، $N = 24$ ، $d_n = 1.08$ میلی متر و $H = 5.1$ میلی متر اتفاق می افتد. اگر در ساخت نازل هایی با قطر مطلوب محدودیتی وجود داشته باشد ($d_n = 1.08$ mm)، می توان از نازل هایی با قطر ۱ میلی متر استفاده کرد، اما تعداد نازل ها باید بیشتر در نظر گرفته شود ($N > 24$) و میزان دبی جرمی آب نیز برابر با مقدار بهینه شده، تنظیم شود.

جدول ۴-۶. محدودیت های بهینه سازی، مقادیر بهینه شده ی متغیرها و پاسخ های پیش بینی شده در نقطه بهینه

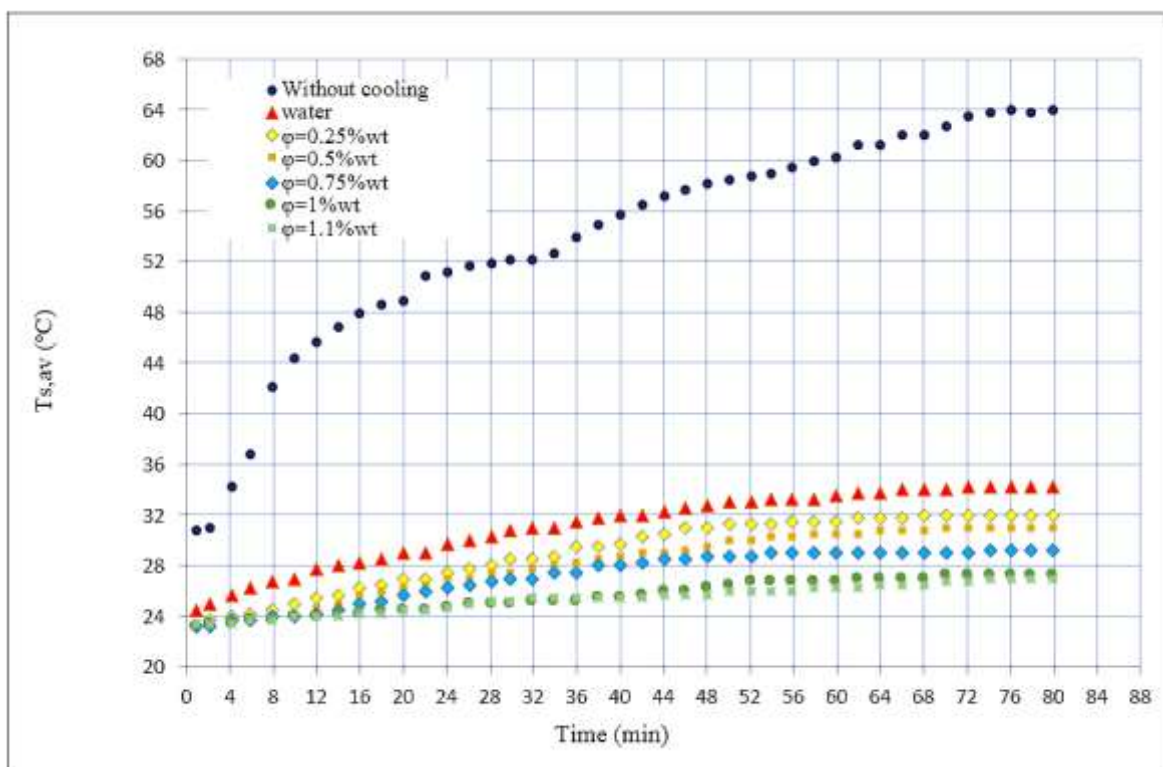
متغیرها و پاسخ ها	هدف	مقادیر بهینه	محدوده ی بالا	محدوده ی پایین
فاصله جت تا هدف H (mm)	در محدوده	۵/۱	۵۵	۵
تعداد نازل ها	در محدوده	۲۴	۲۴	۸
دبی جرمی (kg/s)	در محدوده	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۰۲
قطر نازل ها	در محدوده	۱/۰۸	۲	۱
دمای میانگین سطح ($^{\circ}C$)	مینیمم	۳۳/۶۸	۵۰	۳۴/۴
توان (W)	ماکزیمم	۸/۶۱	۸/۶۱	۶/۱

۴-۳ نتایج استفاده از نانو سیال به عنوان سیال خنک کننده

۴-۳-۱ داده‌های تجربی برای توزیع دما در ماژول PV

۴-۳-۱-۱ توزیع دما

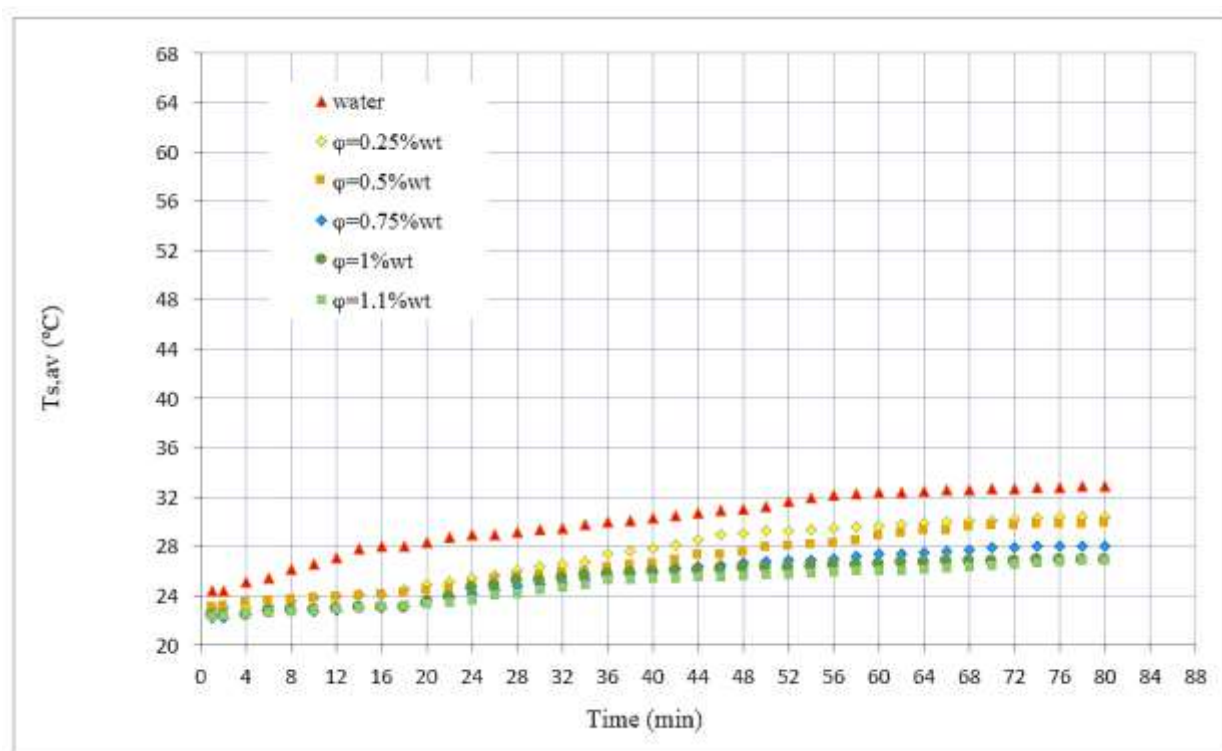
توزیع دما یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که در این بخش بررسی شده است. شکل (۴-۹) تغییرات دمای متوسط سطح ماژول با زمان را برای حالت بدون خنک کننده و هم‌چنین خنک‌کاری با آب و نانو سیال با ۵ غلظت مختلف نشان می‌دهد. داده‌های این شکل با استفاده از نازل‌های تک سوراخه در دبی ثابت برابر kg/s و شدت تشعشع ثابت برابر 1000 W/m^2 بدست آمده است. همان‌طور که واضح است در حالت بدون خنک کننده $T_{s,av}$ حدودا 64°C است، در حالی که، $T_{s,av}$ در حالت خنک‌کاری با جت آب بعد از رسیدن به حالت پایا به حدودا $34/4^\circ\text{C}$ کاهش پیدا کرده است. با افزودن نانو ذرات SiC با غلظت $0/25 \text{ wt.}$ به آب، دمای سطح ماژول حدودا $2/4^\circ\text{C}$ کاهش پیدا کرده است و به حدود 32°C رسیده است. با افزایش غلظت نانوسیال از $0/25 \text{ wt.}$ به $0/5$ ، $0/75$ و 1 wt. کاهش قابل توجه مشاهده شده است. در حالی که، با افزایش غلظت نانوسیال از 1 wt. به $1/1 \text{ wt.}$ میزان تغییرات دمای متوسط ماژول قابل توجه نیست و تفاوت چندانی بین این دو حالت مشاهده نشده است.



شکل ۴-۹. تاثیر استفاده از جت نانو سیال با نازل های تک سوراخه بر تغییرات $T_{s,av}$ نسبت به زمان
 $(H = 5.1 \text{ mm}, d = 1.08 \text{ mm}, G = 1000 \text{ W/m}^2, \dot{m} = 0.12 \text{ kg/s})$

شکل (۴-۱۰) تغییرات دمای متوسط سطح ماژول با زمان را برای خنک کاری با آب و نانو سیال با ۵ غلظت مختلف برای استفاده از نازل های چند سوراخه نشان می دهد. داده های این شکل در دبی ثابت برابر 0.12 kg/s و شدت تشعشع ثابت برابر 1000 W/m^2 بدست آمده است. همان طور که واضح است $T_{s,av}$ در حالت خنک کاری با جت آب با استفاده از نازل های چند سوراخه، بعد از رسیدن به حالت پایا به حدودا $32/8^\circ \text{C}$ کاهش پیدا کرده است. با افزودن نانو ذرات SiC با غلظت $0.25 \text{ wt}\%$ به آب، دمای سطح ماژول حدودا $2/3^\circ \text{C}$ کاهش پیدا کرده است و به حدود $30/5^\circ \text{C}$ رسیده است. با افزایش غلظت نانوسیال از 0.25 به 0.5 ، 0.75 ، و $1 \text{ wt}\%$ کاهش قابل توجه دمای ماژول مشاهده شده است. در حالی که، در این حالت نیز مشابه شکل (۴-۹)، با افزایش غلظت نانو سیال از $1 \text{ wt}\%$ به $1/1 \text{ wt}\%$ میزان تغییرات دمای متوسط ماژول قابل توجه نیست و تفاوت چندانی بین این دو حالت مشاهده نشده است. مقایسه شکل (۴-۹) و (۴-۱۰) نشان می دهد که استفاده از نازل های چند سوراخه

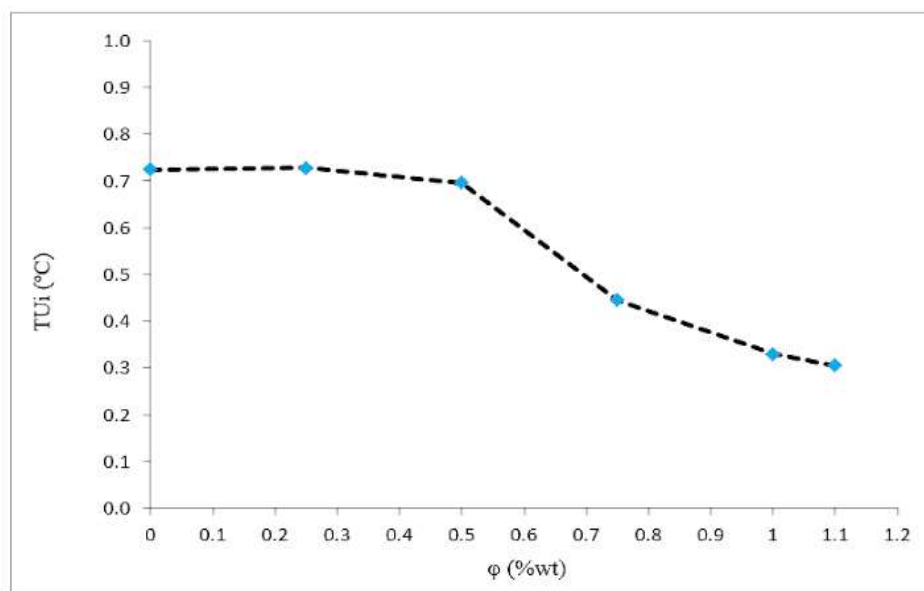
اثر چشم‌گیرتری در کاهش دما نسبت به نازل‌های تک سوراخه داشته است. این مسئله می‌تواند به دلیل افزایش نقاط خنک‌کاری شده روی سطح پستی ماژول فتوولتائیک باشد. از طرفی می‌توان با بررسی شاخص یکنواختی دما (TUi) در مورد این‌که آیا استفاده از نازل با تعداد سوراخ‌های بیشتر و در نتیجه تعداد جت‌های بیشتر منجر به توزیع یکنواخت‌تر دما می‌شود یا نه، بحث کرد. هم‌چنین، می‌دانیم که افزایش تعداد سوراخ‌های هر نازل، در واقع به معنای افزایش تعداد جت‌های برخوردی سیال است، بنابراین باید دبی مناسب را پیدا کرد، زیرا افزایش تعداد سوراخ‌های هر نازل به دلیل تقسیم سیال، منجر به کاهش سرعت هر جت برخوردی به پشت نازل خواهد شد. لذا، در ادامه نیاز است در مورد استفاده از جت آب و نانو سیال با نازل‌های چند سوراخه، دبی مناسب و بهینه را بدست آورد.



شکل ۴-۱۰. تاثیر استفاده از جت نانوسیال با نازل‌های چند سوراخه بر تغییرات $T_{s,av}$ نسبت به زمان
 $(H = 5.1 \text{ mm}, d = 1.08 \text{ mm}, G = 1000 \text{ W/m}^2, \dot{m} = 0.12 \text{ kg/s})$

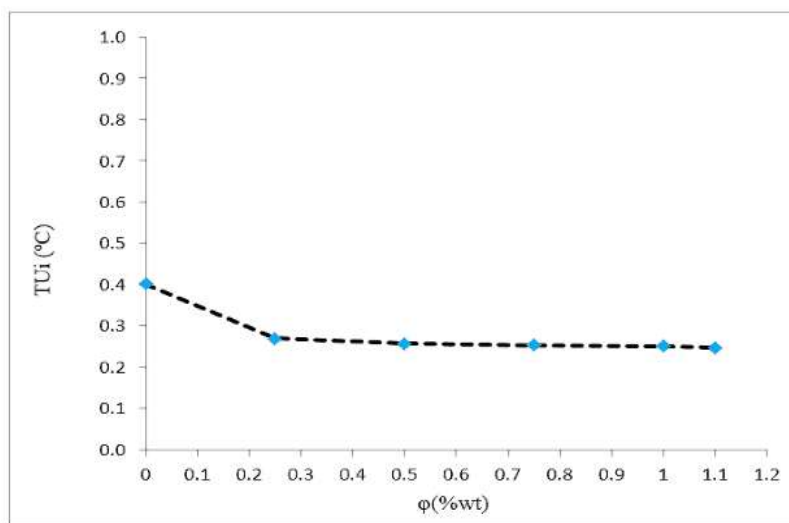
۴-۳-۱-۲ شاخص یکنواختی دما (TU_i)

از آنجایی که هدف اصلی مطالعه حاضر تهیه یک سیستم خنک کننده معتبر است، مشخصات توزیع یکنواخت دما برای کل ماژول PV یک فاکتور مهم است. از این رو، تغییرات TU_i ، برای ارزیابی انحراف توزیع دمای سطح ماژول PV در دبی‌های مختلف جریان سیال بررسی شده است. در واقع، یکنواختی دما به وضوح کارایی خنک کننده مطلوب پیشنهادی را نشان می‌دهد. شکل (۴-۱۱) تغییرات TU_i ۱۲ ناحیه کوچک روی سطح پشتی ماژول با غلظت نانو سیال را برای استفاده از نازل‌های تک سوراخه نشان می‌دهد. در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است که با افزایش غلظت نانوسیال، TU_i در حال کاهش بوده که به معنای توزیع یکنواخت‌تر دما به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو سیال و افزایش میزان انتقال حرارت از سطح ماژول به جت برخوردی و خنک کاری بیشتر است. همچنین، در این شکل مشاهده شده است که مقدار TU_i برای غلظت ۱ و ۱/۱ درصد وزنی نانوسیال بسیار نزدیک است.



شکل ۴-۱۱. اثر استفاده از جت نانوسیال با نازل‌های تک سوراخ بر روی TU_i
 $(H = 5.1 \text{ mm} \text{ , } d = 1.08 \text{ mm} \text{ , } G = 1000 \text{ W/m}^2 \text{ , } \dot{m} = 0.12 \text{ kg/s})$

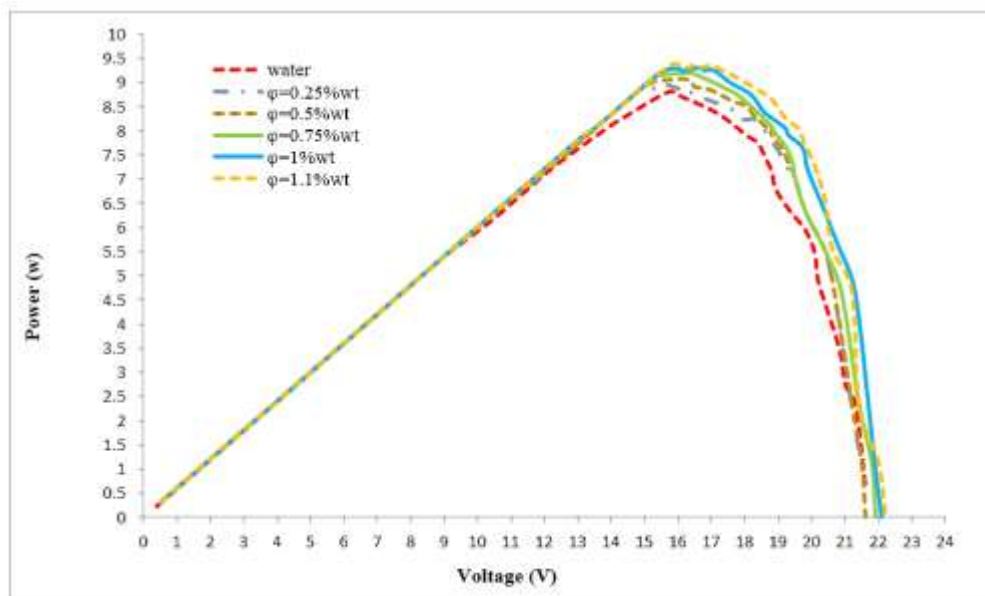
شکل (۱۲-۴) تغییرات TU_i ۱۲ ناحیه کوچک روی سطح پستی ماژول با غلظت نانوسیال برای استفاده از نازل- های چند سوراخه را نشان می‌دهد. در شکل (۱۲-۴) نشان داده شده است که در حالت استفاده از آب خالص به عنوان سیال خنک کن ($\phi = 0\%wt$)، مقدار TU_i حدوداً 0.4 بوده که با افزودن 0.25% درصد وزنی نانو ذرات SiC به آب، میزان TU_i حدوداً به 0.27 رسیده که کاهش چشم‌گیری است. با افزایش غلظت نانو سیال از 0.25% درصد وزنی به 0.5 تا 1.1 درصد وزنی، مقدار TU_i تقریباً روند کاهشی بسیار خفیفی را طی کرده که به معنای این است که استفاده از نازل‌های چند سوراخه با شرایط ذکر شده در شکل (۱۲-۴) و نانو سیال با غلظت 0.25% درصد وزنی، توانایی خوبی برای توزیع یکنواخت دما دارد و افزودن غلظت نانوسیال بیشتر از 0.5% درصد تاثیر زیادی روی TU_i نخواهد داشت. مقایسه شکل‌های (۱۱-۴) و (۱۲-۴) نشان می‌دهد که در هر پنج مقدار ϕ ، استفاده از نازل‌های چند سوراخه، مقادیر TU_i بسیار کمتر از نازل‌های تک سوراخه است. این نشان می‌دهد که یکنواختی دمای بالاتر توسط نازل‌های چند سوراخه حاصل می‌شود.



