



تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق

و مقایسه بازگشت سرمایه


PV & Heliostat

B					
A					
Z	First Issue	Fotrousi Electronics	29.09.2018	Fotrousi Electronics	29.09.2018
REV.	DESCRIPTION	BY	DATE	BY	DATE
		REVISED		CHECKED	
	REVISED	SIGNATURE	DATE		
	DESIGNED	Fotrousi Electronics	29.09.2018		
	CHECKED	Fotrousi Electronics	29.09.2018		
	APPROVED	Fotrousi Electronics	29.09.2018		
PROJECT NAME: -					
CONTRACT NO.	CLASS	STATUS	DOCUMENT NO.	PAGE NO.	REV.
96050194ق	-	-	D-EN-32/00	1 of 43	00

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	2 of 43


فهرست مطالب

۳	..... فصل اول تکنولوژی فتوولتائیک	
۵	..... ۱.۱، ۱ چگونگی عملکرد سلول‌های خورشیدی	
۵	..... ۱.۲، ۲ انواع سلول‌های خورشیدی تجاری	
۶	..... ۱.۳، ۳ سیلیکون کریستالی	
۶	..... ۱.۳، ۱ سلول‌های سیلیکونی تک کریستالی	
۶	..... ۱.۳، ۲ سلول‌های سیلیکونی پلی کریستالی	
۷	..... ۱.۳، ۳ پوشش ضد انعکاس روی سلول‌های سیلیکون کریستالی	
۷	..... ۱.۴، ۴ تکنولوژی سلول فیلم نازک	
۸	..... ۱.۵، ۵ مقایسه انواع و کاربردهای سلول‌های خورشیدی	
۹	..... ۱.۶، ۶ تأثیر تابش و درجه حرارت بر توان تولیدی سلول	
۱۱	..... ۱.۷، ۷ طول عمر ماژول	
۱۱	..... ۱.۸، ۸ وضعیت تولید انرژی الکتریکی ماژول در هوای ابری	
۱۲	..... ۱.۹، ۹ هزینه نیروگاه	
۱۴	..... ۲، ۲ فصل دوم تکنولوژی CSP	
۱۵	..... ۲.۱، ۱ انواع سیستم‌های CSP	
۱۷	..... ۲.۱، ۱ نیروگاه سهموی خطی (PTC)	
۲۰	..... ۲.۱، ۲ منعکس کننده خطی فرسnel (LFR)	
۲۱	..... ۲.۱، ۳ برج گیرنده مرکزی (CTR)	
۲۵	..... ۲.۱، ۴ دیش و موتور استرلینگ (PDC)	
۲۷	..... ۲.۲، ۲ انتخاب سیستم CSP	
۲۷	..... ۲.۳، ۳ ذخیره‌سازی انرژی گرمایی	
۲۸	..... ۲.۳، ۱ نمک مذاب	
۳۰	..... ۲.۴، ۴ هلیوستات	
۳۳	..... ۲.۵، ۵ گیرنده مرکزی	
۳۵	..... ۲.۵، ۱ توان تولیدی توربین با ذخیره‌سازی انرژی	
۳۷	..... ۲.۵، ۲ توان تولیدی توربین بدون ذخیره‌سازی انرژی	
۳۸	..... ۲.۶، ۶ محاسبه هزینه اولیه نیروگاه	
۴۱	..... ۳، ۳ فصل سوم مقایسه و جمع‌بندی	

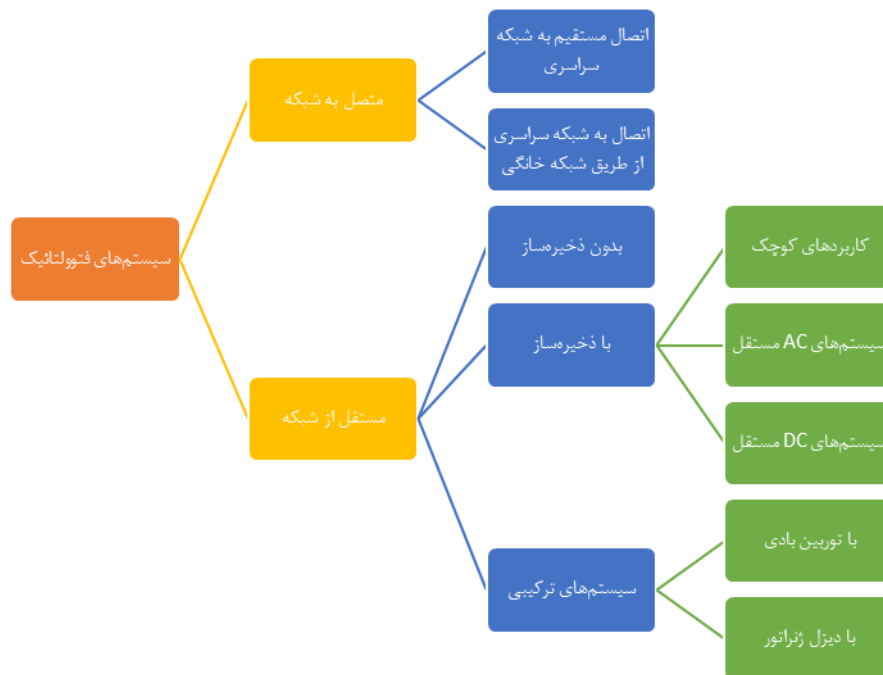
<i>Project Name:</i>				
-				
<i>Document Title:</i>				
تکنولوژی های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	3 of 43

۱. فصل اول

تکنولوژی فتوولتائیک

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	4 of 43

سیستم‌های فتوولتائیک می‌توانند به سیستم‌های مستقل از شبکه و متصل به شبکه گروه‌بندی شوند. در سیستم‌های مستقل، سیستم انرژی خورشیدی باید متناسب با انرژی الکتریکی مورد نیاز باشد و از آنجا که در اکثر کاربردها پس از غروب خورشید نیز به انرژی الکتریکی نیاز است، غالباً در این سیستم‌ها وجود یک ذخیره‌ساز (باتری) الزامی می‌باشد. در برخی کاربردها برای پوشش دادن کامل بار الکتریکی از یک یا چند منبع توان دیگر در کنار فتوولتائیک مثل باد یا دیزل ژنراتور استفاده می‌شود که به آن سیستم هیبرید (ترکیبی) می‌گویند. در سیستم‌های متصل به شبکه، انرژی الکتریکی تولید شده به شبکه تزریق می‌شود و لذا نیازی به ذخیره‌ساز نمی‌باشد.




شکل ۱ دسته‌بندی انواع سیستم‌های فتوولتائیک

یک سیستم PV^۱ متصل به شبکه الزاماً از اجزای زیر تشکیل می‌شود:

- ۱- ماژول یا آرایه PV (آرایه PV مجموعه ماژول‌هایی هستند که به صورت سری یا موازی به یکدیگر متصل شده‌اند)
- ۲- جعبه تقسیم آرایه PV (با تجهیزات حفاظتی)
- ۳- کابل کشی DC
- ۴- کلید اصلی DC
- ۵- اینورتر
- ۶- کابل کشی AC
- ۷- سیستم اندازه‌گیری به همراه سیستم توزیع قدرت و اتصالات الکتریکی به شبکه

¹ Photovoltaic

Project Name:				
-				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	5 of 43

۱.۱. چگونگی عملکرد سلول‌های خورشیدی


واژه فتوولتائیک به معنی تبدیل مستقیم نور به انرژی الکتریکی با استفاده از سلول‌های خورشیدی است. نیمه‌هادی‌هایی مانند سیلیکون، گالیم آرسنید، کادمیم تلوراید یا دی‌سلنیدایندیوم مس در سلول‌های خورشیدی استفاده می‌شوند. سلول‌های خورشیدی کریستالی بیشترین سهم بازار را به خود اختصاص داده‌اند.

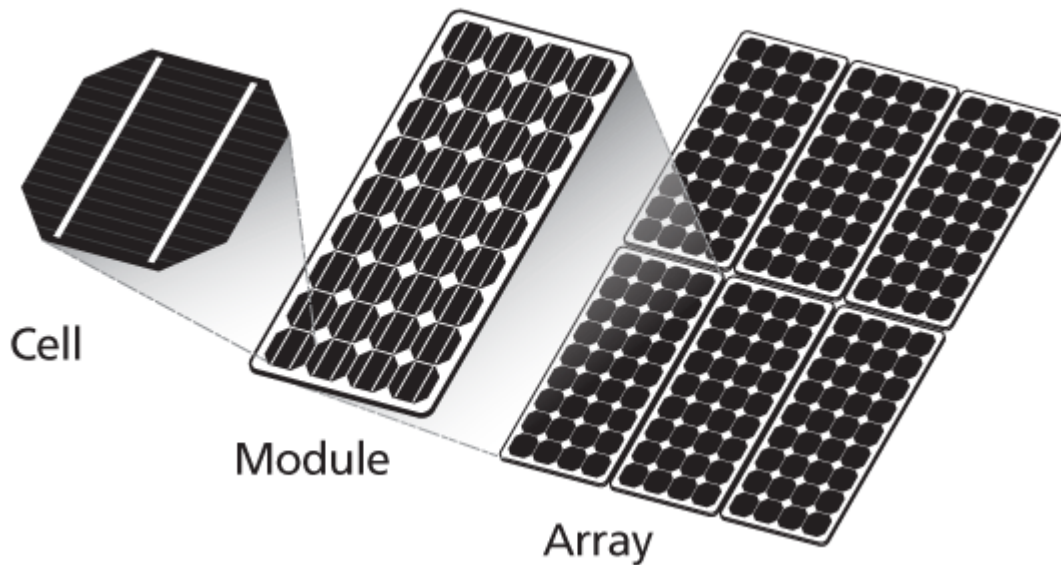
۱.۲. انواع سلول‌های خورشیدی تجاری

همانطور که می‌دانیم با توجه به سرعت روزافزون پیشرفت تکنولوژی، سلول‌های خورشیدی و ماژول‌های خورشیدی با استفاده از مواد اولیه و تکنولوژی‌های متفاوت پا به عرصه ظهور می‌گذارند. برخی از آنها به لحاظ اقتصادی به صرفه می‌باشند که از آنها به نام سلول‌ها و ماژول‌های خورشیدی تجاری نام می‌برند. برخی دیگر که هم‌اکنون به بلوغ تکنولوژی خود نرسیده‌اند و استفاده از آنها توجیه اقتصادی ندارد را ماژول‌های خورشیدی با تکنولوژی‌های نوین می‌نامند. در این بخش به بررسی سلول‌های خورشیدی تجاری پرداخته می‌شود. به صورت کلی پنل‌های خورشیدی به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

- سیلیکون کریستال:
 - مونوکریستال
 - پلی کریستال
- چند اتصالی (چندلایه)
- متمرکز کننده‌ها
- فیلم نازک (thin film):
 - سیلیکون آمورف
 - دی‌سلنیدس و ایندیوم گالیوم
 - کادمیوم تلوراید
 - دای
- پلیمری و ارگانیک

به صورت کلی هر جزء تولیدکننده برق در سیستم‌های فتوولتائیک سیلیکون کریستالی، سلول‌های خورشیدی می‌باشند که از اتصال سری، موازی و یا سری-موازی آنها پنل (ماژول) خورشیدی تولید می‌شود و از اتصال بین پنل‌های خورشیدی آرایه‌های خورشیدی ایجاد می‌شوند.

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
		DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	6 of 43



شکل ۲ سلول، ماژول و آرایه فتوولتائیک

۱.۳.۱. سیلیکون کریستالی


مهمترین ماده در سلول خورشیدی کریستالی، سیلیکون می‌باشد. بعد از اکسیژن این عنصر بیشترین عنصر روی زمین است. در حال حاضر به صورت خالص وجود ندارد اما در ترکیبات شیمیایی با اکسیژن در شکل کوارتز یا شن وجود دارد.

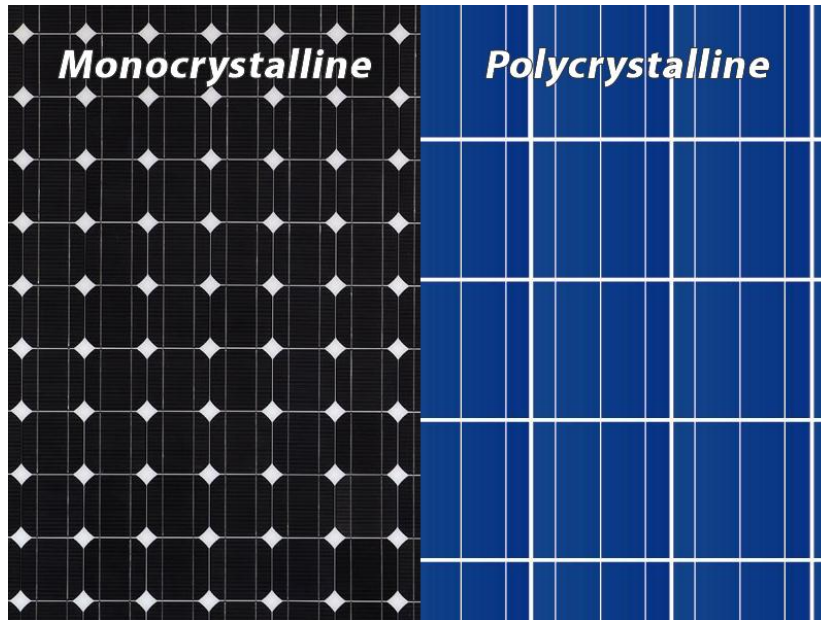
۱.۳.۱.۱. سلول‌های سیلیکونی تک کریستالی

این سلول‌ها دارای بازدهی ۱۵ تا ۲۳ درصد می‌باشند. بسته به اینکه چه مقدار مونوکریستال بریده شود گرد، نیمه گرد یا مربعی هستند. سلول‌های گرد ارزانتر از نیمه گرد و مربعی هستند زیرا مواد اولیه کمتری در ساخت آنها به کار برده می‌شود. علیرغم این، به ندرت در ماژول‌های خورشیدی استاندارد مورد استفاده قرار می‌گیرند زیرا وقتی در یک ماژول کنار هم باشند فضای غیرقابل استفاده‌ی زیادی خواهیم داشت که بازدهی ماژول را پایین می‌آورد.

۱.۳.۱.۲. سلول‌های سیلیکونی پلی کریستالی

بازده این سلول‌ها حدود ۱۳ تا ۲۰ درصد است. در مصارفی که ابعاد پنل و سلول‌های آن حائز اهمیت باشد می‌توان از ماژول‌های پلی کریستال استفاده نمود چراکه این پنل‌ها نسبت به نوع مونوکریستال ارزانتر بوده و کاهش هزینه‌های پروژه را در پی خواهند داشت. در حال حاضر سلول‌های خورشیدی کریستالی دارای ۲، ۳ و ۴ باسبار جمع‌آوری‌کننده جریان الکتریکی سلول بر روی آنها هستند که نوع ۴ باسبار به انواع دیگر ترجیح داده می‌شود و نوع ۲ باسبار فقط در کارخانه‌های غیر معتبر تولید می‌شود و راندمان پایینی نیز دارند. شکل ۳ تفاوت یک پنل با سلول مونوکریستال و پنل با سلول پلی کریستال را نشان می‌دهد.