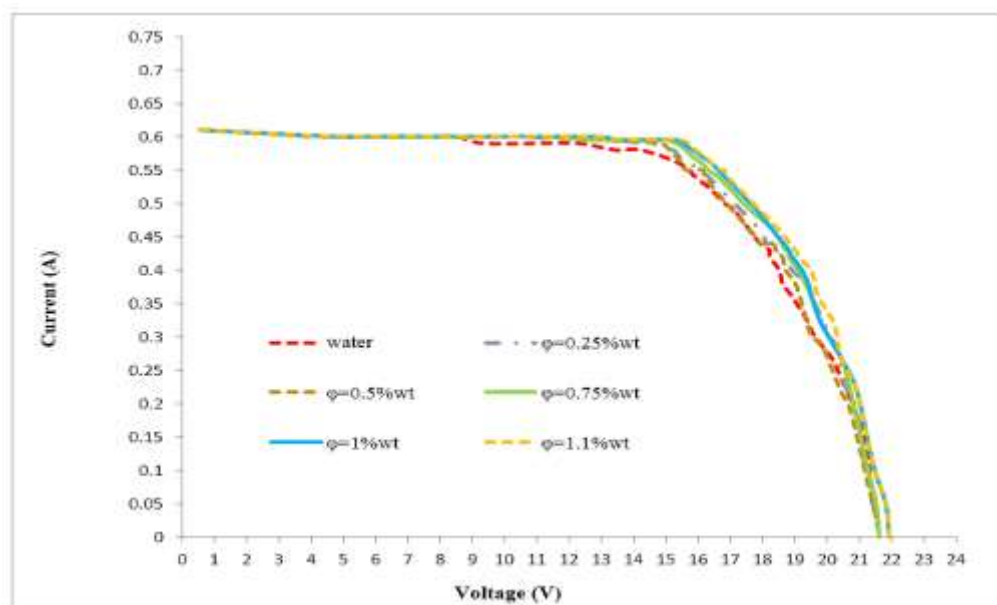
شکل ۴- ۱۲. اثر استفاده از جت نانوسیال با نازل‌های چند سوراخ بر روی TU_i
 ($H = 5.1 \text{ mm}$ ، $d = 1.08 \text{ mm}$ ، $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ، $\dot{m} = 0.12 \text{ kg/s}$)

۲-۳-۴ خروجی الکتریکی مازول PV

به منظور بررسی تاثیرات سیستم‌های خنک‌کای پیشنهادی بر میزان تولید برق توسط مازول PV، ابتدا تغییرات دما و توان خروجی آن با استفاده از آب خالص ارزیابی شده است. پس از آن، داده‌های I-V حاصل از آزمایشات برای پنج دبی جرمی مختلف جریان جمع‌آوری شد. داده‌های P-V و V-I به دست آمده پس از رسیدن به حالت پایدار (۸۰ دقیقه) برای آب و استفاده از نانو سیال SiC در دبی ثابت آب و نانو سیال و در $d_n = 1.08 \text{ mm}$ و $H = 5.1 \text{ mm}$ در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده است. توان تولید شده توسط مازول PV که با سیستم جت برخوردی با نازل‌های تک سوراخه خنک می‌شود، به عنوان تابعی از ولتاژ در شکل (۴-۱۳ الف) رسم شده است. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شود، با افزایش ϕ ، مقدار توان تولیدی نیز افزایش یافته است، که این موضوع با داده‌های موجود در شکل (۴-۱۱) که نشان‌دهنده کاهش دمای سطح مازول در اثر افزایش ϕ است، تطابق دارد. شکل (۴-۱۳ ب)) نیز نمودار جریان-ولتاژ را برای استفاده از آب خالص و نانو سیال با غلظت‌های مختلف برای خنک‌کاری مازول را نشان می‌دهد.



(الف)

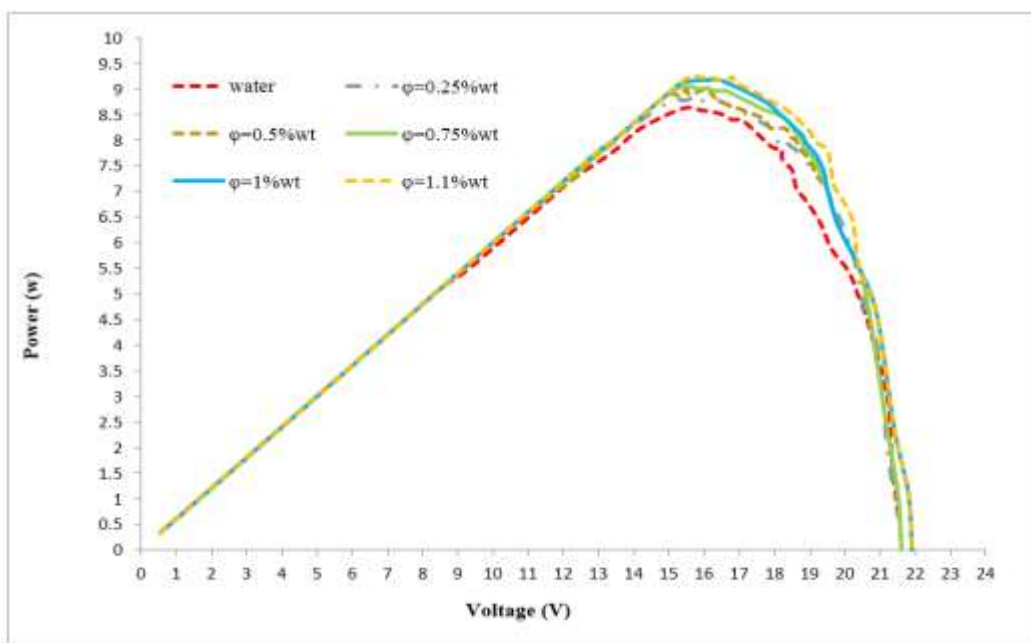


(ب)

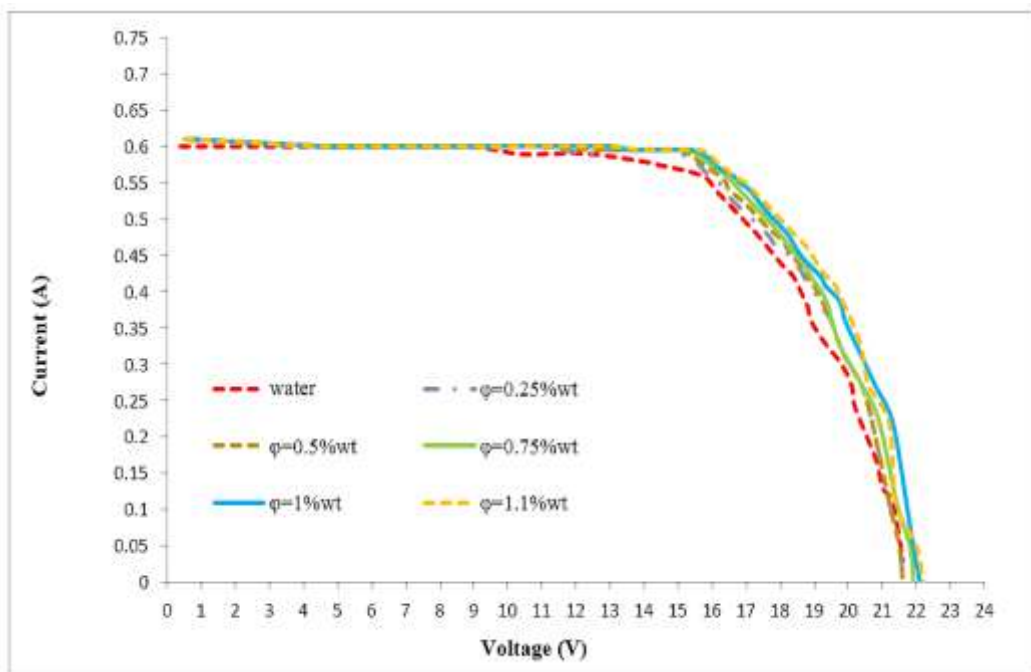
شکل ۴- ۱۳. تاثیر غلظت نانوسیال بر مشخصه های (الف) ولتاژ- توان و (ب) جریان-ولتاژ مازول PV برای برخورد جت نازل های تک سوراخه ($H = 5.1 \text{ mm}$, $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $d = 1.08 \text{ mm}$, $\dot{m} = 0.12 \text{ kg/s}$).

توان تولید شده و نمودار جریان-ولتاژ ماژول PV که با سیستم جت برخوردی با نازل‌های چند سوراخه خنک کاری می‌شود، در شکل (۴-۱۴) رسم شده است. همان‌طور که پیش‌بینی شده است، با افزایش تعداد سوراخ‌های نازل‌ها به دلیل یکنواختی دمای سطح ماژول و جلوگیری از ایجاد نقاط خیلی داغ، مقدار توان تولیدی نیز افزایش یافته است، که این موضوع با داده‌های موجود در شکل (۴-۱۲) که نشان‌دهنده کاهش دمای سطح ماژول با افزایش تعداد جت‌های برخوردی سیال است، تطابق دارد. شکل (۴-۱۴ (ب)) نیز نمودار جریان-ولتاژ را برای استفاده از آب خالص و نانو سیال با غلظت‌های مختلف برای خنک‌کاری ماژول با نازل‌های چند سوراخه نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً ذکر شده است، سطح زیر منحنی I-V برابر با میزان توان تولیدی ماژول فتوولتائیک است، که این سطح با افزایش غلظت نانو سیال افزایش یافته است. قابل ذکر است که افزایش غلظت نانو سیال از ۱ به ۱/۱ درصد وزنی تاثیر چشم‌گیری بر افزایش توان تولیدی نداشته است.

شکل (۴-۱۵) تغییرات توان تولیدی ماژول با تغییرات شدت تابش (G) را برای نازل‌های تک سوراخه و چند سوراخه در دبی ثابت برابر 0.12 kg/s نشان می‌دهد. از نتایج نشان داده شده می‌توان دریافت که توان تولیدی ماژول PV مستقیماً با شدت تابش متناسب است، و با افزایش G میزان توان تولیدی نیز افزایش می‌یابد. مقایسه شکل (۴-۱۵ (الف)) و (۴-۱۵ (ب)) نشان می‌دهد که استفاده از نازل‌های چند سوراخه به دلیل ایجاد یکنواختی در دمای سطح ماژول و جلوگیری از ایجاد نقاط خیلی داغ روی آن، مقدار توان تولیدی را در مقایسه با نازل‌های تک سوراخه به طور چشم‌گیری افزایش داده است، که با داده‌های موجود در شکل‌های (۴-۱۳) و (۴-۱۴) تطابق دارد. به طور کلی، نشان داده شده است که توان تولیدی ماژول با استفاده از نانو سیال به عنوان سیال خنک‌کن در غلظت $\phi=1.1\%wt$ ، شدت تابش برابر 1000 W/m^2 و جت برخوردی پیشنهادی با نازل‌های چند سوراخه بالاترین مقدار خود را دارد. بنابراین این حالت به عنوان کارآمدترین حالت و برای خنک‌کاری با جت برخوردی سیال پیشنهاد شده است.

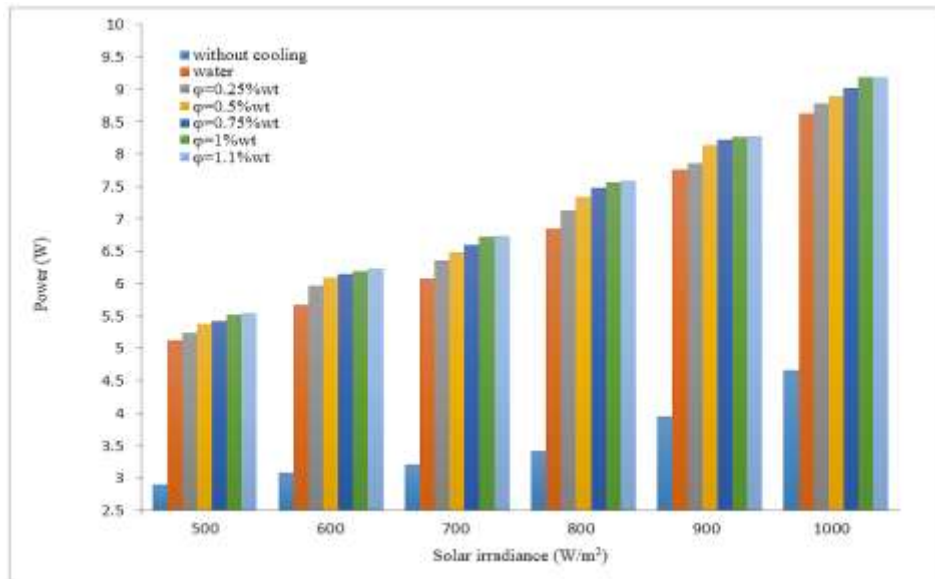


(الف)

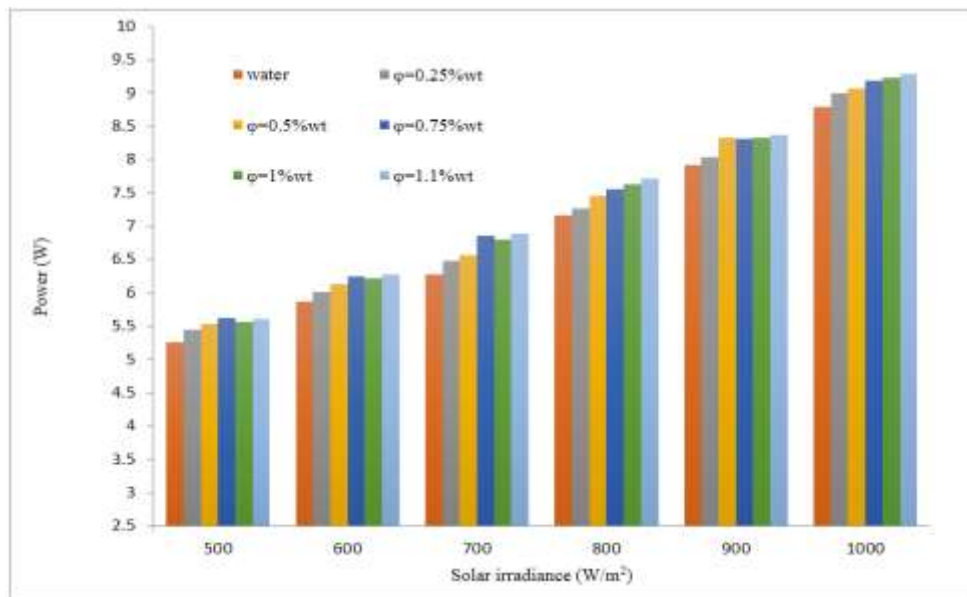


(ب)

شکل ۴-۱۴. تاثیر غلظت نانوسیال بر مشخصه های (الف) ولتاژ- توان و (ب) جریان-ولتاژ ماژول PV برای برخورد
جت نازل های ۸ سوراخه ($H = 5.1 \text{ mm}$, $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $d = 1.08 \text{ mm}$, $\dot{m} = 0.12 \text{ kg/s}$).



(الف)



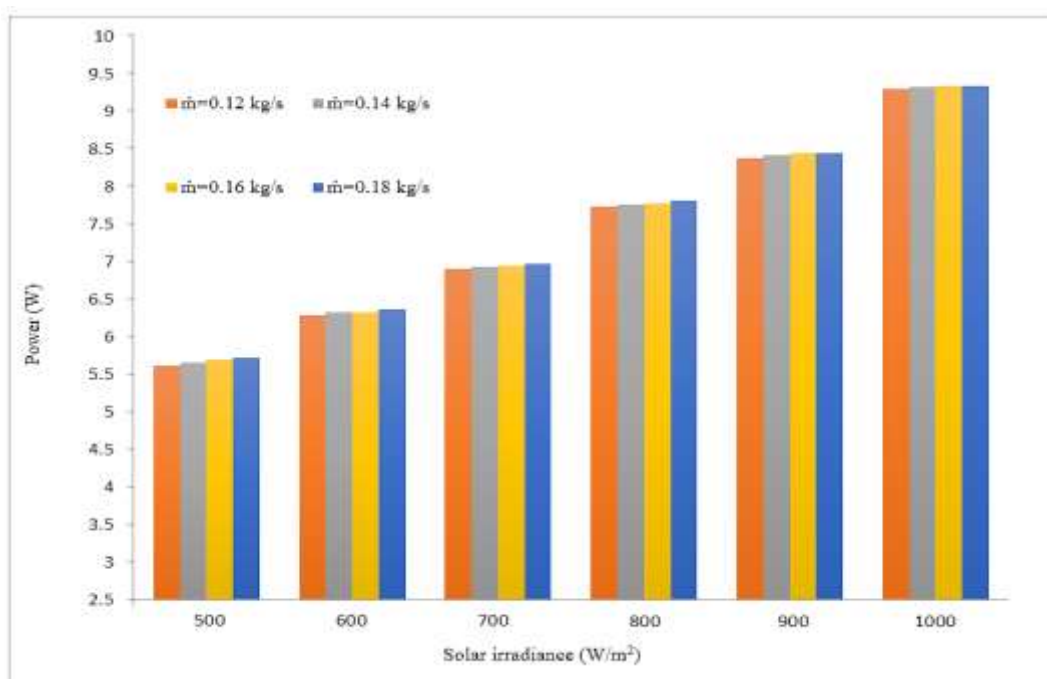
(ب)

شکل ۴-۱۵. تاثیر شدت تشعشع بر مشخصه های توان تولیدی ماژول برای (الف) برخورد جت نازل های تک سوراخه و (ب) برخورد جت نازل های ۸ سوراخه ($H = 5.1 \text{ mm}$, $d = 1.08 \text{ mm}$, $\dot{m} = 0.12 \text{ kg/s}$).

۳-۳-۴ بهینه سازی

همان طور که قبلا ذکر شد، افزایش تعداد سوراخ های هر نازل، در واقع، به معنای افزایش تعداد جت های برخوردی سیال است، بنابراین باید دبی مناسب سیال ورودی را پیدا کرد. زیرا، افزایش تعداد سوراخ های هر نازل

به دلیل تقسیم سیال ورودی، منجر به کاهش سرعت هر جت برخوردی به پشت نازل خواهد شد. لذا، در ادامه نیاز است در مورد استفاده از جت نانو سیال با نازل‌های چند سوراخه، دبی مناسب و بهینه را بدست آورد. شکل (۱۶-۴) تغییرات توان تولیدی ماژول PV با شدت تابش در چهار دبی مختلف نانو سیال با غلظت $\phi=1.1\%wt$ را نشان می‌دهد. نتایج نشان داده است که توان تولیدی ماژول PV با دبی جرمی نانو سیال در تمام سطوح تابش خورشید رابطه مستقیم دارد. اما همان‌طور که مشاهده شده است، در شدت تابش برابر 1000 W/m^2 ، توان تولیدی برای دبی جرمی نانو سیال بالاتر از 0.14 kg/s ثابت مانده که به معنای مناسب و کافی بودن این دبی برای خنک کاری ماژول است.



شکل ۴-۱۶. تاثیر دبی جریان بر توان تولیدی ماژول برای برخورد جت نازل‌های ۸ سوراخه
 $(H = 5.1 \text{ mm}, d = 1.08 \text{ mm}, \phi = 1.1\%wt)$

جدول (۴-۷) مقادیر افت فشار توان مصرفی پمپ و در نهایت ضریب COE را نشان می‌دهد. توان پمپاژ (توان مصرفی پمپ) به عنوان تابعی از دبی جریان نانو سیال و افت فشار با رابطه داده می‌شود:

$$P_{\text{pump}} = Q_{nf} \cdot \Delta P \quad (4-12)$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{\rho_{nf} Q_{nf}^2}{\left(\frac{\pi}{4} d_n^2 \cdot N \cdot n \cdot C_d \right)^2} \quad (4-13)$$

که در آن nf نشان دهنده نانو سیال و n نشان دهنده تعداد سوراخ‌های هر نازل است. همچنین، ΔP افت فشار، ρ دانسیته سیال، Q دبی حجمی جریان، N تعداد نازل‌ها، C_d ضریب تخلیه نازل و d_n قطر نازل است. P_{net} ، $P_{(max)increase}$ % و COE با استفاده از روابط بخش قبل محاسبه خواهند شد.

از جدول (4-7) می‌توان دریافت که در دبی‌های جرمی نانو سیال برابر ۰/۰۲ تا ۰/۱۸ kg/s، توان مصرفی پمپ در مقایسه با توان خروجی مازول PV که توسط سیستم جت برخوردی با نازل‌های چند سوراخه خنک می‌شود، ناچیز است. اما با افزایش دبی جرمی از ۰/۱۴ kg/s به ۰/۱۶ kg/s و بالاتر، میزان توان مصرفی پمپ افزایش ناچیزی داشته است. برای دبی ۰/۱۸ kg/s که بالاترین مقدار دبی نانو سیال بررسی شده در این پژوهش است، مقدار توان تولیدی خالص (P_{net}) برابر ۹/۱۹ وات است. درحالی‌که، برای دبی ۰/۱۴ kg/s میزان توان خالص تولیدی بالاترین مقدار را دارد و برابر ۹/۲۶ وات است. همچنین، این جدول نشان می‌دهد که برای تمامی دبی‌های جرمی نانو سیال برابر ۰/۰۲ تا ۰/۱۲ kg/s، مقادیر COE بالاتر از ۱ بوده، که این موضوع نشان دهنده‌ی این است که سیستم خنک‌کننده پیشنهادی با این محدوده از دبی نانو سیال مقرون به صرفه است. با افزایش دبی جرمی بیشتر از ۰/۱۴ kg/s، مقدار COE، درصد افزایش توان ($P_{(max)increase}$ %) و توان خالص تولیدی ثابت مانده است. بنابراین، می‌توان گفت که دبی جرمی نانوسیال بیشتر از ۰/۱۴ kg/s، توصیه نمی‌شود. در مقایسه با نتایج استفاده از نازل تک سوراخه در بخش قبل، مشاهده شده است که افت فشار به دلیل افزایش تعداد جت-های خروجی کاهش چشم‌گیری داشته است. از طرف دیگر، افزایش تعداد سوراخ‌های نازل‌ها، بدون آن‌که منجر به کاهش قابل توجه سرعت جت‌های برخوردی و در نتیجه سرعت انتقال گرما شود، منجر به توزیع بهتر نانو سیال در پشت مازول PV شده است.

جدول ۴-۷. مقادیر P_{net} ، P_{Pump} و ضریب COE برای استفاده از جت برخوردی با نازل های چند سوراخه

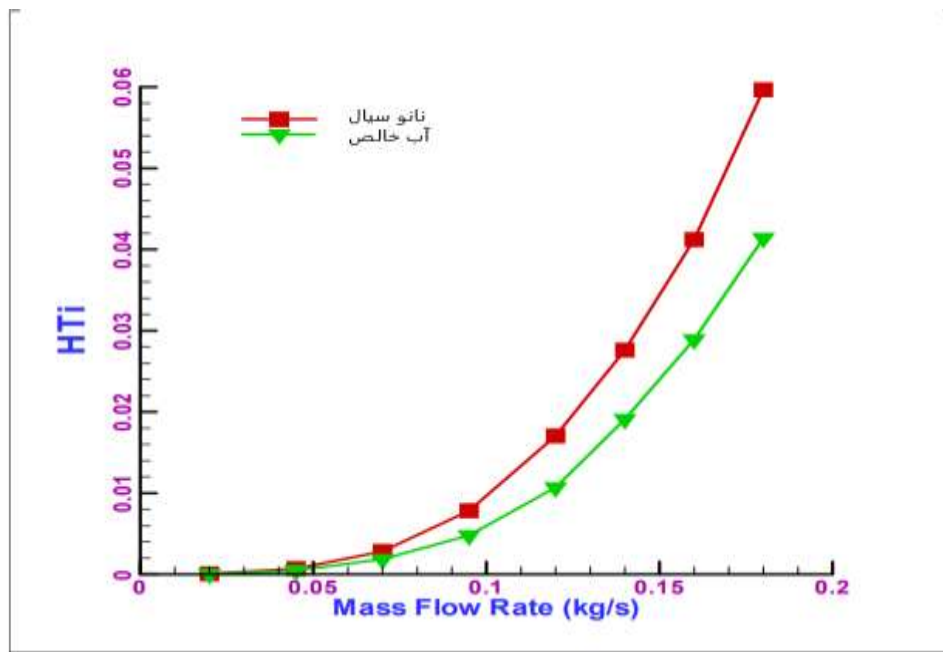
COE	% $P_{(\text{max})\text{increase}}$	P_{net} (W)	$P_{\text{PV/JIC}}$ (W)	P_{Pump} (W)	ΔP (Pa)	$\dot{m}$ (kg/s)
۱/۸۱	۸۰/۸۶	۸/۴۱	۸/۴۱	۰/۰۰۰	۹/۳۷	۰/۰۲
۱/۸۳	۸۳/۴۴	۸/۵۳	۸/۵۳	۰/۰۰۲	۴۷/۴۲	۰/۰۴۵
۱/۸۷	۸۶/۸۸	۸/۶۸	۸/۶۹	۰/۰۰۸	۱۱۴/۷۴	۰/۰۷
۱/۸۹	۸۹/۶۸	۸/۸۰	۸/۸۲	۰/۰۲۰	۲۱۱/۳۳	۰/۰۹۵
۱/۹۹	۹۹/۷۸	۹/۲۵	۹/۲۹	۰/۰۴۱	۳۳۷/۱۹	۰/۱۲
۱/۹۹	۱۰۰/۴۳	۹/۲۶	۹/۳۲	۰/۰۶۴	۴۵۸/۹۵	۰/۱۴
۱/۹۹	۱۰۰/۶۵	۹/۲۳	۹/۳۳	۰/۰۹۶	۵۹۹/۴۵	۰/۱۶
۱/۹۸	۱۰۰/۶۵	۹/۱۹	۹/۳۳	۰/۱۳۷	۷۵۸/۶۸	۰/۱۸

به منظور بررسی عملکردهای هیدرودینامیکی، حرارتی و الکتریکی سیستم PV/جت برخوردی، پارامترهای زیر یعنی شاخص هیدرودینامیکی-گرمایی (HTi) و شاخص گرمایی-الکتریکی (ETi) به شرح زیر تعریف شده است:

$$HT_i = \frac{Q \cdot \Delta P}{\left(\frac{k_{nf} \cdot A_t}{H}\right) TU_i} \quad (۱۴-۴)$$

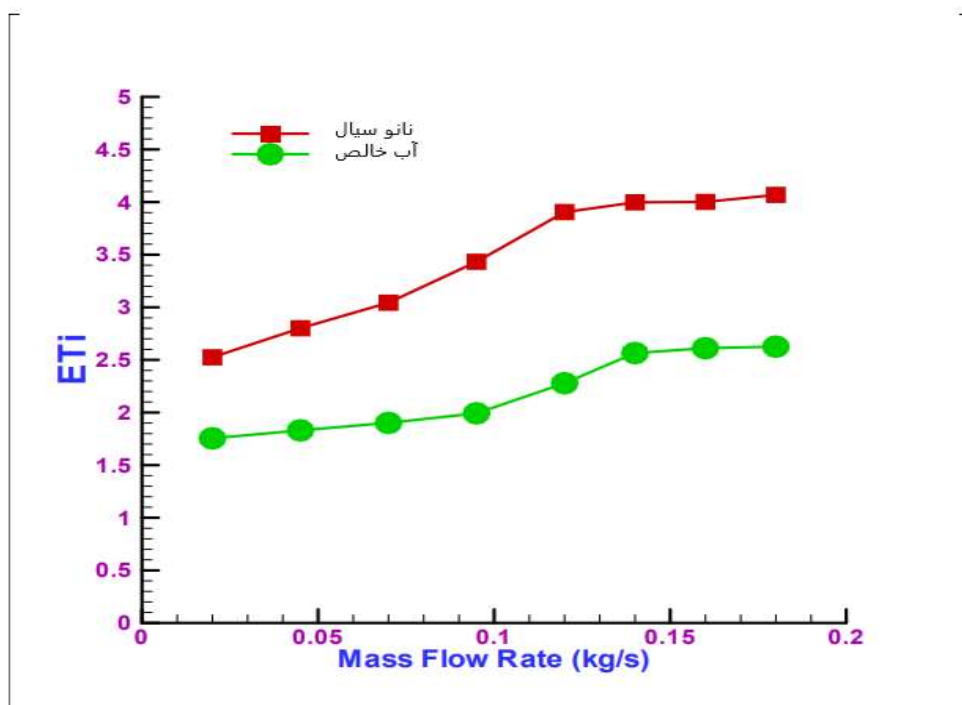
$$ET_i = \frac{P_{PV}}{\left(\frac{k_{nf} \cdot A_t}{H}\right) TU_i} \quad (۱۵-۴)$$

شکل (۴-۱۷) تغییرات HTi با دبی آب و نانوسیال با غلظت $\phi=1.1\%wt$ برای سیستم جت خنک کن با نازل های چند سوراخه را نشان می دهد. همان طور که مشخص است برای هر دو سیال خنک کن، با افزایش دبی، میزان HTi افزایش یافته که به معنای بهبود عملکرد هیدرودینامیکی و حرارتی سیستم جت برخوردی پیشنهادی برای خنک کاری ماژول فتوولتائیک است. مقایسه دو منحنی نشان می دهد که استفاده از نانوسیال SiC منجر به HTi بیشتر و در نتیجه بهبود عملکرد سیستم مذکور شده است.



شکل ۴- ۱۷. HTi برای آب و نانوسیال $\phi = 1.1\%$ با نازل های چند سوراخه.

شکل (۴-۱۸) تغییرات ETi با دبی آب و نانوسیال با غلظت $\phi = 1.1\%$ برای سیستم جت خنک کن با نازل های چند سوراخه را نشان می دهد. با افزایش دبی از ۰.۰۲ تا ۰.۱۴ kg/s مقدار ETi افزایش یافته و از دبی ۰.۱۴ kg/s تا ۰.۱۸ kg/s مقدار آن ثابت است. افزایش میزان ETi به معنای بهبود عملکرد الکتریکی یا افزایش توان تولیدی ماژول با خنک کاری توسط سیستم جت برخوردی مذکور است.



(ب)

شکل ۴-۱۸. ETi برای آب و نانوسیال $\phi = 1.1 \text{ wt\%}$ با نازل های چند سوراخه.

فصل ۵ : جمع بندی و پیشنهادات

۱-۵ جمع بندی

در این پروژه، اثرات منفی افزایش دمای ماژول‌های PV با استفاده از سیستم خنک کننده با ایجاد ضربه توسط جت (JIC) مورد تحقیق قرار گرفته است، و تاثیر پارامترهای ساخت جت بر عملکرد حرارتی یک ماژول خورشیدی PV نیز بررسی شده است. در این پروژه، در ابتدا از آب خالص به عنوان سیال خنک کننده استفاده شده است، و سپس، نانو سیال SiC برای ایجاد خنک کاری به کار برده شده است. پنج شماتیک متفاوت از سیستم JIC با آب به عنوان سیال خنک کن برای دستیابی به توزیع یکنواخت دما در ماژول PV ارائه شده است. آزمایشات با قطرهای مختلف نازل، دبی‌های جرمی متفاوت آب، تعداد نازل‌های متنوع و ایجاد تغییر در فاصله نازل از سطح پشتی ماژول PV انجام شده است. در ابتدا، یکنواختی توزیع دما، توان خروجی و خصوصیات شدت جریان-ولتاژ ماژول PV با سیستمی که در آن خنک کاری صورت نمی‌گیرد، مقایسه شده است. نتایج نشان داده است که در دمای محلی ماژول PV یک کاهش قابل قبول اتفاق افتاده است، و یکنواختی دمای آن با استفاده از سیستم پیشنهادی JIC بیشتر شده است. اندازه گیری دما و توان ماژول PV نشان می‌دهد که دما و توان به ترتیب برای سیستم خنک نشده به ترتیب $63/95$ درجه سانتیگراد و $5/90$ وات است. با استفاده از JIC و سیال آب، دمای متوسط ماژول به $43/3$ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد و توان تولیدی برای بدترین شرایط به $6/58$ وات می‌رسد. توان خروجی ماژول PV با افزایش دبی جرمی و تعداد نازل افزایش و برعکس، با افزایش فاصله نازل از ماژول PV و قطر نازل، کاهش می‌یابد. همچنین، در این پروژه، از روش RSM برای بدست آوردن هندسه بهینه نازل‌ها و سایر پارامترهای اصلی استفاده شده است. پاسخ‌های پیش بینی شده (دما و توان خروجی) در ناحیه ثابت بهینه $33/68$ درجه سانتیگراد و $8/610$ وات در $\dot{m} = 0.12 \text{ kg/s}$ ، $N = 24$ ، $d_n =$ ، $H = 5.1 \text{ mm}$ و 1.08 mm می‌باشند. نتایج RSM نشان می‌دهد که سیستم JIC با پارامترهای بهینه نه تنها قدرت الکتریکی خروجی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد، بلکه باعث کاهش دمای ماژول PV می‌شود، در حالی که برای هر سلول این دما را یکنواخت نگه می‌دارد.

پس از استفاده از آب به عنوان سیال خنک کننده و به دست آوردن نتایج بالا، استفاده از نانو سیال SiC و سیستم جت برخوردی برای خنک کردن ماژول PV و افزایش توان تولیدی آن، همچنین اثر استفاده از نازل تک سوراخه و چند سوراخه در آرایه‌های جت برخوردی بر عملکرد الکتریکی و حرارتی ماژول PV مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که استفاده از نازل‌های چند سوراخه اثر چشم‌گیرتری در کاهش دمای ماژول PV نسبت به نازل‌های تک سوراخه دارد. این مسئله می‌تواند به دلیل افزایش نقاط خنک کاری شده روی سطح پشتی ماژول فتوولتائیک باشد. از طرفی، مشاهده شده است که با افزایش غلظت نانو سیال، شاخص یکنواختی دما در حال کاهش بوده که به معنای توزیع یکنواخت‌تر دمای سطح ماژول به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو سیال و افزایش میزان انتقال حرارت از سطح ماژول به جت برخوردی و خنک‌کاری بیشتر است. همچنین، مشاهده شده است که استفاده از جت برخوردی با نازل چند سوراخه، در حالت استفاده از آب خالص به عنوان سیال خنک کن ($\phi=0\%wt$)، مقدار شاخص یکنواختی دما حدوداً 0.4% بوده که با افزودن 0.25% درصد وزنی نانو ذرات SiC به آب، مقدار آن حدوداً به 0.27% رسیده است. با افزایش غلظت نانو سیال از 0.25% درصد وزنی به 0.5% تا $1/1$ درصد وزنی، مقدار شاخص یکنواختی دما تقریباً روند کاهشی بسیار خفیفی را طی کرده که به معنای این است که استفاده از نازل‌های چند سوراخه و نانو سیال با غلظت 0.25% درصد وزنی، توانایی خوبی برای توزیع یکنواخت دما دارد. در هر پنج مقدار ϕ ، استفاده از نازل‌های چند سوراخه، مقادیر شاخص یکنواختی دمای بسیار کمتری نسبت به نازل‌های تک سوراخه دارد. این نشان می‌دهد که یکنواختی دمای بالاتری توسط نازل‌های چند سوراخه حاصل شده است. توان تولید شده و نمودار جریان-ولتاژ ماژول PV که با سیستم جت برخوردی با نازل‌های تک سوراخه و چند سوراخه نیز خنک‌کاری می‌شود، در این قسمت بررسی شده است. با افزایش تعداد سوراخ‌های نازل‌ها به دلیل یکنواختی دمای سطح ماژول و جلوگیری از ایجاد نقاط خیلی داغ، مقدار توان تولیدی نیز افزایش یافته است که با داده‌های مربوط، کاهش دمای سطح ماژول با افزایش تعداد جت‌های برخوردی سیال، مطابق است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، سطح زیر منحنی I-V برابر با میزان توان تولیدی ماژول فتوولتائیک است. بررسی این موضوع نشان داده است که این سطح با افزایش غلظت

نانو سیال افزایش یافته است. قابل ذکر است که افزایش غلظت نانو سیال از ۱ به ۱/۱ درصد وزنی تاثیر چشم-گیری روی افزایش توان تولیدی نداشته است. از طرفی، توان تولیدی ماژول PV مستقیماً با شدت تابش متناسب است و با افزایش آن، میزان توان تولیدی نیز افزایش یافته است. به طور کلی، می توان گفت که توان تولیدی ماژول با استفاده از نانو سیال به عنوان سیال خنک کن در غلظت $\phi=1.1\%wt$ ، شدت تابش برابر 1000 W/m^2 و جت برخوردی پیشنهادی با نازل های چند سوراخه، بالاترین مقدار خود را دارد. بنابراین این حالت به عنوان کارآمدترین حالت و برای خنک کاری با جت برخوردی سیال پیشنهاد می شود. تغییرات توان تولیدی ماژول PV با شدت تابش در چهار دبی مختلف نانو سیال با غلظت $\phi=1.1\%wt$ نشان داده است که توان تولیدی با دبی جرمی نانو سیال در تمام سطوح تابش خورشید رابطه مستقیم دارد. در شدت تابش برابر $1000 W/m^2$ ، توان تولیدی برای دبی جرمی نانو سیال بالاتر از $0.14 kg/s$ ثابت مانده که به معنای مناسب و کافی بودن این دبی برای خنک کاری ماژول با سیستم جت برخوردی با نازل های چند سوراخه است.

با توجه به اینکه ماژول فتوولتائیک بررسی شده در این پژوهش دارای ابعاد مناسبی حتی برای کاربردهای واقعی است، بنابراین می توان از سیستم پیشنهادی با موازی کردن تعداد مورد نیاز از آن، استفاده کرد. البته، برای کاربردهای صنعتی می توان از پنل های با ابعاد بزرگتر و افزایش مقیاس روش خنک کاری پیشنهاد شده استفاده کرد. در واقع سیستم PV/JIC را می توان به یک مقیاس مورد نظر بزرگتر کرده و برای کاربردهای صنعتی از آن استفاده کرد. با توجه به اینکه شدت تابش خورشید در ایران در محدوده $400-800 W/m^2$ است بنابراین با توجه به اینکه شدت تابش خورشید بررسی شده در این پژوهش نیز در همین محدوده ($400-1000 W/m^2$) است، سیستم پیشنهادی را می توان برای اکثر شهرهای ایران به کار برد.