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	7 of 43



شکل ۳ پنل مونوکریستال و پلی کریستال


۱,۳,۳. پوشش ضد انعکاس روی سلول‌های سیلیکون کریستالی

به دلیل نفوذ هرچه بیشتر نور به سلول‌ها از پوشش ضد انعکاس استفاده می‌شود که از جنس نیتريد سیلیکون یا دی‌اکسید تیتانیوم می‌باشد. این پوشش این اطمینان را می‌دهد که مقدار خیلی کمی از تابش خورشیدی در برخورد با ماژول خورشیدی انعکاس داده می‌شود و بیشترین مقدار آن جذب سلول خورشیدی می‌گردد. نیتريد سیلیکون همچنین روی کنش‌پذیری هر کریستال معیوب روی سطح اثر دارد. این پوشش (AR) رنگ طبیعی طوسی و یفرهای کریستالی را به آبی در سلول‌های پلی‌کریستال و آبی تیره یا مشکی در سلول‌های مونوکریستال تغییر می‌دهد. سلول‌های بدون AR اغلب برای نمای ساختمان‌ها استفاده می‌شود که در آنها تا مقدار ۳۰ درصد هدردهی انرژی خورشید در سلول مورد پذیرش است.

۱,۴. تکنولوژی سلول فیلم نازک

در این تکنولوژی از نیمه‌هادی‌های حساس به نور استفاده شده است که در لایه‌های نازک با قیمت پایین می‌باشد. سیلیکون آمورف، دی‌سلنید ایندیوم مس (CIS) و کادمیوم تلوراید (CdTe) به عنوان مواد اولیه استفاده می‌شوند. این سلول‌ها در درجه حرارت پایین‌تر در مقایسه با سلول‌های کریستالی تولید می‌شوند، ضخامت کمتری دارند و در تولید آنها هیچ محدودیتی برای سائز سلول وجود ندارد. شکل ۴ نمایی از یک نیروگاه با این تکنولوژی را نشان می‌دهد.

ماژول‌های فیلم نازک سیلیکون آمورف دارای بازدهی ۵ تا ۱۰ درصد، ماژول‌های CIS دارای بازدهی ۹ تا ۱۴ درصد و ماژول‌های CdTe دارای بازدهی تا ۱۲ درصد هستند و همه ظاهر یکپارچه‌ای دارند.

Project Name:				
-				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	8 of 43



شکل ۴ یک نیروگاه با سلول‌های فیلم نازک

۱.۵. مقایسه انواع و کاربردهای سلول‌های خورشیدی


برای سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه عموماً از ماژول‌های مونوکریستال و پلی‌کریستال استفاده می‌شود. بازدهی کمتر ماژول‌های پلی‌کریستال در مقایسه با قیمت کمتر آنها نسبت به مونوکریستال‌ها، کاربری آنها را در این سیستم‌ها برابر کرده است. نمونه‌های فیلم نازک کمتر استفاده شده‌اند.

ماژول‌های فیلم نازک از آنجا که ابعاد بزرگتری (در توان یکسان) نسبت به ماژول‌های کریستالی دارند، در سیستم‌های مستقل از شبکه در توان‌های نه چندان بالا و در سیستم‌های متصل به شبکه با ظرفیت پایین مورد استفاده قرار می‌گیرند. ماژول فیلم نازک معمولاً در جایی که درجه حرارت هوا بالاست، سایه و یا هوای ابری و نیمه ابری فراوان دارد و نیز محدودیت فضا وجود ندارد استفاده می‌شود.

جدول ۱ انواع ماژول‌های خورشیدی را با یکدیگر مقایسه می‌کند.

جدول ۱ حداکثر بازدهی ماژول‌های خورشیدی

جنس سلول خورشیدی	بازدهی آزمایشگاهی سلول (درصد)	بازدهی تولید سلول (درصد)	بازدهی تولید ماژول (درصد)
سیلیکونی تک کریستالی	24.7	21.5	16.9
سیلیکونی چند کریستالی	20.3	16.5	14.2
سیلیکونی نواری	19.7	14	13.1
سیلیکونی فیلم نازک کریستالی	19.2	9.5	7.9
سیلیکونی آمورف	13	10.5	7.5
سیلیکونی ریز آمورف	12	10.7	9.1

Project Name:				
-				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	9 of 43


11	14	19.5	CIS
9	10	16.5	کادمیوم تلورايد
27	27.4	39	نیمه هادی ۳-۵
16.8	18.5	21	ترکیبی HIT

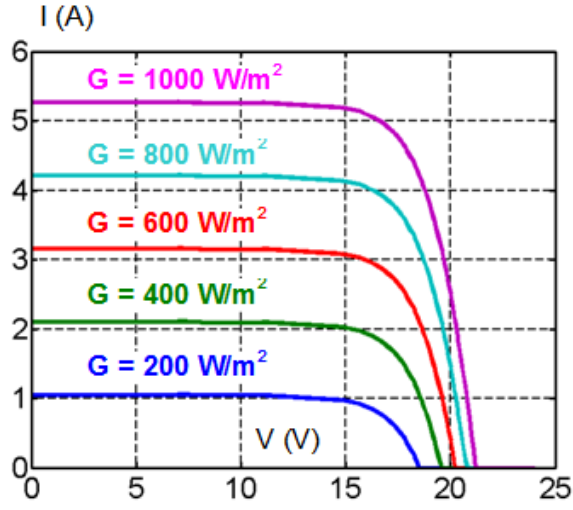
همچنین فضای مورد نیاز برای هر کیلووات انرژی الکتریکی با استفاده از چند نوع سلول در جدول ۲ آمده است.
جدول ۲ فضای مورد نیاز برای سیستم‌های فتوولتائیک

نوع سلول	فضای مورد نیاز برای یک کیلووات
مونوکریستال	۷ تا ۹ متر مربع
مونوکریستال (با کیفیت)	۶ تا ۷ متر مربع
پلی کریستال	۷/۵ تا ۱۰ متر مربع
CIS	۹ تا ۱۱ متر مربع
CdTe	۱۲ تا ۱۷ متر مربع
سیلیکون آمورف	۱۴ تا ۲۰ متر مربع

۱,۶. تأثیر تابش و درجه حرارت بر توان تولیدی سلول

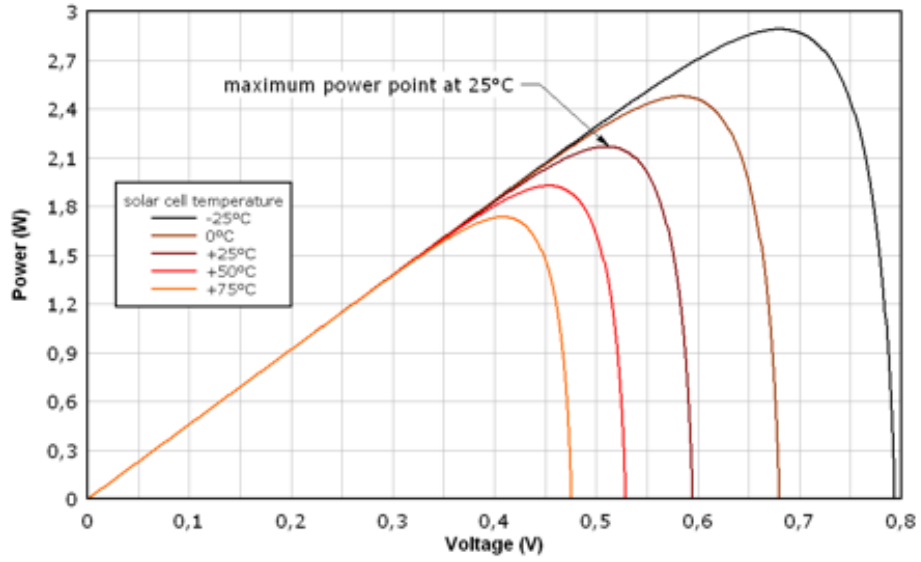
بازدهی سلول‌های خورشیدی وابسته به شدت تابش و درجه حرارت می‌باشد. در طول روز تأثیر شدت تابش به مراتب بیشتر از تأثیر درجه حرارت می‌باشد چون از سپیده‌دم تا ظهر و سپس غروب شدت تابش تغییرات عمده‌ای داشته و عامل تولید جریان الکتریکی در ماژول‌های خورشیدی است. یعنی زمانی که شدت تابش نصف می‌شود جریان سلول و در نتیجه برق تولیدی هم نصف خواهد شد. این موضوع در شکل ۵ برای یک پنل نمونه نشان داده شده است. در مقابل، ولتاژ سلول در تابش‌های مختلف تقریباً ثابت می‌ماند.