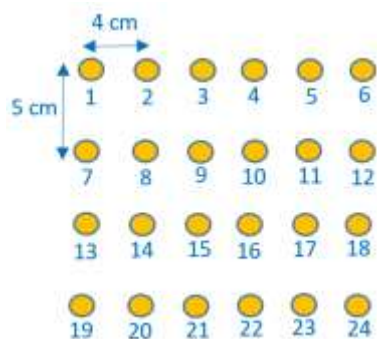
۵-۲ پیشنهادات

سیستم JIC طراحی شده می‌تواند در تنظیم حرارتی و افزایش عملکرد کلی ماژول PV مفید باشد. این تحقیق چالش‌های بیشتری را برای استفاده کارآمدتر از سیستم JIC در یک سیستم خورشیدی PV برای دستیابی به توزیع یکنواخت دما روشن کرده است. برای پی بردن به طرح‌های پیشنهادی خنک کننده جت، تحقیقات بیشتر باید بر اساس دیدگاه اقتصادی انجام شود. ضمن اینکه می‌توان بهینه سازی چگونگی آرایش جت ها (حلزونی، ضربدری و...)، زاویه برخورد جت ها به صفحه هدف، شکل سطح مقطع جت های برخوردی و استفاده از نوع دیگری از جت ها (جت نوسانی) و میزان تاثیرشان در خنک کاری صفحات خورشیدی را مورد بررسی قرار داد علاوه بر این، برای کارهای آینده در این زمینه، باید بهینه سازی سیستم برخورد جت در خنک کردن ماژول‌های PV با استفاده از سیال کاری رساناتر مانند نانوسیال متفاوت ترکیب شود. به طور کلی می‌توان گفت که بهتر است تا حد ممکن از سرعت جریان مایع بالا و تعداد بیشتری از نازل استفاده کرد.

پیوست ها

پیوست ۱

روش محاسبه S_{ave} و L_{ave} برای دسته نازل ها با چیدمان متفاوت
۱- برای دسته نازل های ۲۴ تایی چیدمان زیر را خواهیم داشت:



برای نازل های ۱، ۶، ۱۹ و ۲۴:

$$S_{ave} = \frac{4+5}{2} = 4.5 \text{ cm}$$

برای نازل های ۷، ۱۲، ۱۳ و ۱۸:

$$S_{ave} = \frac{5+5+4}{3} = 4.667 \text{ cm}$$

برای نازل های ۲، ۳، ۴، ۵، ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳:

$$S_{ave} = \frac{4+4+5}{3} = 4.333 \text{ cm}$$

برای نازل های ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷:

$$S_{ave} = \frac{4+4+5+5}{4} = 4.5 \text{ cm}$$

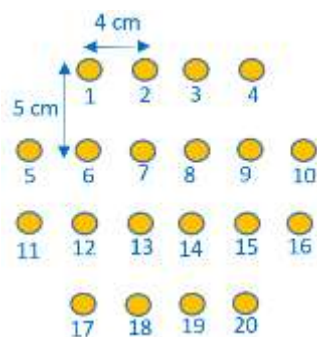
مقدار S_{ave} برای مجموعه ۲۴ تایی به صورت زیر خواهد بود:

$$S_{ave, N=24} = \frac{4(4.5) + 4(4.667) + 8(4.333) + 8(4.5)}{24} = 4.471 \text{ cm}$$

بنابراین L_{ave} برای مجموعه ۲۴ تایی به صورت زیر خواهد بود:

$$S_{ave, N=24} = \frac{L_{ave, N=24}}{\sqrt{N}} \Rightarrow L_{ave, N=24} = 4.471 \times \sqrt{24} = 21.9 \text{ cm}$$

۲- برای دسته نازل های ۲۰ تایی چیدمان زیر را خواهیم داشت:



برای نازل های ۱، ۴، ۵، ۱۰، ۱۱، ۱۶، ۱۷ و ۲۰:

$$S_{ave} = \frac{4+5}{2} = 4.5 \text{ cm}$$

برای نازل های ۲، ۳، ۱۸ و ۱۹:

$$S_{ave} = \frac{4+5+4}{3} = 4.333 \text{ cm}$$

برای نازل های ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵:

$$S_{ave} = \frac{4+4+5+5}{4} = 4.5 \text{ cm}$$

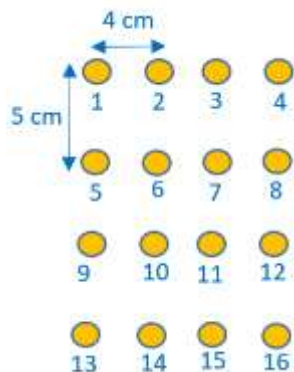
مقدار S_{ave} برای مجموعه ۲۰ تایی به صورت زیر خواهد بود:

$$S_{ave, N=20} = \frac{8(4.5) + 4(4.333) + 8(4.5)}{20} = 4.466 \text{ cm}$$

بنابراین L_{ave} برای مجموعه ۲۰ تایی به صورت زیر خواهد بود:

$$S_{ave, N=20} = \frac{L_{ave, N=20}}{\sqrt{N}} \Rightarrow L_{ave, N=20} = 4.466 \times \sqrt{20} = 19.97 \text{ cm}$$

۳- برای دسته نازل های ۱۶ تایی چیدمان زیر را خواهیم داشت:



برای نازل های ۱، ۴، ۱۳ و ۱۶:

$$S_{ave} = \frac{4+5}{2} = 4.5 \text{ cm}$$

برای نازل های ۲، ۳، ۱۴ و ۱۵:

$$S_{ave} = \frac{4+5+4}{3} = 4.333 \text{ cm}$$

برای نازل های ۵، ۸، ۹ و ۱۲:

$$S_{ave} = \frac{4+5+5}{3} = 4.667 \text{ cm}$$

برای نازل های ۶، ۷، ۱۰ و ۱۱:

$$S_{ave} = \frac{4+4+5+5}{4} = 4.5 \text{ cm}$$

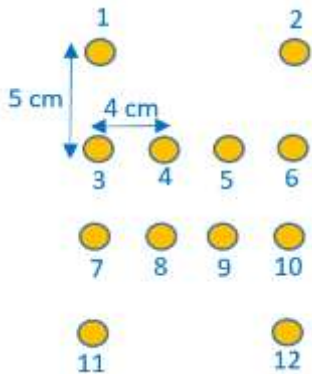
مقدار S_{ave} برای مجموعه ۱۶ تایی به صورت زیر خواهد بود:

$$S_{ave, N=16} = \frac{4(4.5) + 4(4.333) + 4(4.667) + 8(4.5)}{16} = 4.499 \text{ cm}$$

بنابراین L_{ave} برای مجموعه ۱۶ تایی به صورت زیر خواهد بود:

$$S_{ave, N=16} = \frac{L_{ave, N=16}}{\sqrt{N}} \Rightarrow L_{ave, N=16} = 4.499 \times \sqrt{16} = 17.996 \text{ cm}$$

۴- برای دسته نازل های ۱۲ تایی چیدمان زیر را خواهیم داشت:



برای نازل های ۱، ۲، ۱۱ و ۱۲:

$$S_{ave} = 5 \text{ cm}$$

برای نازل های ۳، ۶، ۷ و ۱۰:

$$S_{ave} = \frac{5+5+4}{3} = 4.667 \text{ cm}$$

برای نازل های ۴، ۵، ۸ و ۹:

$$S_{ave} = \frac{4+4+5}{3} = 4.333 \text{ cm}$$

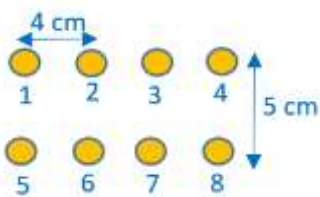
مقدار S_{ave} برای مجموعه ۱۲ تایی به صورت زیر خواهد بود:

$$S_{ave, N=12} = \frac{4(5) + 4(4.667) + 4(4.333)}{12} = 4.667 \text{ cm}$$

بنابراین L_{ave} برای مجموعه ۱۲ تایی به صورت زیر خواهد بود:

$$S_{ave, N=12} = \frac{L_{ave, N=12}}{\sqrt{N}} \Rightarrow L_{ave, N=12} = 4.667 \times \sqrt{12} = 16.166 \text{ cm}$$

۵- برای دسته نازل های ۸ تایی چیدمان زیر را خواهیم داشت:



برای نازل های ۱، ۴، ۵ و ۸:

$$S_{ave} = \frac{4+5}{2} = 4.5 \text{ cm}$$

برای نازل های ۲، ۳، ۶ و ۷:

$$S_{ave} = \frac{5+4+4}{3} = 4.333 \text{ cm}$$

مقدار S_{ave} برای مجموعه ۸ تایی به صورت زیر خواهد بود:

$$S_{ave, N=8} = \frac{4(4.5) + 4(4.333)}{8} = 4.415 \text{ cm}$$

بنابراین L_{ave} برای مجموعه ۸ تایی به صورت زیر خواهد بود:

$$S_{ave, N=8} = \frac{L_{ave, N=8}}{\sqrt{N}} \Rightarrow L_{ave, N=8} = 4.415 \times \sqrt{8} = 12.481 \text{ cm}$$

پیوست ۲

محاسبه عدد ناسلت برای خنک کاری با آب

$$h_{ave} = \frac{q''}{(T_{s,ave} - T_f)} \quad (1)$$

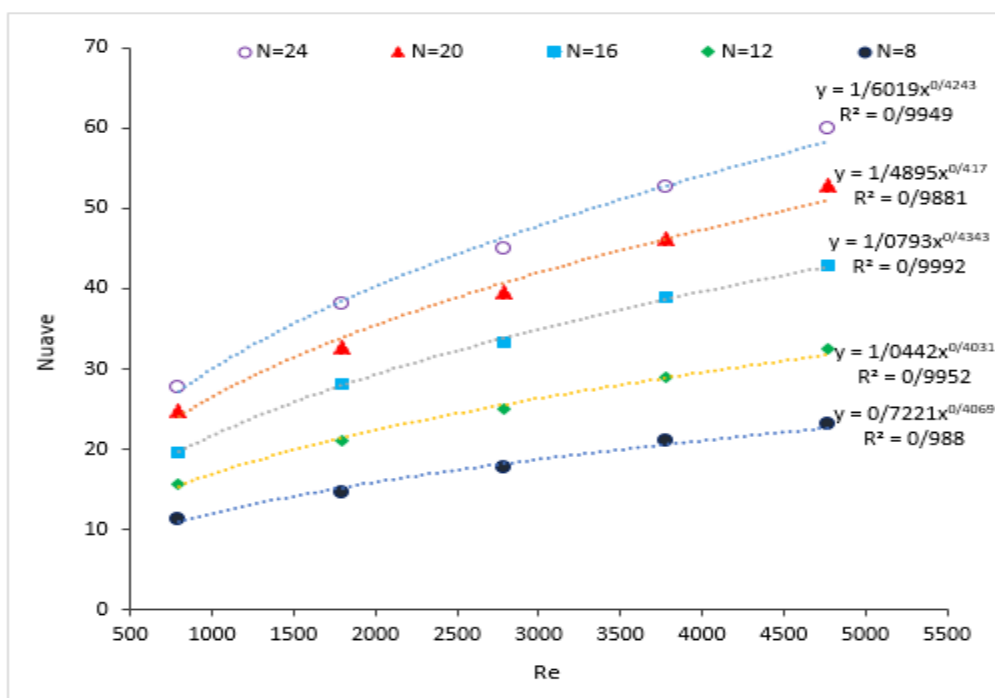
$$Nu_{ave} = \frac{hL_{ave}}{k_f} \quad (2)$$

$$L_{ave} = S_{ave} \cdot \sqrt{N} \quad (3)$$

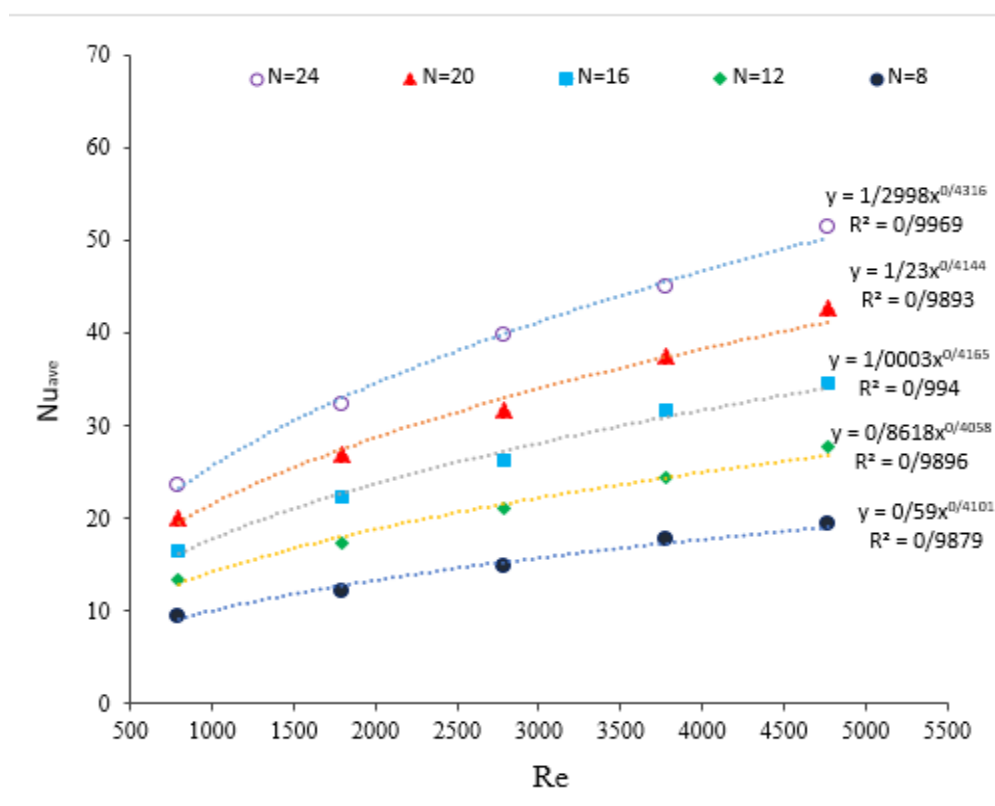
با بدست آوردن مقادیر ناسلت متوسط می توان برای آن رابطه ای براساس عدد رینولدز و پرانتل نوشت. مقدار متوسط عدد ناسلت برای دسته های جت سیال به صورت زیر است [109]:

$$Nu_{ave} = C Re^m Pr^n \quad (4)$$

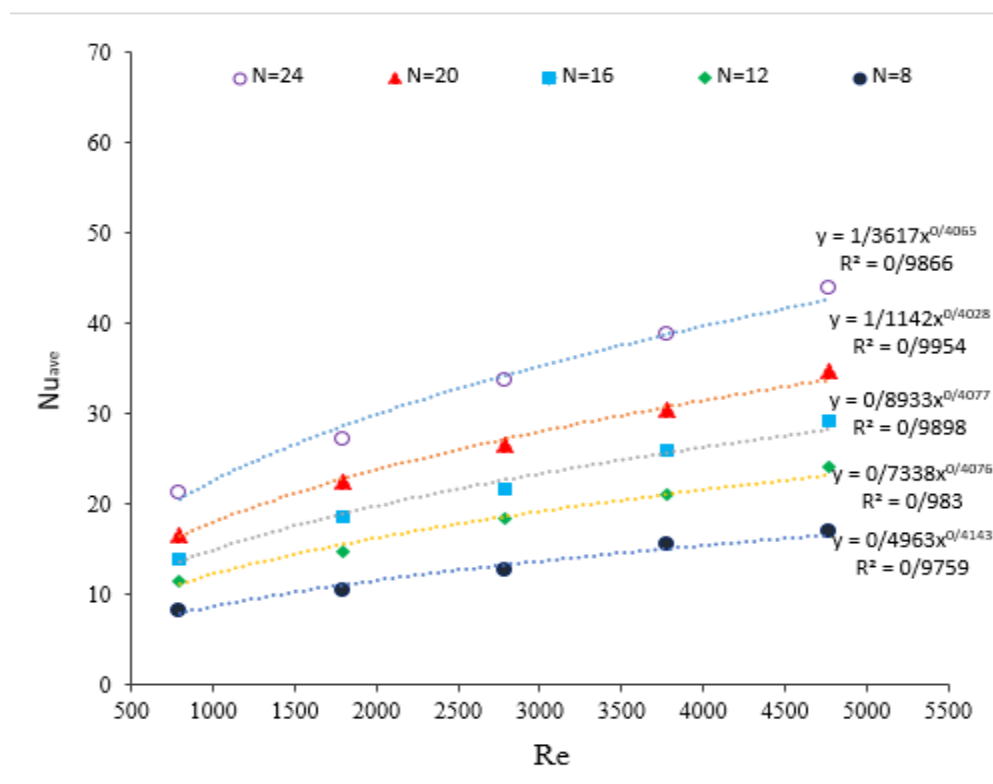
مقدار n را می توان مطابق با مراجع [109] برابر 0.444 فرض کرد. مقدار عدد پرانتل برای آب حدود $6/9136$ است. لذا با ترسیم نمودار Nu_{ave} بر حسب Re و فیت کردن نمودار توانی برای آن، می توان m و همچنین ضریب $C(6.913)^{0.444}$ را بدست آورد که در نهایت C بدست خواهد آمد. نمودارهای موجود در شکل های ۱ تا ۵ برای عدد ناسلت بر حسب رینولدز به صورت زیر ترسیم شده است:



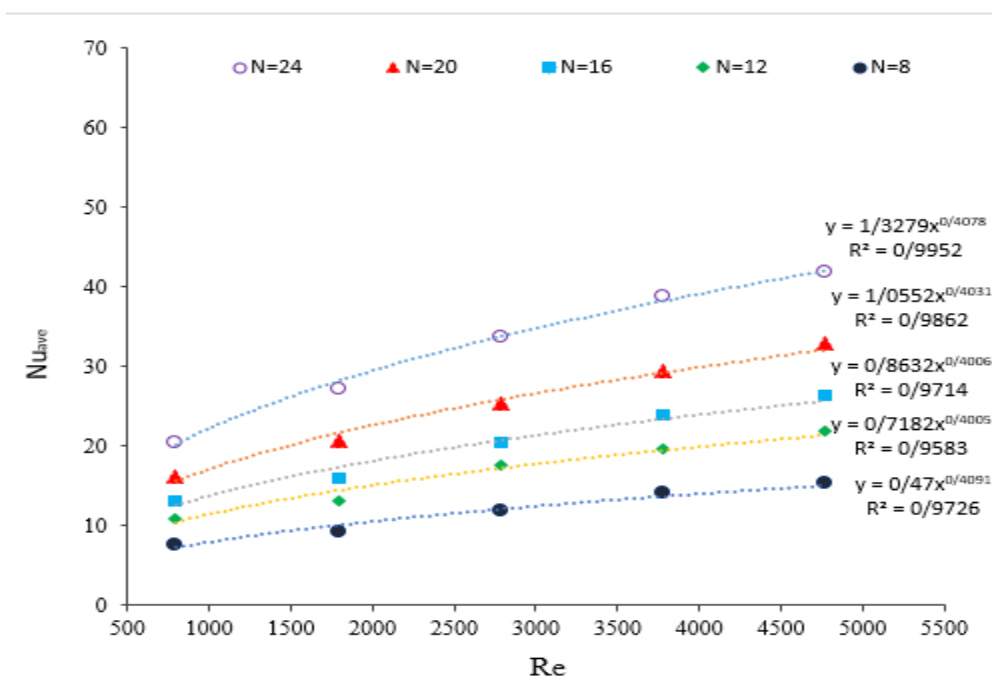
H=5 mm (الف)



H=17.5 mm (ب)



H=30 mm (ج)

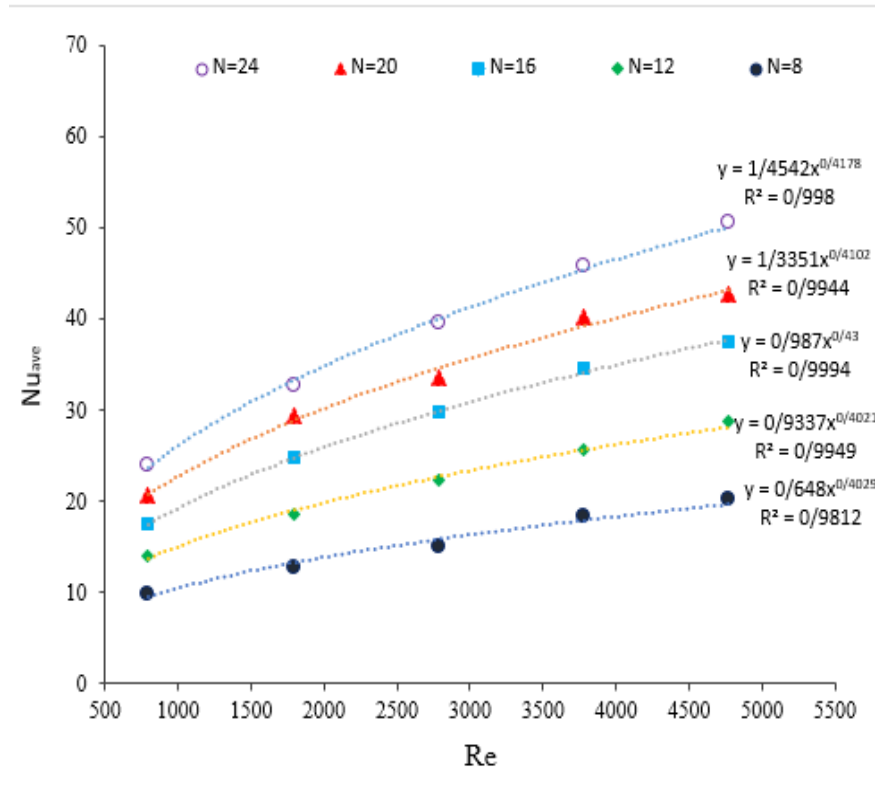


H=55 mm (د)

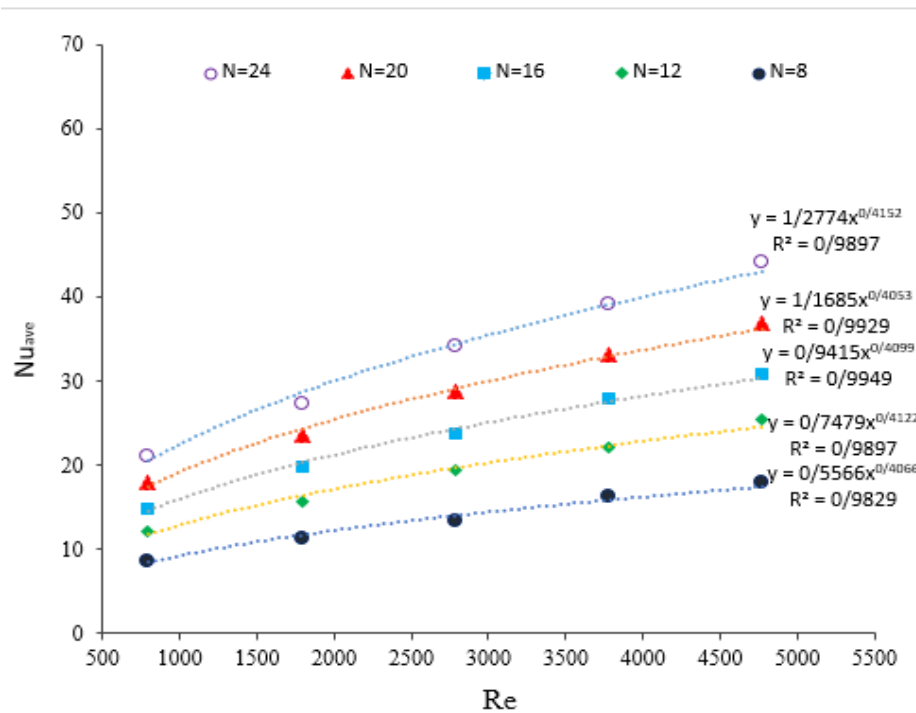
شکل ۱: مقدار عدد ناسلت بر حسب رینولدز برای ارتفاع های مختلف (H) و قطر نازل ($dn = 1 \text{ mm}$).

شکل (۱) مقدار عدد ناسلت بر حسب رینولدز برای ارتفاع های مختلف وقطر نازل برابر $d_n=1\text{ mm}$ را نشان می دهد. این شکل (الف-د) نشان می دهد که عدد ناسلت با افزایش تعداد نازل ها، افزایش یافته است. همچنین، مقایسه بین (الف) تا (د) شکل (۱) نشان می دهد که با افزایش فاصله نازل ها از ماژول PV، (H) مقدار ناسلت کاهش یافته است که به معنای کاهش خنک کاری ماژول توسط جت سیال است و این نتایج در قسمت بررسی دمای سطح و توان خروجی ماژول تایید شده است.

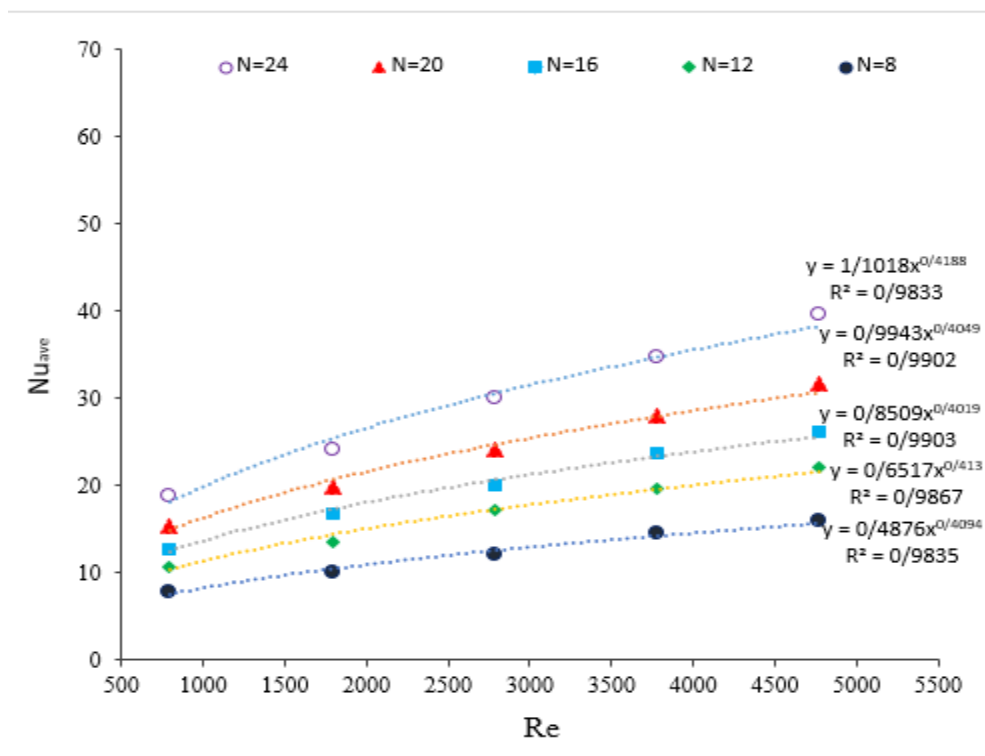
در این نمودارها، در واقع y همان Nu_{ave} و x همان عدد Re است که این معادله روی داده های موجود فیت شده و نمودار توانی بدست آمده است. با توجه به شکل (۱) مقادیر مختلف و خیلی نزدیک بهم برای m در حدود $0/4$ دیده می شود. همچنین R^2 این نمودارها همگی بالاتر از $0/95$ می باشد که تایید کننده مناسب بودن نمودار توانی برای فیت کردن داده ها می باشد.



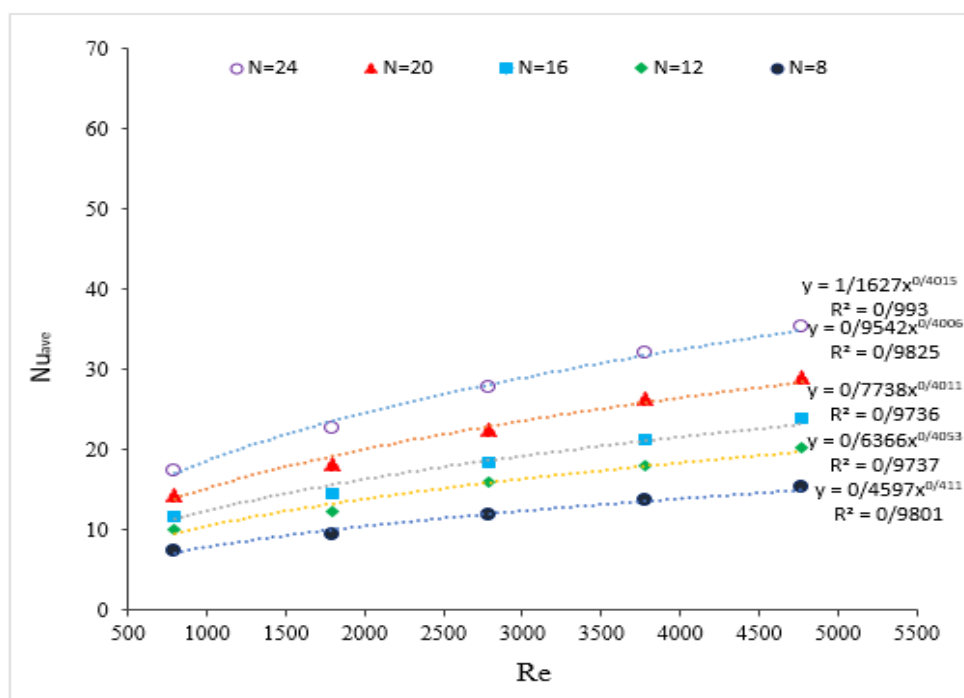
H=5 mm (الف)



H=17.5 mm (ب)



H=30 mm (ج)

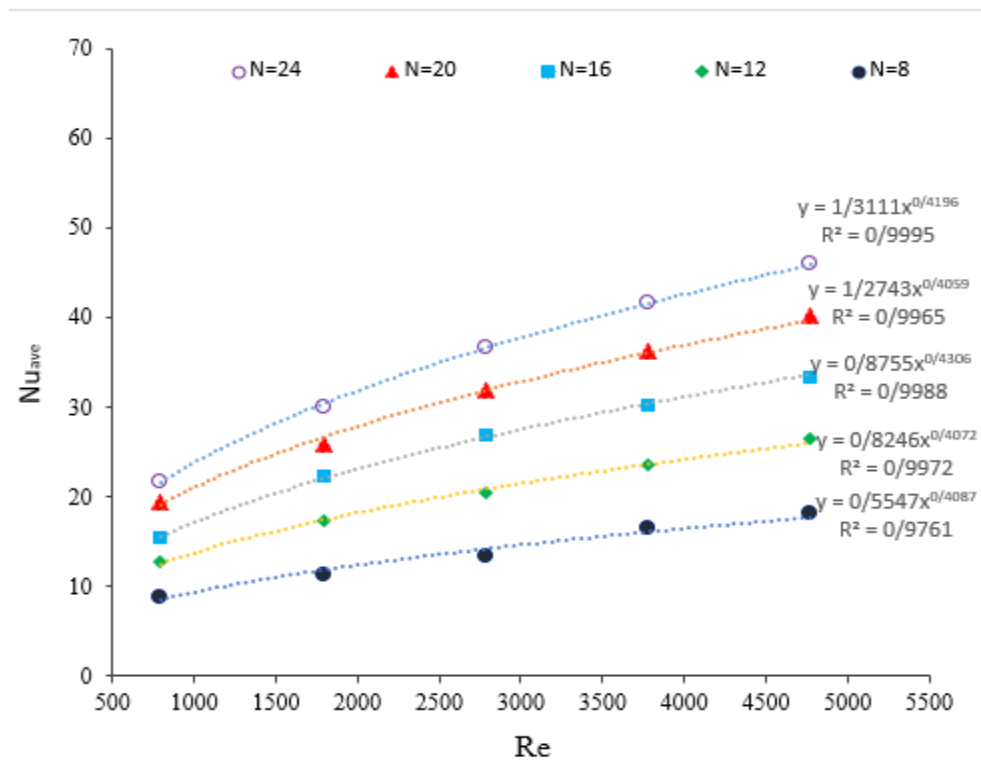


H=55 mm (د)

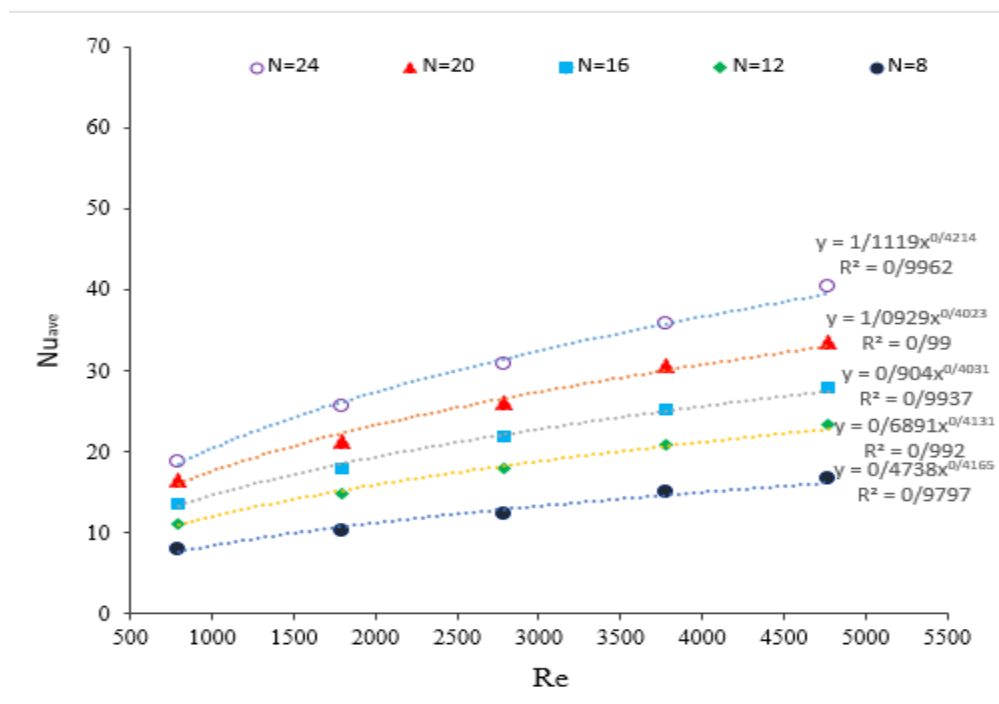
شکل ۲: مقدار عدد ناسلت بر حسب رینولدز برای ارتفاع های مختلف (H) و قطر نازل ($dn=1.25\text{ mm}$).

شکل (۲) مقدار عدد ناسلت بر حسب رینولدز برای تعداد نازل های مختلف، ارتفاع های مختلف (H) و قطر نازل برابر $d_n=1.25 \text{ mm}$ را نشان می دهد. این شکل نیز مجددا نشان می دهد که عدد ناسلت با افزایش تعداد نازل ها، افزایش یافته و با افزایش فاصله نازل ها از ماژول PV (H) ، مقدار ناسلت کاهش یافته است. مقایسه شکل (۲) با شکل (۱) نشان می دهد که با افزایش قطر نازل (d_n) مقدار عدد ناسلت کاهش یافته است که به معنای کاهش خنک کاری ماژول توسط جت سیال است.

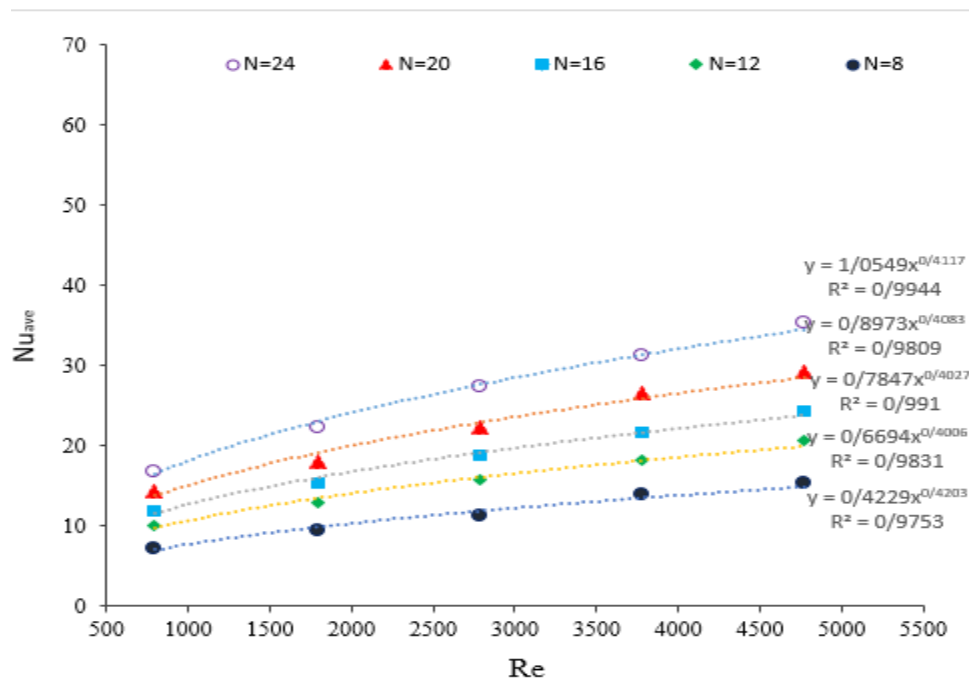
شکل های (۳)، (۴) و (۵) نیز مقدار عدد ناسلت بر حسب رینولدز برای ارتفاع های مختلف و قطرهای 1.5 mm ، 1.75 mm و 2 mm را نشان می دهد. این شکل ها نیز مجددا نشان می دهند که عدد ناسلت با افزایش تعداد نازل ها، افزایش یافته و با افزایش فاصله نازل از سطح هدف ، مقدار ناسلت کاهش یافته است. مقایسه شکل (۳) با شکل (۴) و شکل (۴) با (۵) نشان می دهد که با افزایش قطر نازل (d_n)، مقدار عدد ناسلت کاهش یافته است که به معنای کاهش خنک کاری ماژول توسط جت سیال است.