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	DOCUMENT NUMBER.		REV.	PAGE NO.
	D-EN-32/00		00	10 of 43




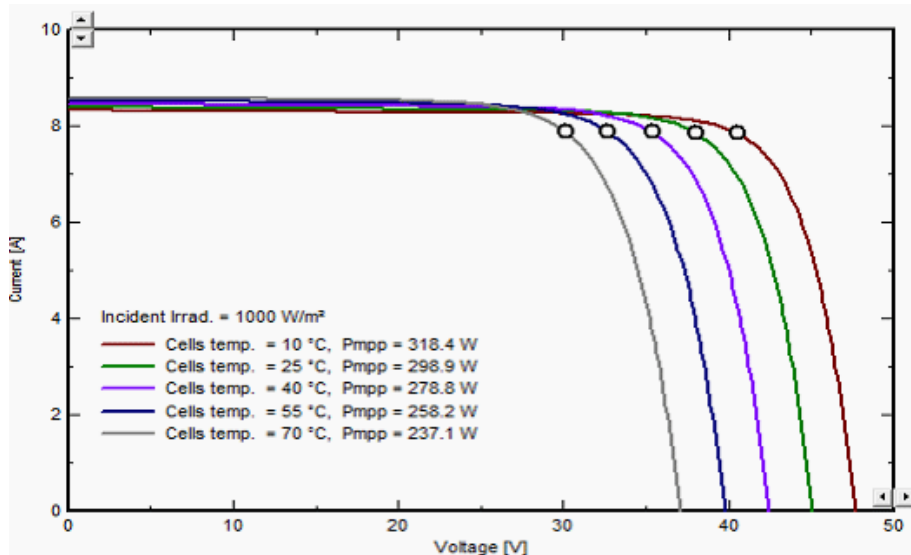
شکل ۵ تأثیر تابش بر درجه حرارت سلول

بازدهی سلول‌های خورشیدی کریستالی با افزایش درجه حرارت افت پیدا خواهد کرد (شکل ۶) زیرا با افزایش درجه حرارت، ولتاژ تولیدی افت می‌کند. از سوی دیگر، جریان تولیدی سلول با تغییر درجه حرارت تغییر چندانی نمی‌کند (شکل ۷). ضریب درجه حرارت توان در حدود -0.45% به ازای هر درجه سانتیگراد می‌باشد. در طول تابستان، توان خروجی یک ماژول در درجه حرارت‌های بالا می‌تواند تا 35% کمتر از STC باشد. برای کاهش دادن تلفات توان باید ماژول‌ها قادر باشند به راحتی حرارت را دفع کنند. در سلول‌های آمورف، این ضریب مقدار مثبتی می‌باشد به این معنی که با افزایش درجه حرارت، بازده بیشتر می‌شود.



شکل ۶ اثر دما بر توان تولیدی سلول

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	DOCUMENT NUMBER.		REV.	PAGE NO.
	D-EN-32/00		00	11 of 43




شکل ۷ اثر دما بر ولتاژ و جریان تولیدی سلول

۱,۷. طول عمر ماژول

به طور معمول هر ماژول استاندارد بین ۲۵ تا ۳۰ سال با راندمان قابل قبول کار خواهد کرد که شرکتهای تولید کننده معمولاً آنها را ۲۵ سال گارانتی می‌کنند. بسیاری از کارشناسان معتقدند که عمر ماژول‌ها (فارغ از میزان افت تولید) تا ۵۰ سال نیز خواهد بود.

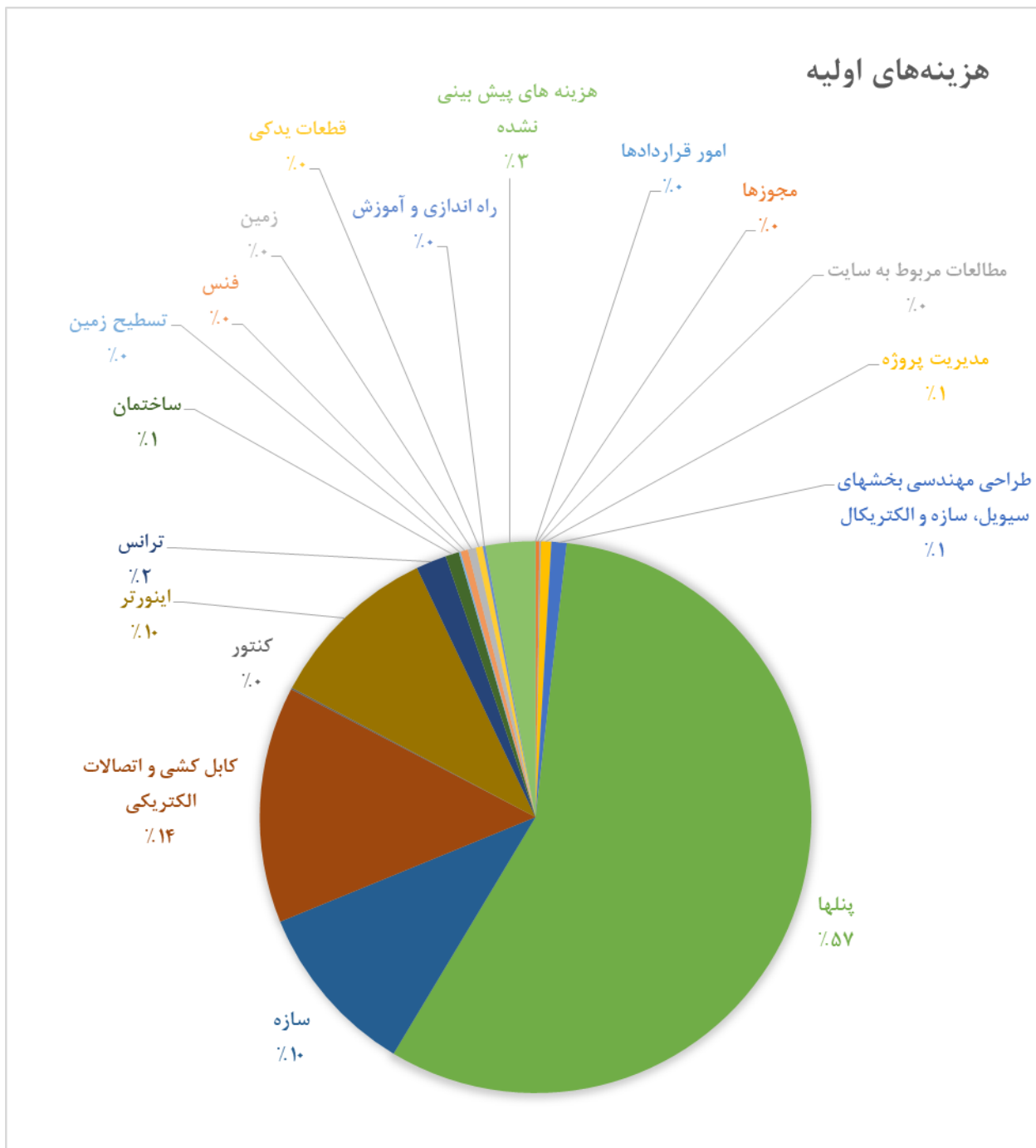
۱,۸. وضعیت تولید انرژی الکتریکی ماژول در هوای ابری

بسته به میزان ابری بودن هوا، میزان تولید ماژول تفاوت می‌کند. اما در شرایط ابری معمول و یا وجود مه خفیف، تولید توان به میزان ۵۰ درصد در ماژول‌های کریستالی و ۳۰ درصد در ماژول‌های فیلم نازک افت می‌کند. در شرایط ابری و مه به شکل توفان‌های زمستانی مقدار تولید کمتر خواهد بود.


Project Name:				
-				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	12 of 43

۱,۹. هزینه نیروگاه

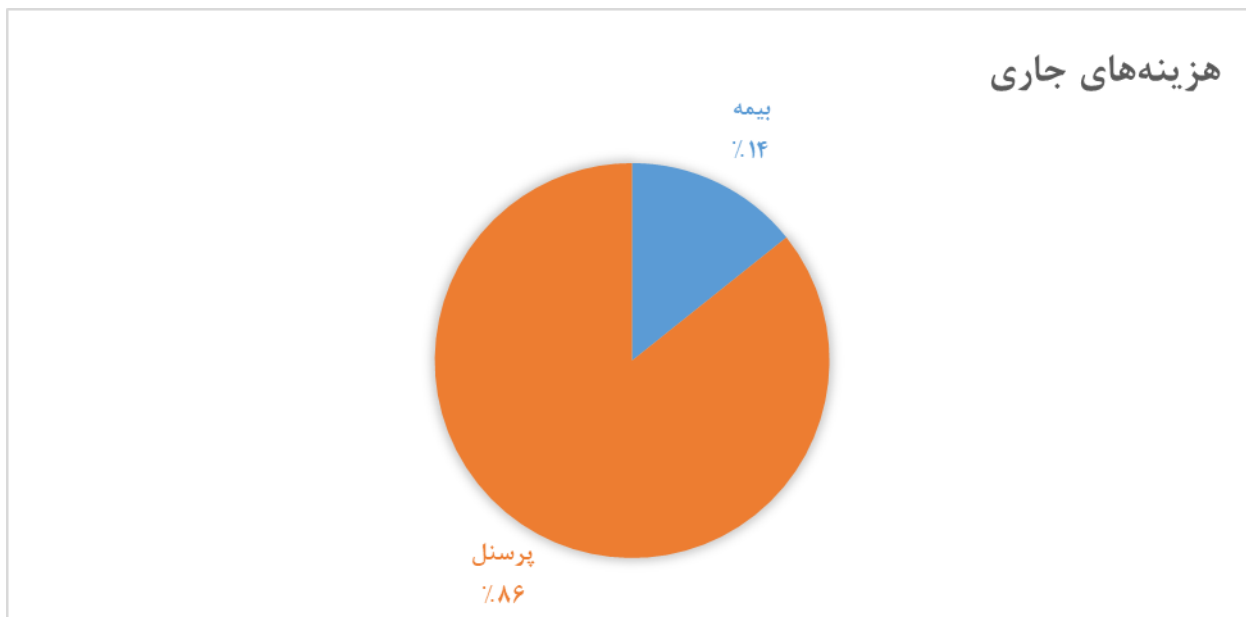
نمودار هزینه‌های اولیه نیروگاه در شکل ۸ می‌شود.




شکل ۸ هزینه‌های اولیه نیروگاه

Project Name: -				
Document Title: تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	13 of 43


هزینه‌های جاری سالانه نیروگاه شامل هزینه بیمه و پرسنل می‌باشد که در شکل ۹ آمده است.



شکل ۹ هزینه‌های جاری نیروگاه

<i>Project Name:</i>				
-				
<i>Document Title:</i>				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	14 of 43

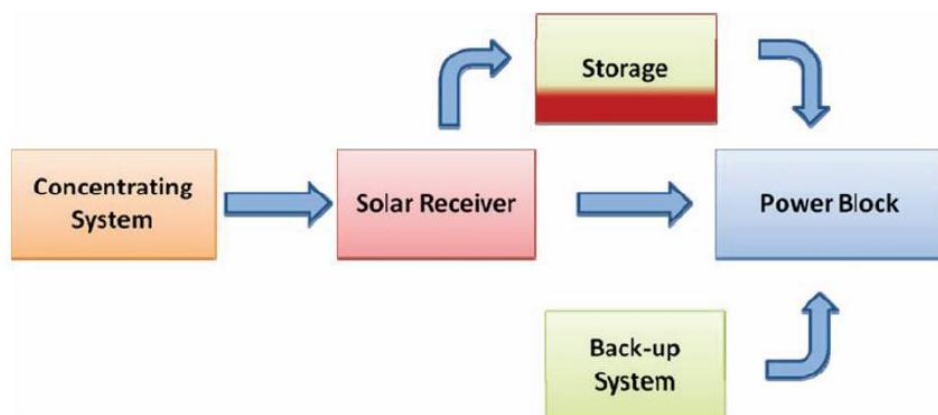
۲. فصل دوم
تکنولوژی CSP

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	15 of 43

۲,۱. انواع سیستم‌های CSP


سیستم‌های CSP بخش تابش مستقیم از تمام انرژی تابیده شده از خورشید را استفاده می‌کنند. برخلاف صفحات تخت فتوولتائیک، آنها نمی‌توانند تابشی که توسط ابرها، گردوخاک و سایر عوامل دیفیوز شده را مورد استفاده قرار دهند. این ویژگی آنها را مناسب برای مناطقی که بیشتر مواقع آسمان صاف و بدون ابری بدون گرد و خاک یا مه دارند نموده است.

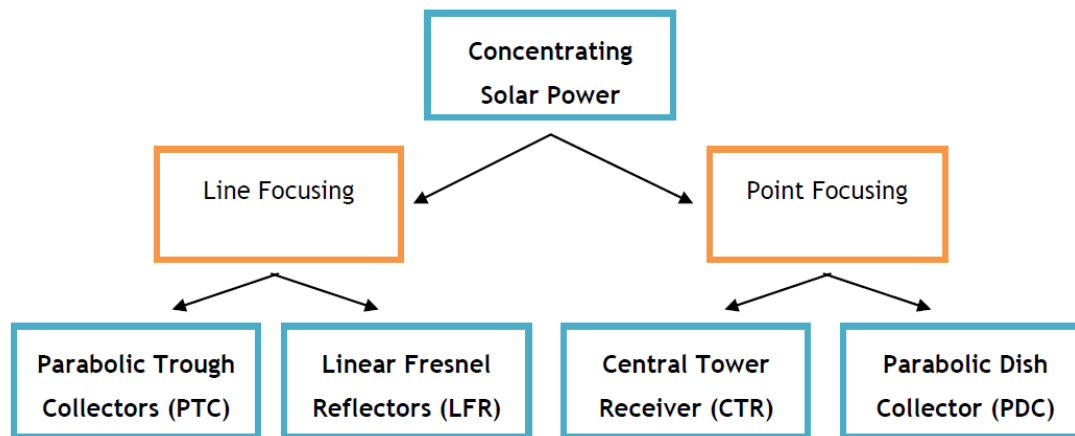
یک نیروگاه CSP از چهار جزء اصلی تشکیل شده که شامل یک سیستم متمرکز کننده، یک گیرنده خورشیدی، یک منبع ذخیره (که یک واحد تولید حرارت با سوخت فسیلی می‌تواند همراه یا جایگزین آن باشد) و یک واحد تولید برق هستند. این اجزاء از طریق یک سیال عامل مناسب و یا انرژی تابشی خورشید با هم در ارتباط هستند. وظیفه گیرنده خورشیدی جذب انرژی خورشیدی و انتقال آن به سیال انتقال حرارت (HTF) است. واحد تولید برق، گرما با دمای بالا را از سیال انتقال حرارت دریافت نموده و در عین حال نیز تانک ذخیره گرما، گرمای سیال انتقال حرارت را در خود ذخیره می‌کند. شماتیکی از اجزای سیستم CSP در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰ اجزای یک نیروگاه CSP

سیستم CSP به چهار شکل می‌تواند اجرا شود که این چهار شکل خود به دو گروه تقسیم می‌شوند: تکنولوژی‌هایی که نور خورشید را روی یک خط متمرکز می‌کنند و آنهایی که نور را در یک نقطه متمرکز می‌نمایند (شکل ۱۱).