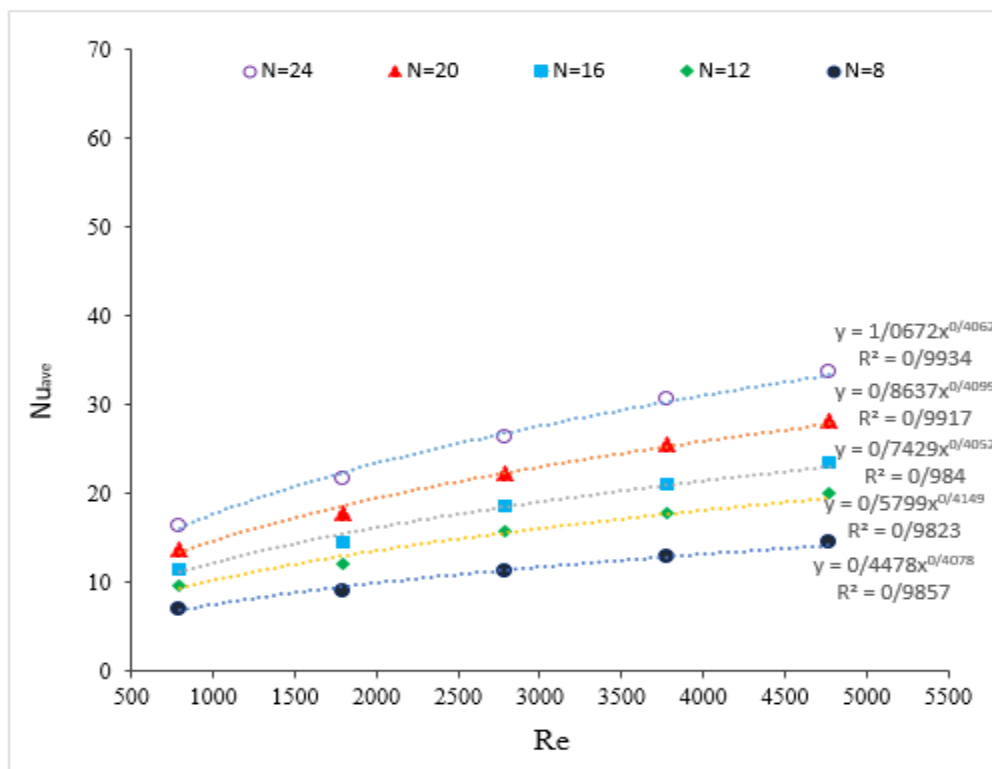
H=5 mm (الف)



H=17.5 mm (ب)

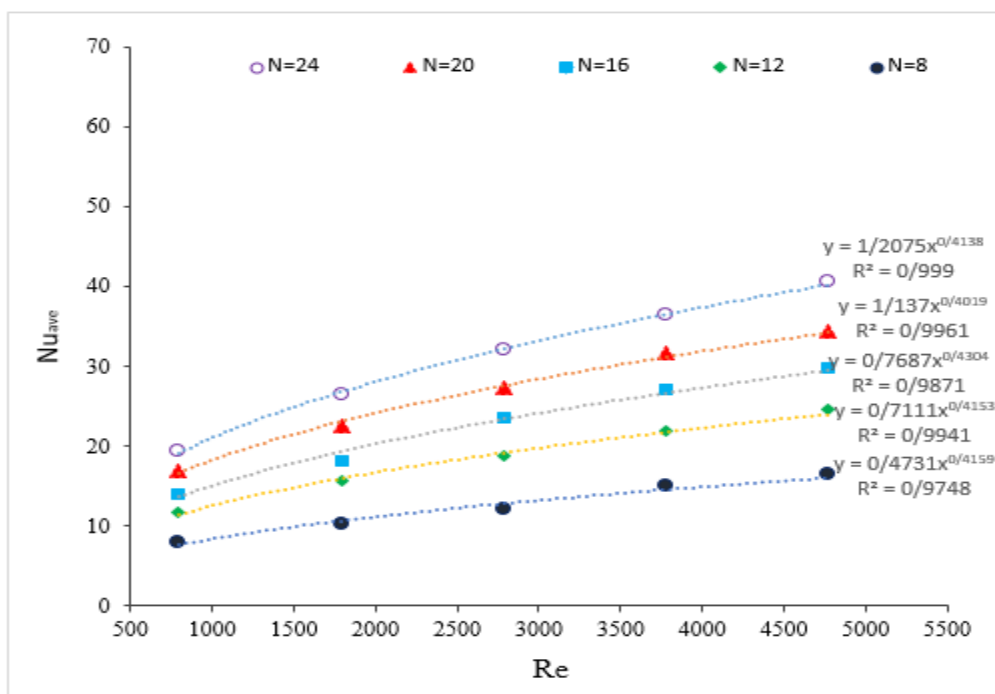


H=30 mm (ع)

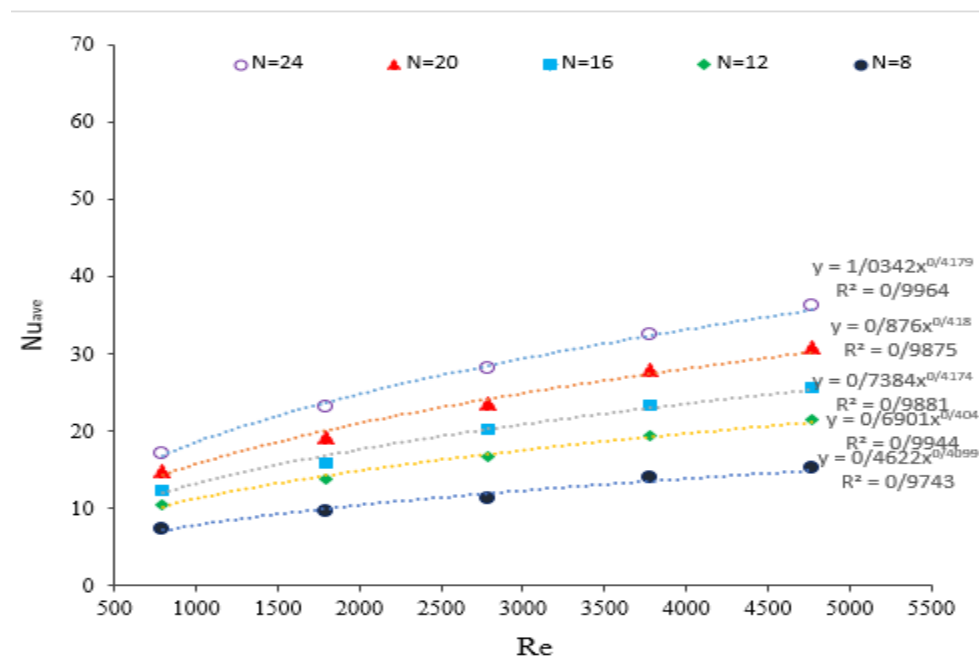


H=55 mm (د)

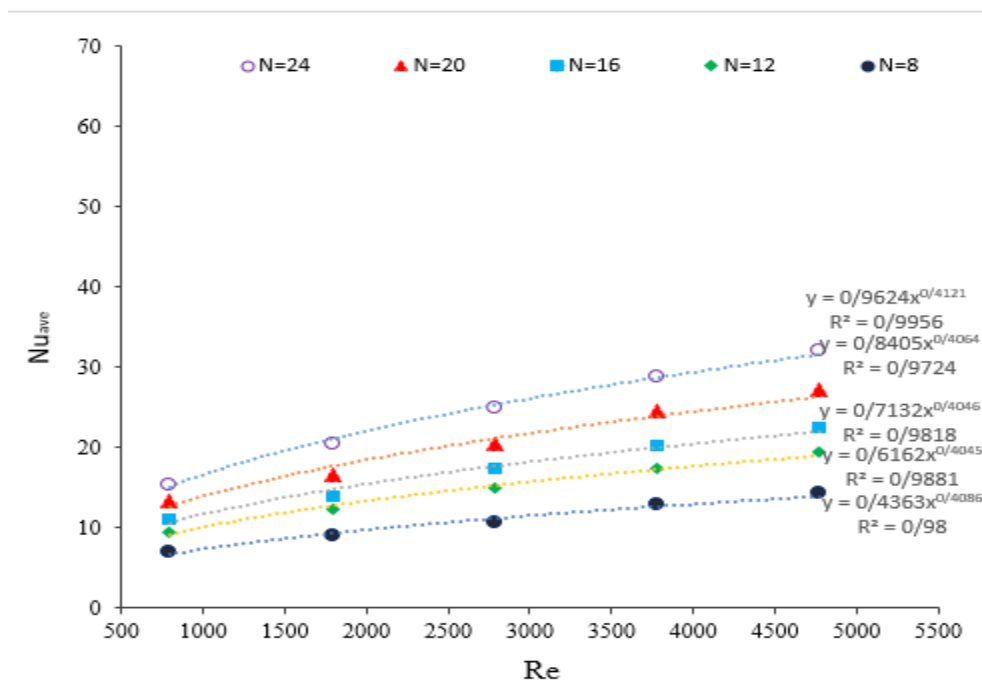
شکل ۳: مقدار عدد ناسلت بر حسب رینولدز برای ارتفاع های مختلف (H) و قطر نازل $dn=1.5\text{ mm}$.



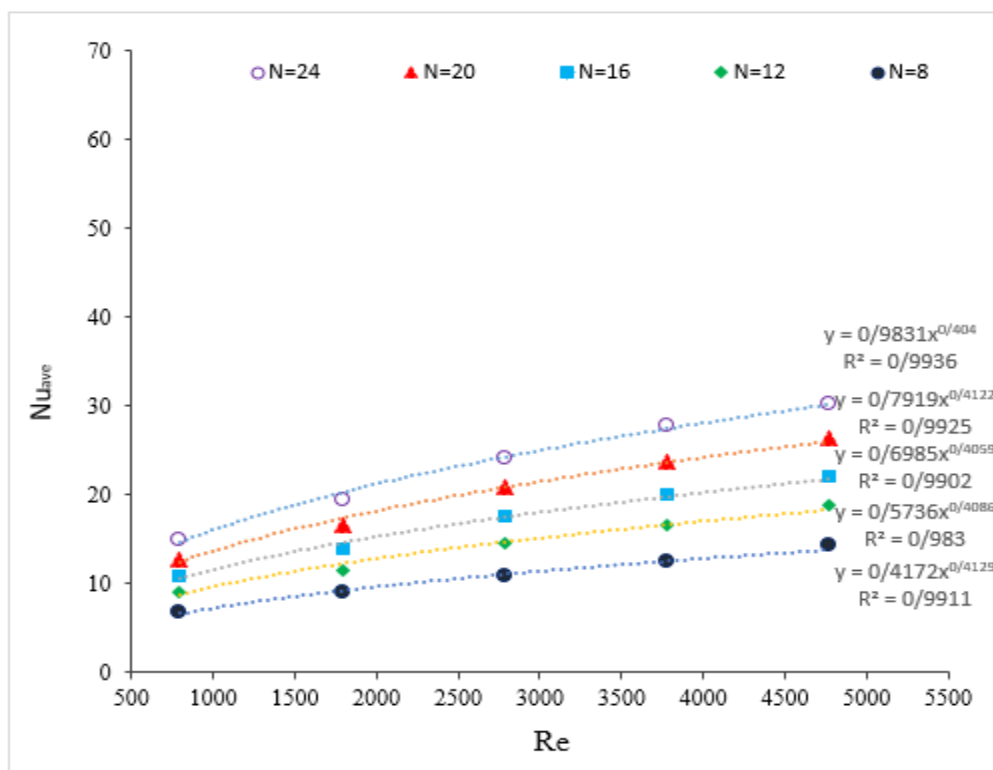
H=5 mm (الف)



H=17.5 mm (ب)

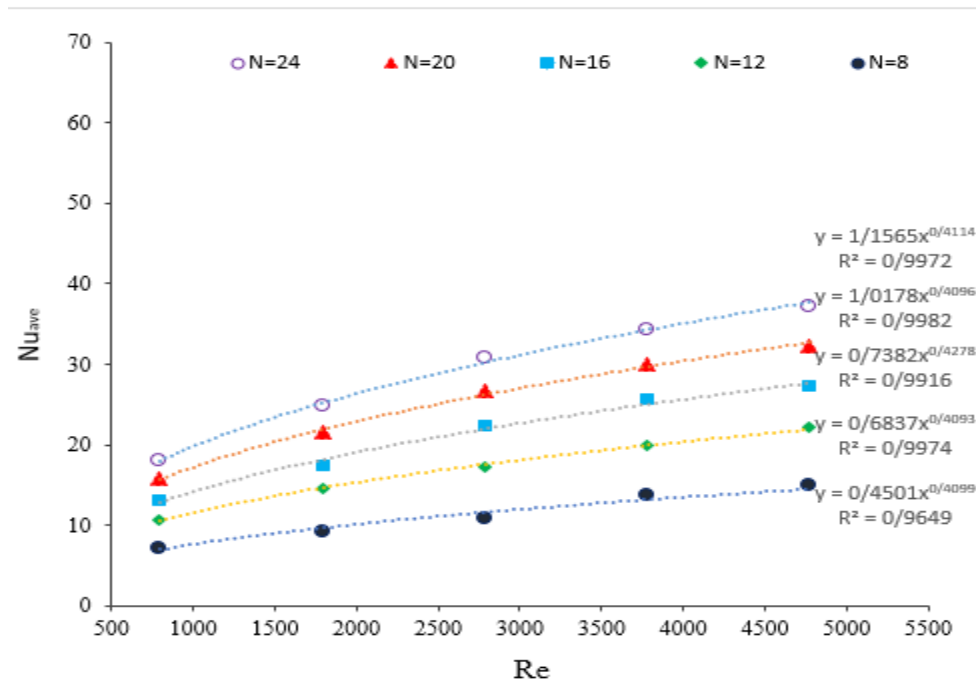


H=30 mm (ج)

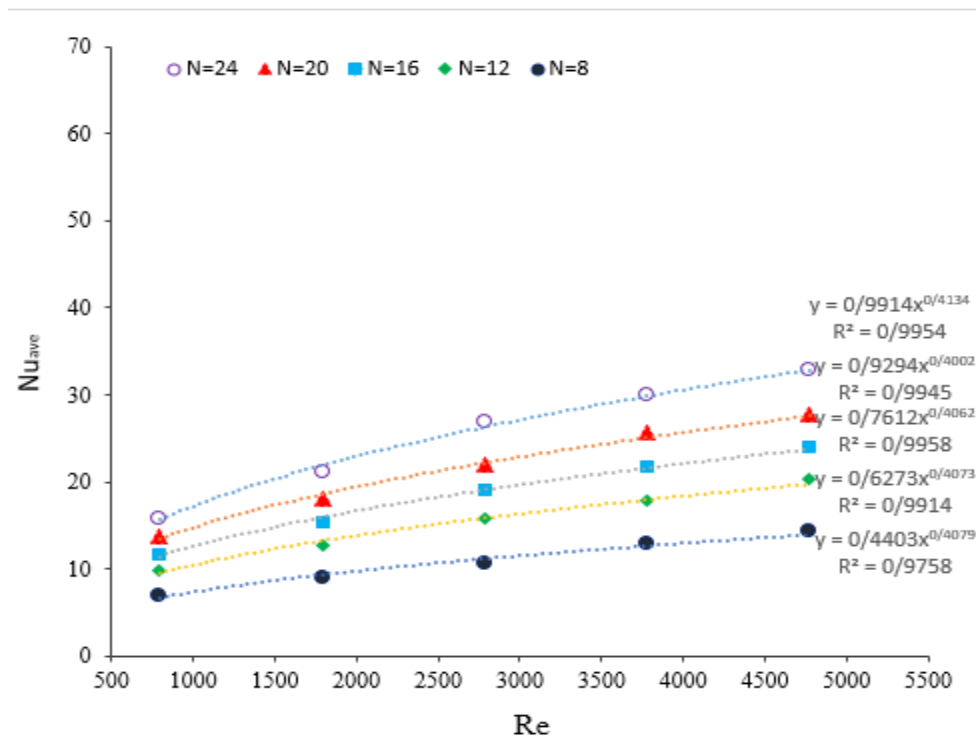


H=55 mm (د)

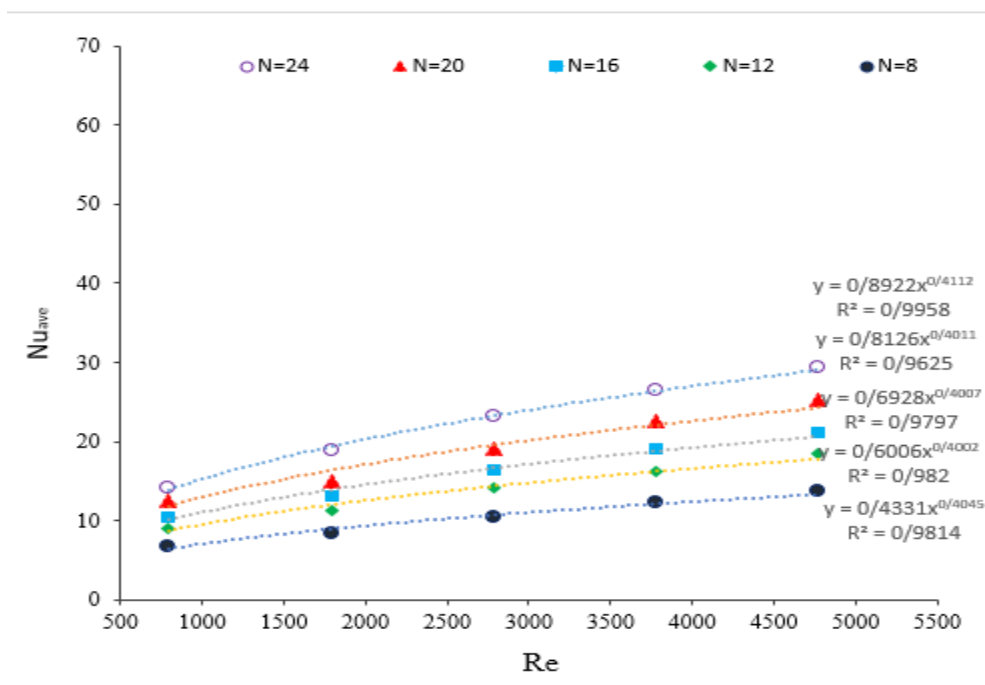
شکل ۴: مقدار عدد ناسلت بر حسب رینولدز برای ارتفاع های مختلف (H) و قطر نازل $dn=1.75$ mm.