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	16 of 43




شکل ۱۱ انواع مختلف تکنولوژی CSP

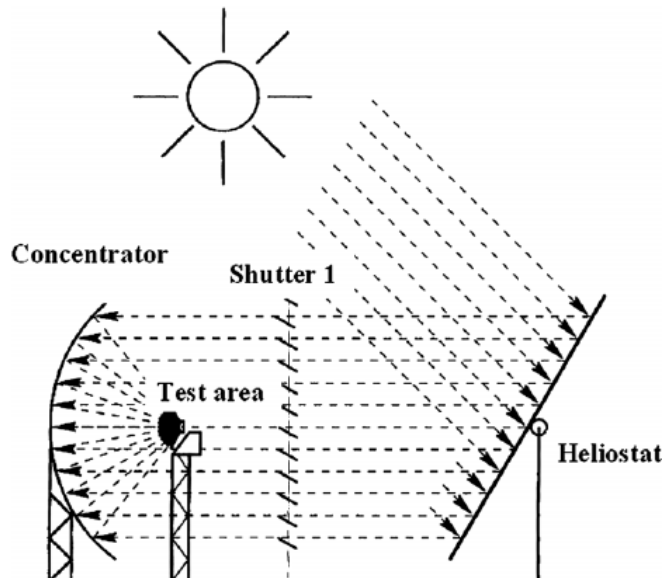
در جدول ۳ این چهار تکنولوژی اجرای سیستم CSP برای توصیف بهتر و مقایسه برخی اختلافات آنها تشریح شده‌اند.

جدول ۳ توضیح و مشخصات تکنولوژی‌های CSP

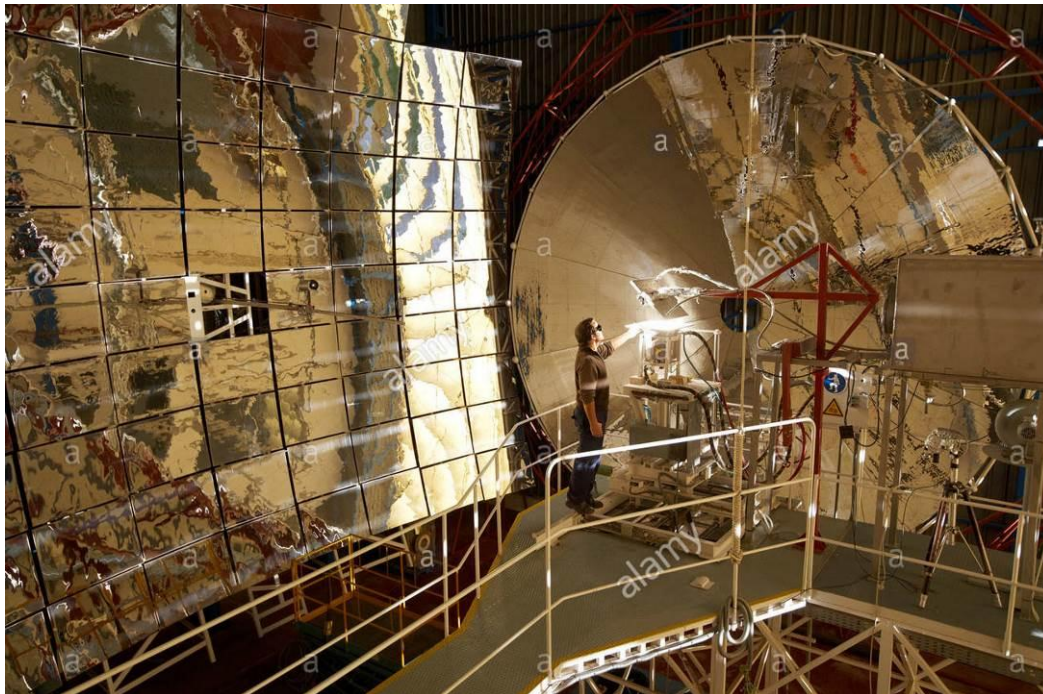
Technology	Operating temp. range (°C)	Relative cost	Concentration ratio	Technology maturity
PTC	50-400	Low	15-45	Very mature
LFR	50-300	Very low	10-40	Mature
CTR	300-2000	High	150-1500	Most recent
PDC	150-1500	Very high	100-1000	Recent

هر تکنولوژی خصوصیات منحصر به فردی دارد و در برخی موارد بخش خاصی از بازار را به خود اختصاص داده است. توسعه‌دهندگان تکنولوژی همواره روی تمام شکل‌های CSP کار می‌کنند. علاوه بر این موضوع که هدفی تجاری دارد، کوره‌های خورشیدی به میزان وسیعی در پروژه‌های تحقیقاتی کاربرد دارند. یک کوره خورشیدی شامل یک دیش سهموی است که در جهت ثابتی روی ساختمان یک آزمایشگاه بنا شده است و یک یا چند هلیوستات تابش خورشید را به آن در زاویه ثابتی منعکس می‌کنند. شکل ۱۲ و شکل ۱۳ یک نمونه از کوره خورشیدی تحقیقاتی را نشان می‌دهد.

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	17 of 43




شکل ۱۲ شماتیک عملکرد یک کوره خورشیدی



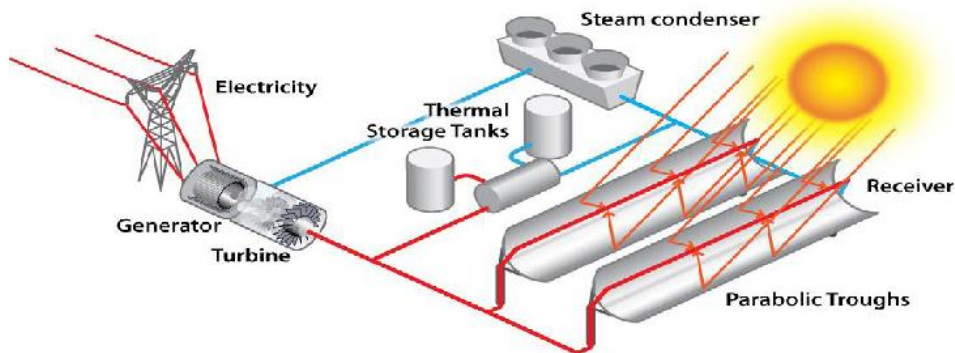
شکل ۱۳ نمونه‌ای از یک کوره خورشیدی برای تحقیقات آزمایشگاهی در Plataforma Solar de Almería

۲.۱.۱. نیروگاه سهموی خطی (PTC)

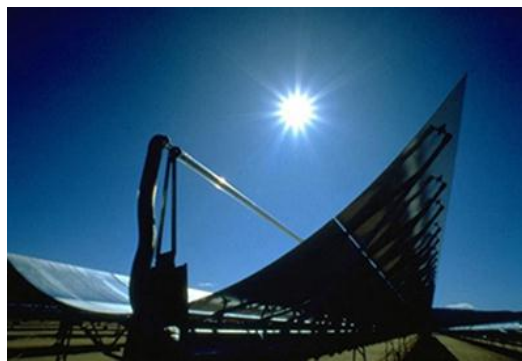
این جمع کننده ها امروزه متداولترین نوع از سیستم CSP هستند. از ابتدای دهه هفتاد میلادی این تکنولوژی برای تولید برق و انرژی گرمایی در حدود دمایی که مناسب برای فرآیندهای صنعتی است به کار گرفته می‌شد. در نیمه دوم دهه ۸۰ میلادی ۹ مرکز با تکیه بر این تکنولوژی و توان مجموع ۳۵۴ مگاوات در کالیفرنیا نصب شد (SEGS) که به نحوی رضایت بخش کار کرده‌اند و همچنان به کار خود ادامه می‌دهند.

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
		DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	18 of 43

سیستم‌های آینه سهموی تقریباً ۹۰ درصد از سیستم‌های CSP نصب شده فعلی را تشکیل می‌دهند. این سیستم‌ها انرژی خورشید را با استفاده از آینه‌هایی دو بعدی و سهموی متمرکز می‌کنند. مزرعه حاوی این آینه‌ها شامل چیدمانی وسیع از این متمرکزکننده‌هاست که به صورت ردیفی روی زمین نصب شده‌اند. ردیف‌های موازی متمرکزکننده‌ها در راستای شمال به جنوب قرار می‌گیرند و در طول روز از شرق تا غرب همزمان با خورشید می‌چرخند. نور خورشید روی لوله‌هایی که در روی خط کانون آینه‌های سهموی قرار دارند متمرکز می‌شود. نور منعکس و متمرکز شده بسیار شدید است و سیالی که از داخل لوله‌ها عبور می‌کند را تا دمای بالایی گرم می‌کند (تا حدود ۵۵۰ درجه سانتیگراد). سپس این سیال فوق‌العاده داغ برای گرم کردن آب و تولید بخار جهت استفاده در یک توربین-ژنراتور بخار معمولی بکار می‌رود و برق تولید می‌کند.




شکل ۱۴ شماتیک یک نیروگاه سهموی خطی



شکل ۱۵ آینه سهموی خطی

لوله‌های گیرنده که در خط کانون آینه‌ها قرار دارند از جنس فولاد ضدزنگ و دارای خواص سطحی ویژه‌ای برای جذب بهتر نور هستند. این لوله‌ها در داخل لوله‌های شیشه‌ای با خاصیت ضدانعکاس نور قرار دارند و فضای بین این دو لوله خلأ می‌شود. در شکل ۱۶ جمع‌کننده‌های نیروگاه SEGS در کالیفرنیا دیده می‌شود. در این شکل ساختار اجزای یک سیستم PTC شامل یک لوله جاذب، یک آینه سهموی و لوله‌های حاوی سیال انتقال حرارت دیده می‌شود.

تا چند سال گذشته بیشتر نیروگاه‌های PTC صنعتی از نوعی روغن به نام ترمینول بعنوان سیال عامل در مزرعه خورشیدی استفاده می‌کردند. علاوه بر هزینه‌های بالا، این روغن‌ها محدودیت‌هایی را برای بازده نیروگاه ایجاد می‌نمایند. در واقع این روغن‌ها قابل استفاده در دماهای بالاتر از ۳۹۰ درجه سانتیگراد نیستند که این نکته دمای ماکزیمم بخار ورودی به توربین را به ۳۷۰ درجه محدود می‌نماید. اما امروزه از نمک مذابی که ترکیبی از ۶۰ درصد سدیم نیترات و ۴۰ درصد پتاسیم نیترات است استفاده می‌شود. نسبت به ترمینول، نمک مذاب می‌تواند به دماهای بالاتری برسد و همچنین گرما را برای مدت بیشتری در خود ذخیره کند، اما از طرف دیگر باید در دمای بالاتر از ۲۹۰ درجه سانتیگراد نگه داشته شود تا به حالت مایع باقی بماند. بعبارت دیگر، باید اطمینان حاصل نمود که در شب هنگام این نمک در هیچ مسیر جریان فریز و سخت

Project Name:				
-				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	19 of 43

نمی‌شود. در مورد تکنولوژی جمع‌کننده‌های سهموی ناودانی تجربیات زیادی چه در مدل‌ها و چه در مقیاس صنعتی بدست آمده است.

در سال ۲۰۱۰ آمریکا مبلغ ۱,۴۵ میلیارد دلار در قالب یک وام برای نیروگاه Solana CSP Plant در نظر گرفت. این نیروگاه خورشیدی که از سیستم آینه‌های سهموی استفاده می‌کند ۲۸۰ مگاوات (ناخالص) برق را با استفاده از دو توربین ۱۴۰ مگاواتی تولید می‌نماید که این میزان برابر با برق مصرفی ۷۰ هزار خانه تخمین زده می‌شود. در شکل ۱۷ آینه‌های نیروگاه Solana دیده می‌شود.




شکل ۱۶ جمع‌کننده‌های نیروگاه SEGS



شکل ۱۷ نیروگاه Solana

در سال ۲۰۱۳ نیروگاه شمس در نزدیکی ابوظبی به بهره‌برداری رسید. شمس ۱ که ۱۰۰ مگاوات ظرفیت دارد از تکنولوژی سهموی خطی استفاده می‌کند و بدنبال آن شمس ۲ و ۳ نیز قرار است ساخته شوند. شکل ۱۸ این نیروگاه را نشان می‌دهد.

Project Name:				
-				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	20 of 43




شکل ۱۸ نیروگاه سهموی خطی شمس در ابوظبی

۲.۱.۲. منعکس کننده خطی فرسنل (LFR^۱)

منعکس کننده خطی فرسنل شباهت زیادی به تکنولوژی PTC دارد چراکه در آن نیز تابش خورشید روی یک گیرنده خطی متمرکز می‌شود. اما در این نوع، چیدمان درازی از آینه‌های تخت استفاده شده است که نور را روی یک گیرنده خطی متمرکز می‌کنند. این گیرنده روی برجی که در طول آینه‌ها ادامه دارد نصب شده است. نکته منفی این تکنولوژی در جدیدتر بودن آن نسبت به PTC است که تجربیات کمتری در مورد استفاده از آن وجود دارد، اما تحقیقات و نمونه‌های اولیه نشان می‌دهد که این تکنولوژی مزایای زیادی نسبت به PTC دارد. در واقع طراحی یک سیستم LFR بدلیل طبیعت تخت و انعطاف پذیر آینه‌های آن، از سوی دیگر سایه انداختن منعکس کننده‌ها روی هم باعث می‌شود که زمین بیشتری برای این سیستم نیاز باشد و همچنین ارتفاع برج گیرنده می‌بایست بالاتر رود.

یکی از نمونه‌های اولیه LFR در Plataforma Solar de Almeria (PSA) در اسپانیا ساخته شد (شکل ۱۹). این نمونه شامل آینه‌های منحنی، لوله جاذب و قسمت‌هایی برای تمرکز دادن مجدد نور است.

¹ Linear Fresnel reflector

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	DOCUMENT NUMBER.		REV.	PAGE NO.
	D-EN-32/00		00	21 of 43



شکل ۱۹ منعکس کننده خطی فرسل در Plataforma Solar de Almería


از مزایای دیگر این تکنولوژی نسبت به PTC هزینه سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری کمتر، عدم نیاز به جوش شیشه-فلز در انتهای هر تیوب گیرنده برای ایجاد خلأ بین دو تیوب، و عدم نیاز به اتصالات چرخشی است. مطالعات و تجربیات گذشته نشان داده است که این تکنولوژی از پتانسیل بالایی برای دستیابی به بازده بالاتر نسبت به PTC برخوردار است.