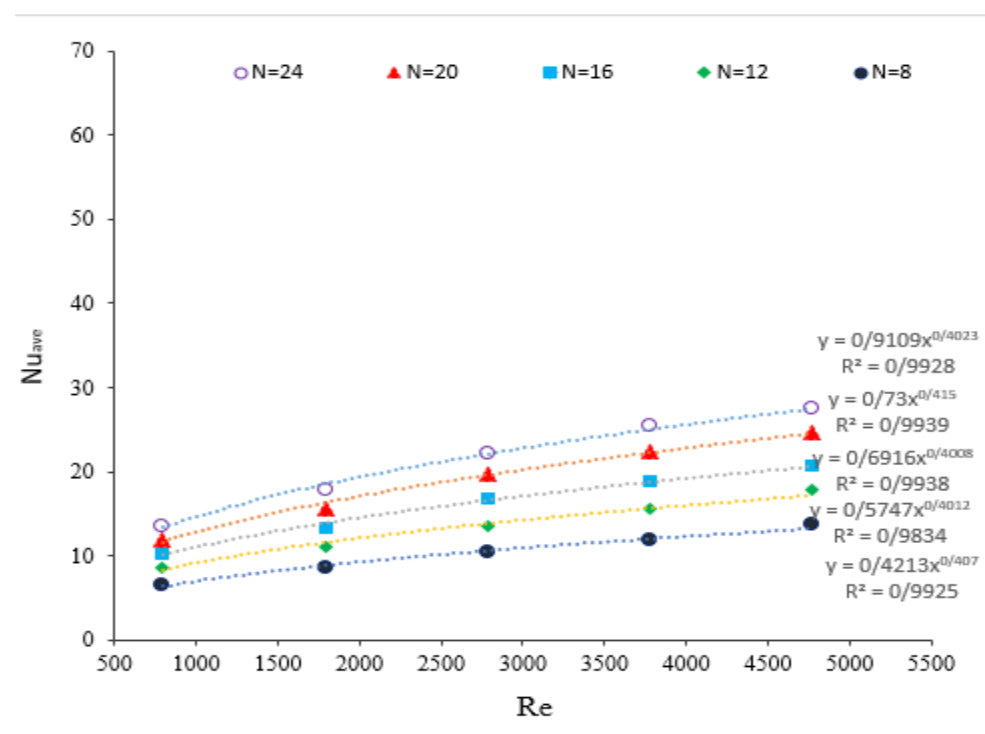
H=5 mm (الف)



H=17.5 mm (ب)



$H=30\text{ mm}$ (ع)



$H=55\text{ mm}$ (د)

شکل ۵: مقدار عدد ناسلت بر حسب رینولدز برای ارتفاع های مختلف (H) و قطر نازل $dn=2\text{ mm}$

بنابراین با توجه به نتایج موجود در شکل های (۱) تا (۵) مقادیر C و m را برای دسته نازل ها با قطرهای مختلف و تعداد نازل های مختلف را می توان مطابق جدول ۱ بدست آورد:

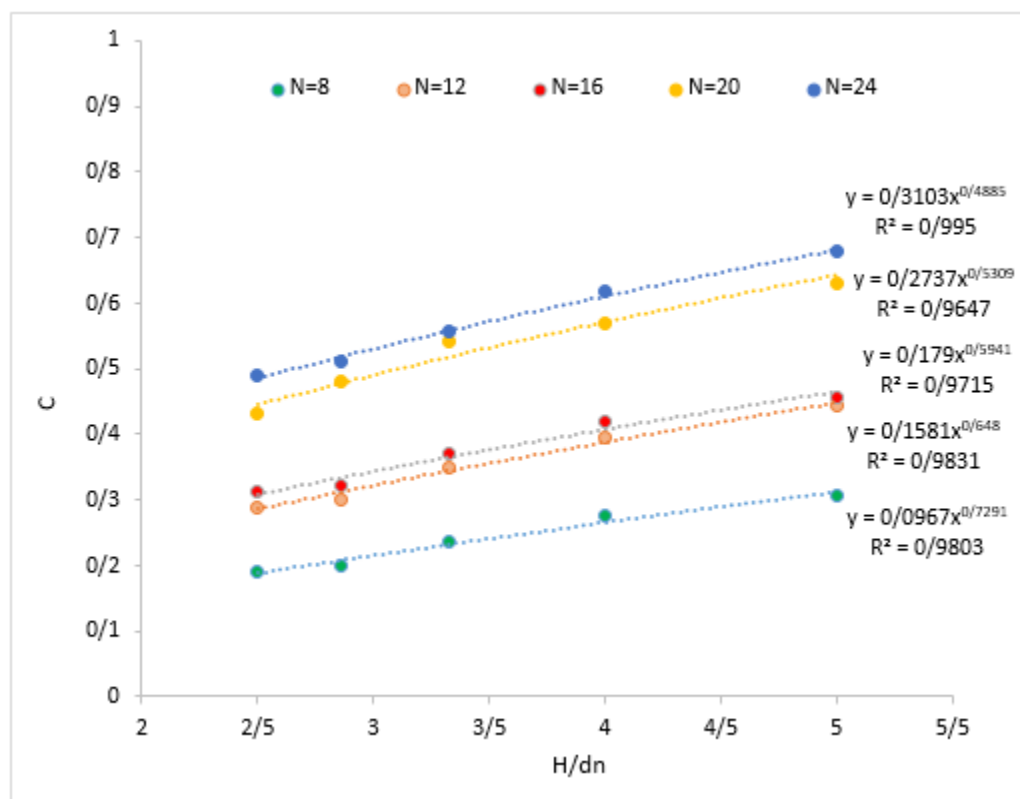
جدول ۱: مقادیر C و m در اعداد رینولدز و H های مختلف.

H=5 mm											
d_n (mm)	N=24		N=20		N=16		N=12		N=8		
	C	m	C	m	C	m	C	m	C	m	H/ d_n
1	0.6794	0.4243	0.6318	0.4170	0.4579	0.4343	0.4428	0.4031	0.3063	0.4069	5
1.25	0.6168	0.4178	0.5663	0.4102	0.4186	0.4300	0.3960	0.4021	0.2748	0.4029	4
1.5	0.5561	0.4196	0.5405	0.4059	0.3713	0.4306	0.3497	0.4072	0.2352	0.4087	3.33
1.75	0.5121	0.4083	0.4822	0.4019	0.3208	0.4304	0.3016	0.4153	0.2005	0.4159	2.86
2	0.4880	0.4141	0.4317	0.4096	0.3130	0.4278	0.2900	0.4093	0.1909	0.4099	2.50
H=17.5 mm											
d_n (mm)	N=24		N=20		N=16		N=12		N=8		
	C	m	C	m	C	m	C	m	C	m	H/ d_n
1	0.5513	0.4316	0.5217	0.4144	0.4243	0.4165	0.3655	0.4058	0.2502	0.4101	17.5
1.25	0.5418	0.4152	0.4053	0.4954	0.3994	0.4099	0.3172	0.4122	0.2361	0.4066	14
1.5	0.4747	0.4214	0.4643	0.4023	0.3835	0.4031	0.2923	0.4131	0.2010	0.4165	11.67
1.75	0.4387	0.4179	0.4180	0.3716	0.3132	0.4174	0.2930	0.4040	0.1961	0.4099	10
2	0.4205	0.4134	0.3942	0.4002	0.3229	0.4062	0.2661	0.4073	0.1868	0.4079	8.75
H=30 mm											
d_n (mm)	N=24		N=20		N=16		N=12		N=8		
	C	m	C	m	C	m	C	m	C	m	H/ d_n
1	0.5776	0.4065	0.4726	0.4028	0.3789	0.4077	0.3116	0.4076	0.2105	0.4143	30
1.25	0.4673	0.4188	0.4217	0.4049	0.3609	0.4019	0.2764	0.4130	0.2068	0.4094	24
1.5	0.4474	0.4177	0.3806	0.4083	0.3328	0.4027	0.2839	0.4006	0.1793	0.4203	20
1.75	0.4082	0.4121	0.3565	0.4064	0.3025	0.4046	0.2613	0.4045	0.1850	0.4086	17.14
2	0.3784	0.4112	0.3446	0.4011	0.2938	0.4007	0.2547	0.4002	0.1837	0.4045	15
H=55 mm											
d_n (mm)	N=24		N=20		N=16		N=12		N=8		
	C	m	C	m	C	m	C	m	C	m	H/ d_n
1	0.5628	0.4078	0.4475	0.4031	0.3661	0.4006	0.3046	0.4005	0.1993	0.4091	55
1.25	0.4931	0.4015	0.4047	0.4006	0.3282	0.4011	0.2700	0.4053	0.1995	0.4110	44
1.5	0.4526	0.4062	0.3663	0.4099	0.3151	0.4052	0.2459	0.4149	0.1899	0.4078	36.67
1.75	0.4170	0.4040	0.3359	0.4122	0.2962	0.4059	0.2433	0.4086	0.1769	0.4129	31.43
2	0.3863	0.4023	0.3096	0.4150	0.2933	0.4008	0.2437	0.4012	0.1787	0.4070	27.5

با توجه به جدول ۱ مقدار m متوسط برابر $۰/۴۰۸۹$ است. با توجه به اینکه مقدار فاصله از سطح هدف (H) و قطر نازل (d_n) به پهنه به ترتیب در محدوده $H = ۵ \text{ mm}$ و $d_n = 1 \text{ mm}$ بدست آمد، ناحیه $2.5 \leq H/d_n \leq 5$ بسیار حائزه اهمیت است. لذا، می توان برای این محدوده از H/d_n مقدار C را وابسته به H/d_n و تعداد نازل ها (N) مطابق جدول ۲ و شکل (۶) بدست آورد:

H/d_n	$N=8$	$N=12$	$N=16$	$N=20$	$N=24$
2.5	0.1909	0.29	0.313	0.4317	0.49
2.86	0.2005	0.3016	0.3208	0.4822	0.5121
3.33	0.2352	0.3497	0.3718	0.5405	0.5561
4	0.2748	0.396	0.4186	0.5706	0.6168
5	0.3063	0.4428	0.4579	0.6318	0.6794

جدول ۲: مقادیر C در مقادیر H/d_n های مختلف.



شکل ۶: مقدار C بر حسب H/d_n برای تعداد نازل های مختلف (N).

اگر مطابق شکل (۶)، C را به صورت یک تابع توانی بر حسب H/d_n مطابق معادله (۶) در نظر بگیریم:

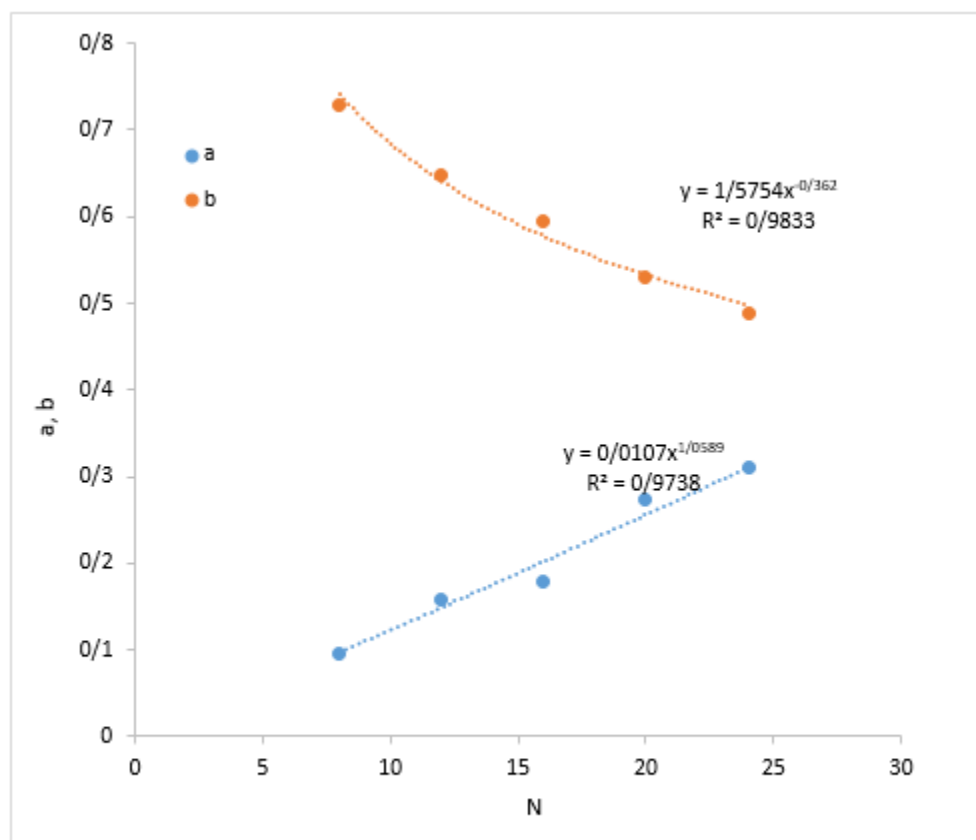
$$(5) \quad C = a \left(\frac{H}{d_n} \right)^b$$

آنگاه با توجه به معادلات بدست آمده در شکل (۶) می توان مقادیر a و b را در جدول (۳) به صورت زیر نوشت:

جدول ۳: مقادیر a و b در مقادیر N های مختلف.

N	a	b
8	0.0967	0.7291
12	0.1581	0.648
16	0.179	0.5941
20	0.2737	0.5309
24	0.3103	0.4885

بنابراین با فیت کردن نمودار توانی بر داده های a و b بر حسب N می توان شکل (۷) را به صورت زیر ترسیم کرد:



شکل ۷: مقدار a و b بر حسب N.

بنابراین با توجه به شکل (۷) معادلات زیر بر حسب N برای a و b به صورت زیر بدست آمد:

$$a = 0.0107(N)^{1.0589} \quad (۶)$$

$$b = 1.5754(N)^{0.362} \quad (۷)$$

بنابراین معادله نهایی برای عدد ناسلت برای سیستم خنک کاری با جیدمان های پیشنهادی برای نازل ها با تعداد مختلف به صورت زیر بدست می آید:

$$Nu_{ave} = 0.0107(N)^{1.0589} \left(\frac{H}{d_n}\right)^{1.5754(N)^{0.362}} Re^{0.4089} Pr^{0.444} \quad (۸)$$

مراجع

- [1] Al-Waeli A., Sopian K., Chaichan MT., Kazem H.A., Hasan HA., Najah Al-Shamani A. (2017) "An experimental investigation of SiC nanofluid as a base-fluid for a photovoltaic thermal PV/T system", **Energy Convers Manage**, **142**, pp 547
- [2] Kazem HA., Al-Badi HAS., Al Busaidi AS., Chaichan MT. (2017) "Optimum design and evaluation of hybrid solar/wind/diesel power system for Masirah Island", **Environ Dev Sustain**, **19 (5)**, pp 1761.
- [3] Chandel SS., Agarwal T. (2017) "Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems", **Renew Sustain Energy Review**, **73**, pp 1342.
- [4] Short, T. Oldach, R. (2003) "Solar powered water pumps: The past, the present: and the future", **Journal of solar energy engineering**, **25(1)**, pp 76.
- [5] Solar Energy (2001): Research and Education, Florida Solar Energy Research and Education, Washington Dc.
- [۶] رثوفی راد، م. (۱۳۶۴) "نگرشی بر سیستمهای استفاده از انرژی خورشیدی: همراه با طرز ساخت چند سیستم ساده"، تهران، سازمان تلویز.
- [7] www.iea-pvps.org.
- [8] F. C.E. (1883) "On a new form of selenium photocell", **American Journal of Science**, **26**, pp.456.
- [9] Chapin, D. M., Fuller, C. S., Pearson, G. L (1954) "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power", **Journal of Applied Physics**, **25 (5)**, pp 676.
- [10] Reynolds, D. C., Leies G., Antes, L. L. Marburger, R. E. (1954) "Photovoltaic Effect in Cadmium Sulfide", **Physical Review**, **96 (2)**, pp 533.
- [11] Jenny, D. A., Loferski, J. J., & Rappaport, P. (1956) "Photovoltaic effect in GaAs p- n junctions and solar energy conversion" **Physical Review**, **101(3)**, pp 1208.
- [12] Prince. M.B. (1955) "Silicon Solar Energy Converters", **Journal of Applied physics**, **26 (5)**, pp 534.
- [13] Loferski. J. J. (1956) "Theoretical Considerations Governing the Choice of the Optimum Semiconductor for Photovoltaic Solar Energy Conversion" **Journal of Applied physics**, **27 (7)** pp 777.

- [14] Cusano, D. A. (1963) "CdTe solar cells and photovoltaic heterojunctions in II-VI compounds", **Journal of Solid-state electronics**, **6 (3)** pp 217.
- [15] Wysocki, J. J., Rappaport, P., Davison, E., Hand, R., Loferski J. J. (1966) "Lithium-doped, Radiation-Resistant Silicon Solar Cells", **Journal of Applied physics Letters**, **9 (2)**, pp 44.
- [16] Alferov, Z. I., Andreev, V. M., Kagan, M. B., Protasov, I. I., & Trofim, V. G. (1971) "Solar-energy converters based on p-n Al_xGa_{2x}As-GaAs heterojunctions" **Fiz. Tekh. Poluprovodn**, **4 (1)**, pp 2378.
- [17] Lindmaycr, J., Allison J. (1973) "The violet cell: an improved silicon solar cell", **COMSAT technical reviews**, **3 (1)**, pp 1.
- [18] Woodall, J. M., & Hovel, H. J. (1973). "Theoretical and experimental evaluation of GaAlAs-GaAs solar cells" In Proceedings of the 10th IEEE PVSC.
- [19] Oleksiyi, L. (2008) "Study of Thin Film Solar Cell based on Copper Oxide Substrate by DC Reactive Magnetron Sputtering" University of Degli Studi Di Padova, Ph. D Thesis, 9.
- [20] Friedman, D. J., Kurtz, S. R., Bertness, K. A., Kibbler, A. E., Kramer, C., Olson, J. M., ... & Snyder, J. K. (1995) "Accelerated publication 30.2% efficient GaInP/GaAs monolithic two-terminal tandem concentrator cell" **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, **3(1)**, pp 47.
- [21] Contreras, M. A., Egaas, B., Ramanathan, K., Hiltner, J., Swartzlander, A., Hasoon, F., & Noufi, R. (1999) "Progress toward 20% efficiency in Cu (In, Ga) Se₂ polycrystalline thin-film solar cells" **Progress in Photovoltaics: Research and applications**, **7(4)**, pp 311.
- [22] <https://www.nrel.gov>.
- [23] <https://www.slideserve.com/odysseus/solar-cell-operation>.
- [24] [https:// www.satba.gov.ir](https://www.satba.gov.ir).

[۲۵] محمد نژاد، ش. بهرامی (۱۳۹۲) "سلول های خورشیدی، مبانی مهندسی، ساختارها و فناوری ها"، چاپ

اول، موسسه انتشارات دانشگاه علم و صنعت.

- [26] Lotsch, H.K.V. (2006) "Concentrator photovoltaic".
- [27] Popovici, C. G., Hudîşteanu, S. V., Mateescu, T. D., Cherecheş, N. C. (2016). "Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks" **Energy Procedia**, **85(2016)**, pp 425.

- [28] Emam, M., Ookawara, S., Ahmed, M. (2017) "Performance study and analysis of an inclined concentrated photovoltaic-phase change material system" **Solar Energy**, 150, pp 229.
- [29] Sardarabadi, M., Passandideh-Fard, M., Heris, S. Z. (2014) "Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units)" **Energy**, 66, pp 264.
- [30] Ghadiri, M., Sardarabadi, M., Pasandideh-fard, M., & Moghadam, A. J. (2015) "Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids" **Energy Conversion and Management**, 103, pp 468.
- [31] Kalogirou, S. A., Tripanagnostopoulos, Y. (2006). "Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production". **Energy conversion and management**, 47(18-19), pp 3368.
- [32] Foster, R., Ghassemi, M., Cota, A. (2009). "Solar energy: renewable energy and the environment". CRC press.
- [33] Edenburn, M. W., Edenburn, M. W. (1981). "Active and passive cooling for concentrating photovoltaic arrays". **STIN**, 82, pp 21745.
- [34] Sargunanathan, S., Elango, A., Mohideen, S. T. (2016) "Performance enhancement of solar photovoltaic cells using effective cooling methods: A review" **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 64, pp 382.
- [35] Siecker, J., Kusakana, K., Numbi, B. P. (2017) "A review of solar photovoltaic systems cooling technologies" **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 79, pp192.
- [36] Cazzaniga, R., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina, G. M. (2012, June) "Floating tracking cooling concentrating (FTCC) systems" In 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (pp. 000514-000519). IEEE.
- [37] Preet, S., Bhushan, B., Mahajan, T. (2017) "Experimental investigation of water based photovoltaic/thermal (PV/T) system with and without phase change material (PCM)" **Solar Energy**, 155, pp 1104.

[۳۸] موسوی بایگی، ر.، صدرعاملی، م. (۱۳۹۵) "طراحی و ساخت یک سامانه خنک کننده برای افزایش راندمان

پنل های فتوولتائیک به کمک مواد تغییر فاز" نشریه مهندسی مکانیک شریف، شماره ۱، دوره ۳-۲۳، ص ۷۷.

- [39] Mehrotra, S., Rawat, P., Debbarma, M., Sudhakar, K. (2014) "Performance of a solar panel with water immersion cooling technique" **International Journal of Science, Environment and Technology**, 3(3), pp 1161.
- [40] Alzaabi, A. A., Badawiyeh, N. K., Hantoush, H. O., Hamid, A. K. (2014) "Electrical/thermal performance of hybrid PV/T system in Sharjah, UAE" **International Journal of Smart Grid and Clean Energy**, 3(4), pp 385.
- [41] Mazón-Hernández, R., García-Cascales, J. R., Vera-García, F., Káiser, A. S., Zamora, B. (2013) "Improving the electrical parameters of a photovoltaic panel by means of an induced or forced air stream" **International Journal of Photoenergy**, 2013.
- [42] Pang, W., Liu, Y., Shao, S., Gao, X. (2015) "Empirical study on thermal performance through separating impacts from a hybrid PV/TE system design integrating heat sink" **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 60, pp 9.
- [43] Agrawal, S., Tiwari, A. (2011) "Experimental validation of glazed hybrid micro-channel solar cell thermal tile" **Solar Energy**, 85(11), pp 3046.
- [44] Barrau, J., Rosell, J., Chemisana, D., Tadríst, L., Ibáñez, M. (2011) "Effect of a hybrid jet impingement/micro-channel cooling device on the performance of densely packed PV cells under high concentration" **Solar energy**, 85(11), pp 2655.
- [45] Sardarabadi, M., Hosseinzadeh, M., Kazemian, A., Passandideh-Fard, M. (2017) "Experimental investigation of the effects of using metal-oxides/water nanofluids on a photovoltaic thermal system (PVT) from energy and exergy viewpoints" **Energy**, 138, pp 682.
- [46] Stritih, U. (2016) "Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM" **Renewable Energy**, 97, pp 671.
- [47] Han, X., Wang, Y., Zhu, L. (2013) "The performance and long-term stability of silicon concentrator solar cells immersed in dielectric liquids" **Energy conversion and management**, 66, pp 189.
- [48] Nižetić, S., Čoko, D., Yadav, A., Grubišić-Čabo, F. (2016). "Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response" **Energy conversion and management**, 108, pp 287.
- [49] Karami, N., Rahimi, M. (2014) "Heat transfer enhancement in a PV cell using Boehmite nanofluid" **Energy conversion and management**, 86, pp 275.

- [50] He, W., Chow, T. T., Ji, J., Lu, J., Pei, G., & Chan, L. S. (2006) "Hybrid photovoltaic and thermal solar-collector designed for natural circulation of water" **Applied energy**, 83(3), pp 199.
- [51] Karami, N., Rahimi, M. (2014) "Heat transfer enhancement in a hybrid microchannel-photovoltaic cell using Boehmite nanofluid" **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 55, pp 45.
- [52] Ghadiri, M., Sardarabadi, M., Pasandideh-fard, M., Moghadam, A. J. (2015) "Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids" **Energy Conversion and Management**, 103, pp 468.
- [53] Radwan, A., Ahmed, M., Ookawara, S. (2016) "Performance enhancement of concentrated photovoltaic systems using a microchannel heat sink with nanofluids" **Energy Conversion and Management**, 119, pp 289.
- [54] Hasan, H. A., Sopian, K., Jaaz, A. H., Al-Shamani, A. N. (2017) "Experimental investigation of jet array nanofluids impingement in photovoltaic/thermal collector" **Solar Energy**, 144, pp 321.
- [55] Bovo, M. (2011). "On the numerical modelling of impinging jets heat transfer", (Doctoral dissertation, Chalmers University of Technology).
- [56] Shanley A.I., (2011) "Cooling systems (Energy, Engineering and Applications)" United States: Nova Science Publishers Inc, pp: 38.
- [57] Zuckerman, N., Lior, N. (2005) "Jet impingement heat transfer on a circular cylinder by radial slot jets" In **ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition**, 42215, pp. 67.
- [58] ایرانی، م. (۱۳۸۸) پایان نامه کارشناسی ارشد: "بررسی انتقال حرارت جابجایی در برخورد هوای آرام و دوبعدی به سطح گوه ای شکل با زاویه های متفاوت"، دانشکده مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.
- [59] Molana, M., Banooni, S. (2013). "Investigation of heat transfer processes involved liquid impingement jets: a review" **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, 30(3), pp 413.
- [60] Womac D., Ramadhyani S., Incropera F., (1993) "Correlating equations for impingement cooling of small heat transfer with single circular jets" **Transactions of the ASME**, 115, pp 106.
- [61] Bovo, M., Davidson, L. (2015) "Direct comparison of LES and experiment of a single-pulse impinging jet" **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 88, pp 102.

- [62] Foldyna, J., Sitek, L., Ščučka, J., Martinec, P., Valíček, J., Páleníková, K. (2009). “Effects of pulsating water jet impact on aluminium surface”. **Journal of Materials Processing Technology**, 209(20), pp 6174.
- [63] Smith, B. L., Glezer, A. (1998). “The formation and evolution of synthetic jets”. **Physics of fluids**, 10(9), pp 2281.
- [64] Gardon R., Akfirat J.C., (1965) “The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics of impinging jets”. **Int. J. Heat Mass Transfer**, 8, pp 1261.
- [65] Huang, L., El-Genk, M. S. (1994). “Heat transfer of an impinging jet on a flat surface”. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 37(13), pp 1915.
- [66] Abdolzadeh, M., Ameri, M. (2009). “Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells”. **Renewable energy**, 34(1), pp 91.
- [67] Bahaidarah, H. M. (2016). “Experimental performance evaluation and modeling of jet impingement cooling for thermal management of photovoltaics”. **Solar Energy**, 135, pp 605.
- [68] Abo-Zahhad, E. M., Ookawara, S., Radwan, A., El-Shazly, A. H., ElKady, M. F. (2018). “Thermal and structure analyses of high concentrator solar cell under confined jet impingement cooling”. **Energy Conversion and Management**, 176, pp39.
- [69] Hasan, H. A., Sopian, K., Fudholi, A. (2018). “Photovoltaic thermal solar water collector designed with a jet collision system”. **Energy**, 161, pp 412.
- [70] Yang, L. H., Liang, J. D., Hsu, C. Y., Yang, T. H., Chen, S. L. (2019). “Enhanced efficiency of photovoltaic panels by integrating a spray cooling system with shallow geothermal energy heat exchanger”. **Renewable Energy**, 134, pp 970.
- [71] Otanicar, T. P., Phelan, P. E., Prasher, R. S., Rosengarten, G., Taylor, R. A. (2010). “Nanofluid-based direct absorption solar collector”. **Journal of renewable and sustainable energy**, 2(3), pp 033102.
- [72] Taylor, R. A., Phelan, P. E., Otanicar, T. P., Walker, C. A., Nguyen, M., Trimble, S., Prasher, R. (2011). “Applicability of nanofluids in high flux solar collectors” **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, 3(2), pp 023104.
- [73] Li, Y., Xie, H. Q., Yu, W., Li, J. (2011). Investigation on heat transfer performances of nanofluids in solar collector” **In Materials Science Forum**, 694, pp. 33. Trans Tech Publications Ltd.

- [74] Yousefi, T., Veysi, F., Shojaeizadeh, E., Zinadini, S. (2012). "An experimental investigation on the effect of Al₂O₃-H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors" **Renewable Energy**, **39**(1), pp 293.
- [75] Khullar, V., Tyagi, H., Phelan, P. E., Otanicar, T. P., Singh, H., Taylor, R. A. (2012). "Solar energy harvesting using nanofluids-based concentrating solar collector" **Journal of Nanotechnology in Engineering and Medicine**, **3**(3).
- [76] Elmir, M., Mehdaoui, R., Mojtabi, A. (2012). "Numerical simulation of cooling a solar cell by forced convection in the presence of a nanofluid" **Energy Procedia**, **18**, pp.594.
- [77] Khanjari, Y., Pourfayaz, F., Kasaeian, A. B. (2016). "Numerical investigation on using of nanofluid in a water-cooled photovoltaic thermal system" **Energy Conversion and Management**, **122**, pp 263.
- [78] Sardarabadi, M., Passandideh-Fard, M. (2016). "Experimental and numerical study of metal-oxides/water nanofluids as coolant in photovoltaic thermal systems (PVT)" **Solar Energy Materials and Solar Cells**, **157**, pp 533.
- [79] Sardarabadi, M., Passandideh-Fard, M., Maghrebi, M. J., Ghazikhani, M. (2017). "Experimental study of using both ZnO/water nanofluid and phase change material (PCM) in photovoltaic thermal systems" **Solar Energy Materials and Solar Cells**, **161**, pp 62.
- [80] Yazdanifard, F., Ameri, M., Ebrahimnia-Bajestan, E. (2017). "Performance of nanofluid-based photovoltaic/thermal systems: A review" **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **76**, pp 323.
- [81] Aberoumand, S., Ghamari, S., Shabani, B. (2018). "Energy and exergy analysis of a photovoltaic thermal (PV/T) system using nanofluids: An experimental study" **Solar Energy**, **165**, pp 167.
- [82] Radwan, A., Ahmed, M. (2018). "Thermal management of concentrator photovoltaic systems using microchannel heat sink with nanofluids". **Solar Energy**, **171**, pp 229.
- [83] Abadeh, A., Rejeb, O., Sardarabadi, M., Menezes, C., Passandideh-Fard, M., Jemni, A. (2018). "Economic and environmental analysis of using metal-oxides/water nanofluid in photovoltaic thermal systems (PVTs)" **Energy**, **159**, pp 1234.
- [84] Abdallah, S. R., Saidani-Scott, H., Abdellatif, O. E. (2019). "Performance analysis for hybrid PV/T system using low concentration MWCNT (water-based) nanofluid" **Solar Energy**, **181**, pp 108.

- [85] Ebaid, M. S., Ghrair, A. M., Al-Busoul, M. (2018). "Experimental investigation of cooling photovoltaic (PV) panels using (TiO₂) nanofluid in water-polyethylene glycol mixture and (Al₂O₃) nanofluid in water-cetyltrimethylammonium bromide mixture" **Energy Conversion and Management**, 155, pp 324.
- [86] Al-Waeli, A. H., Chaichan, M. T., Sopian, K., Kazem, H. A. (2019). "Influence of the base fluid on the thermo-physical properties of PV/T nanofluids with surfactant" **Case Studies in Thermal Engineering**, 13, pp 100340.
- [87] Han, X., Wang, Y., Zhu, L. (2011). "Electrical and thermal performance of silicon concentrator solar cells immersed in dielectric liquids" **Applied energy**, 88(12), pp4481.
- [88] Bhatt, N. H., Raj, R., Varshney, P., Pati, A. R., Chouhan, D., Kumar, A., Mohapatra, S. S. (2017). "Enhancement of heat transfer rate of high mass flux spray cooling by ethanol-water and ethanol-tween20-water solution at very high initial surface temperature" **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 110, pp.330.
- [89] Selvakumar, P., Suresh, S. (2012). "Convective performance of CuO/water nanofluid in an electronic heat sink". **Experimental Thermal and Fluid Science**, 40, pp.57.
- [90] Ashjaee, M., Goharkhah, M., Khadem, L. A., Ahmadi, R. (2015). "Effect of magnetic field on the forced convection heat transfer and pressure drop of a magnetic nanofluid in a miniature heat sink" **Heat and Mass Transfer**, 51(7), pp 953.
- [91] Yarahmadi, M., Goudarzi, H. M., Shafii, M. B. (2015). "Experimental investigation into laminar forced convective heat transfer of ferrofluids under constant and oscillating magnetic field with different magnetic field arrangements and oscillation modes". **Experimental Thermal and Fluid Science**, 68, pp 601.
- [92] Ghasemian, M., Ashrafi, Z. N., Goharkhah, M., Ashjaee, M. (2015). "Heat transfer characteristics of Fe₃O₄ ferrofluid flowing in a mini channel under constant and alternating magnetic fields". **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 381, pp.158.
- [93] Ghofrani, A., Dibaei, M. H., Sima, A. H., Shafii, M. B. (2013). "Experimental investigation on laminar forced convection heat transfer of ferrofluids under an alternating magnetic field". **Experimental Thermal and Fluid Science**, 49, pp 193.
- [94] Dizaji, A. S., Mohammadpourfard, M., Aminfar, H. (2018). "A numerical simulation of the water vapor bubble rising in ferrofluid by volume of fluid model in the presence of a magnetic field" **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 449, pp.185.

- [95] Hejazian, M., Nguyen, N. T. (2017). “A rapid magnetofluidic micromixer using diluted ferrofluid”. **Micromachines**, 8(2), 37, pp 1.
- [96] Markvart, T., McEvoy, A., Castaner, L. (Eds.). (2003). “Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications” Elsevier.
- [97] Mayfield R. (2010) “Photovoltaic design installation”. ISBN-13,978-0470598931.
- [98] Karami, H., Rahimi, M. Azimi, N. (2018) “Convective heat transfer enhancement in a pitted microchannel by stimulation of magnetic nanoparticles” **Chemical Engineering and Processing**, 126, pp 156.
- [99] Al-Waeli, A. H.A., Kazema, H. A., Chaichan, M. T., Sopian, K. (2019) “Experimental investigation of using nano-PCM/nanofluid on a photovoltaic thermal system (PVT): Technical and economic study” **Thermal Science and Engineering Progress**, 11, pp 213.
- [100] Senthil Rajan, A., Raja, K., Marimuthu, P. (2014) “Multi basin desalination using biomass heat source and analytical validation using RSM” **Energy Conversion and Management**, 87, pp.359.
- [101] Awad, O. I., Mamat, R., Ali, O. M., Azmi, W. H., Kadirgama, K., Yusri, I. M., .Yusaf, T. (2017). “Response surface methodology (RSM) based multi-objective optimization of fusel oil-gasoline blends at different water content in SI engine” **Energy Conversion and Management**, 150, pp 222.
- [102] Cornell, J. A., Khuri, A. I. (1987) “Response surfaces: designs and analyses”. Marcel Dekker, Inc.
- [103] Kessaissia, F. Z., Zegaoui, A., Aillerie, M., Arab, M., Boutoubat, M., Fares, C. (2020). “Factorial design and response surface optimization for modeling photovoltaic module parameters” **Energy Reports**, 6, pp 299.
- [104] Khamooshi, M., Salati, H., Egelioglu, F., Hooshyar Faghiri, A., Tarabishi, J., Babadi, S. (2014). “A review of solar photovoltaic concentrators” **International Journal of Photoenergy**, 2014.
- [105] Mathur, R. K., Mehrotra, D. R., Mittal, S., Dhariwal, S. R. (1984). “Thermal non-uniformities in concentrator solar cells. *Solar cells*, 11(2), 175-188.
- [106] Robinson, A. J., Schnitzler, E. (2007). An experimental investigation of free and submerged miniature liquid jet array impingement heat transfer” **Experimental Thermal and Fluid Science**, 32(1), pp. 1.

- [107] Heidari, N., Rahimi, M., Azimi, N. (2019). "Cooling Enhancement of a Photovoltaic Panel Through Ferrofluid Stimulation Using a Magnetic-Wind Turbine" **Iranian Journal of Chemical Engineering (IJChE)**, **16(4)**, pp 35.
- [108] Rajaei, F., Rad, M. A. V., Kasaeian, A., Mahian, O., Yan, W. M. (2020). "Experimental analysis of a photovoltaic/thermoelectric generator using cobalt oxide nanofluid and phase change material heat sink" **Energy Conversion and Management**, **212**, pp. 112780.
- [109] Royne, A., Dey, C. J. (2007). "Design of a jet impingement cooling device for densely packed PV cells under high concentration" **Solar energy**, **81(8)**, pp. 1014.
- [110] Abo-Zahhad, E. M., Ookawara, S., Radwan, A., El-Shazly, A. H., El-Kady, M. F. (2018). "Numerical Analyses of High Concentrator Triple-Junction Solar Cell under Jet Impingement Cooling" **Energy Procedia**, **152**, pp. 1051.
- [111] Abo-Zahhad, E. M., Ookawara, S., Radwan, A., El-Shazly, A. H., Elkady, M. F. (2019). "Numerical analyses of hybrid jet impingement/microchannel cooling device for thermal management of high concentrator triple-junction solar cell" **Applied Energy**, **253**, pp.113538.
- [112] Ahmed, M., Radwan, A. (2017). "Performance evaluation of new modified low-concentrator polycrystalline silicon photovoltaic/thermal systems" **Energy conversion and management**, **149**, pp. 593.
- [113] Heidari, N., Rahimi, M., Azimi, N. (2018). "Experimental investigation on using ferrofluid and rotating magnetic field (RMF) for cooling enhancement in a photovoltaic cell" **International Communications in Heat and Mass Transfer**, **94**, pp. 32.

Abstract

One of these technologies that has been considered to convert solar energy into electrical energy is photovoltaic (PV) technology. The performance of a photovoltaic module is significantly affected by its surface temperature. Studies show that the efficiency of PV modules decreases by 0.3% for every 1°C increase in their surface temperature. Finding an efficient method to cool down PV modules is an important issue to improve their performance and increase their productivity. Examining the studies performed on PV module cooling systems, it can be concluded that high production capacity of liquid jet impingement cooling (JIC) system can be achieved. The electrical efficiency and performance of the PV/JIC system can be increased by designing the efficient geometry of the jet arrays, and by optimizing the parameters related to the nozzles, the uniform temperature distribution of the PV module can be achieved. In this research, the use of JIC system to reduce the surface temperature of a photovoltaic module and increase its production capacity has been investigated. First, pure water is used as the cooling liquid and the geometry of the JIC system is optimized using water, and then, SiC/water nanofluid is used for cooling. To obtain a uniform temperature distribution in the PV module, the main parameters such as nozzle diameter ($d_n = 1-2$ mm), number and different arrangements for nozzles ($N = 8-24$), coolant flow rate (m) and nozzle distance ($H=5-55$ mm) from the back surface of the PV module is examined. The originality of this research can be found in two concepts. Initially, using pure water cooling, the temperature of 12 areas on the surface of a PV module was measured and the maximum and minimum temperatures as well as the variance of temperature data for the JIC cooling system were reported to check the effect of the proposed JIC system on uniform surface temperature distribution of PV module. The temperature uniformity index was defined and evaluated to illustrate the cooling efficiency of the proposed JIC system. Second, the response surface method (RSM) is used to determine the optimal operating conditions in the JIC system. Using JIC and water as the coolant, the average temperature of the module dropped from 64 °C in the worst case to 43.3 °C and the output power reached 6.58 W. The output power of the photovoltaic module increased with increasing water mass flow rate and number of nozzles. Conversely, by increasing the nozzle distance from the photovoltaic module and the nozzle diameter, the output power of the photovoltaic module decreased. Also, the predicted responses (temperature and output power) at the optimum point of 33.68 °C and 8.610 W at a flow rate of 0.12 kg/s, number of nozzles=24, nozzle diameter=1.08 mm and the distance from the nozzle to the module are equal to 1.5 mm. After using water as a cooling liquid and obtaining the appropriate geometry and arrangement for the nozzles, the use of SiC/water nanofluid with different concentrations ($\phi = 0.25-$

1.1% wt) and investigating the effect of using the nozzle Single-hole and multi-hole nozzles on the electrical and thermal performance of PV modules have been performed. The results showed that the use of multi-hole nozzles has a more significant effect in reducing the temperature of the PV module than single-hole nozzles. On the other hand, it has been observed that with increasing the concentration of nanofluids, the temperature uniformity index is decreasing, which means a more uniform distribution of module surface temperature due to increasing the thermal conductivity of nanofluids and increasing heat transfer from the module surface to the impact jet. By increasing the nanofluid concentration from 0.25 to 1% by weight, it has led to a significant decrease in the surface temperature of the module. With increasing the concentration of nanofluid from 1 to 1.1 wt%, the rate of reduction in the module surface temperature decreased, which means that use of multi-hole nozzles and SiC nanofluid with a concentration of 1 wt% is a suitable choice and has the high ability for uniform distribution of module surface temperature. Therefore, this mode is recommended as the most efficient mode for cooling with fluid jet impingement cooling.

Keywords: Photovoltaic module; cooling; fluid jet; solar energy; nanofluid.



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering
M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

**Experimental investigation of increasing the efficiency
of solar panel by jet impingement cooling system**

By:
Mohammad Javidan

Supervisors:
Dr.Ali Jabari Moghadam

March 2021