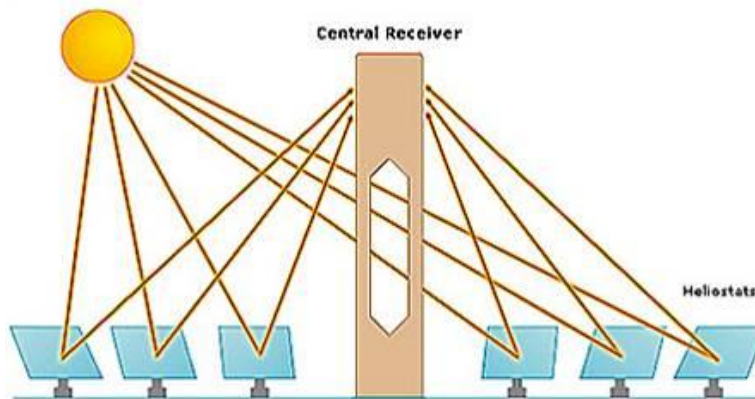
۲.۱.۳. برج گیرنده مرکزی (CTR)^۱

شکل زیر نحوه عملکرد یک برج گیرنده مرکزی را در یک نیروگاه خورشیدی از این نوع نشان می‌دهد. سیستم‌های برج گیرنده مرکزی سه بخش اصلی دارند: هلیوستات‌های روی زمین، یک برج و یک گیرنده مرکزی که در بالای برج قرار می‌گیرد. وظیفه هلیوستات‌ها انعکاس نور خورشید به سمت گیرنده مرکزی است. هر هلیوستات در دو بعد قادر به چرخش است، یکی در راستای شمال به جنوب و دیگری شرق به غرب، به گونه‌ای که خورشید را در طول روز و همچنین در طول سال تعقیب می‌کند. هر هلیوستات با یک سیستم کامپیوتری هدایت می‌شود که خورشید را دنبال نموده و به این طریق نوری که انعکاس می‌دهد را به بیشترین مقدار می‌رساند. این قابلیت دنبال کردن خورشید با چرخش حول دو محور، انرژی بیشتری را در طول روز نسبت به هلیوستاتی که صرفاً حول یکی از محورها می‌چرخد و یا کاملاً ثابت است تولید می‌کند. هلیوستات‌ها شامل آینه‌های شیشه‌ای منعکس‌کننده، یک سازه‌ی نگهدارنده و مکانیزم‌هایی برای چرخش هستند.

گیرنده نور خورشید را از هلیوستات‌ها می‌گیرد و آن را به یک سیال در حال چرخش در سیستم که معمولاً نمک مذاب است منتقل می‌نماید. در گیرنده، نمک مذاب گرم شده و به سمت تانک نمک داغ که نمک را تا حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد یا بیشتر در خود دارد می‌رود. از مخزن نمک داغ، سیال از طریق لوله‌هایی به سمت مبدل‌های حرارتی رفته و گرمای خود را به بخار می‌دهد و بخار ایجاد شده مجموعه توربین و ژنراتور را به حرکت در می‌آورد. گیرنده باید در ارتفاع خاصی بالاتر از هلیوستات‌ها قرار گیرد تا از اثر سایه و دیگر موانع کاسته و یا اجتناب شود.

¹ Central tower receiver

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	22 of 43




شکل ۲۰ شماتیک برج گیرنده مرکزی

توسعه نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از تکنولوژی برج گیرنده مرکزی از دهه هفتاد میلادی و همزمان با تکنولوژی PTC آغاز شد. در طی این سال‌ها مدل‌های مختلفی از آنها در کشورهای مختلف خصوصاً آمریکا، اسپانیا و اسرائیل استفاده و تست شده است.

نخستین تجربه این نیروگاه‌ها ساخت مراکزی با ۱۰ مگاوات توان در کالیفرنیا به نامهای Solar One و Solar Two بود. مرکز Solar One از سال ۱۹۸۲ تا ۱۹۸۸ در سرویس بود و شامل یک گیرنده خارجی می‌شد که از بخار آب استفاده می‌کرد. بخار آب می‌توانست مستقیماً یک توربین بخار را بچرخاند یا اینکه با چند مبدل حرارتی گرمای خود را به ذخیره‌ساز انرژی گرمایی که از روغن، ماسه و سنگریزه استفاده می‌کرد منتقل کند و بعداً از انرژی آن استفاده شود. پروژه بعدی یعنی Solar Two نسخه به روز شده‌ای از Solar One بود که از نمک مذاب بعنوان سیال انتقال حرارت بهره می‌برد. با این وجود این نیروگاه‌ها نتوانستند به نیروگاه‌هایی صنعتی در کالیفرنیا، آن گونه که PTC بود تبدیل شوند.

در نهایت پروژه Solar Tres بین سالهای ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸، با تجربه Solar Two و بعنوان یک نیروگاه در مقیاس صنعتی ساخته شد که از نمک مذاب استفاده می‌کرد و ۱۷ مگاوات برق تولید می‌نمود. این نیروگاه برای حصول اطمینان از بعضی تکنولوژی‌های جدید در این زمینه استفاده شد و بعدها بیشتر توسعه یافت و Gemasolar نام گرفت. این پروژه نخستین نیروگاه صنعتی با هلیوستات‌ها، برج مرکزی گیرنده، و نمک مذاب بعنوان گیرنده و ذخیره سازی انرژی بود و ۲۰ مگاوات توان داشت.


Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	23 of 43



شکل ۲۱ نیروگاه Gemasolar با تکنولوژی ذخیره انرژی با نمک مذاب

یکی از جنبه های مهم Gemasolar قابلیت ذخیره انرژی و نیز عملکرد در دماهای خیلی بالاست که باعث شده بتواند بازده بالاتری از دیگر سیستم های معمول داشته باشد. این سیستم می تواند بدون منبع طبیعی انرژی خود یعنی نور خورشید، تا ۱۵ ساعت برق تولید کند.


شکل ۲۲ پروژه نیروگاه های Ivanpah را در کالیفرنیا نشان می دهد که از سه برج مجزا تشکیل شده است و مجموعاً ۳۹۲ مگاوات (ناخالص) برق تولید می کند. ۱۷۳۵۰۰ هلیوستات در این نیروگاه استفاده شده است که هر کدام شامل دو آینه جمعاً به مساحت تقریباً ۱۴ متر مربع هستند.

Project Name:				
-				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	24 of 43



شکل ۲۲ نیروگاه Ivanpah

شکل ۲۳ نیروگاه خورشیدی ۱۱ مگاواتی PS10 در اسپانیا که از تکنولوژی برج گیرنده مرکزی استفاده می‌کند را نشان می‌دهد. این نیروگاه شامل ۶۲۴ هلیوستات است که هر کدام حدود ۱۲۰ مترمربع مساحت دارند. شکل ۲۴ نیز نیروگاه PS20 را با ظرفیت ۲۰ مگاوات نشان می‌دهد.

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
		DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	25 of 43



شکل ۲۳ نیروگاه ۱۱ مگاواتی PS10




شکل ۲۴ نیروگاه ۲۰ مگاواتی PS20

۲.۱.۴. دیش و موتور استرلینگ (PDC)

سیستم دیش و موتور استرلینگ از روش کاملاً متفاوتی استفاده می‌کند. بجز برای شستشوی آینه‌ها، آب یا بخاری در سیکل ترمودینامیکی آن استفاده نمی‌شود. این سیستم شامل یک آینه متمرکز کننده سهموی با قطر بزرگ و یک موتور برونسوز

¹ Parabolic dish concentrator

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
		DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	26 of 43

استرلینگ در کانون آینه است. متمرکزکننده شکلی شبیه به یک دیش ماهواره‌ای دارد. آینه سهموی (دیش) دائماً خورشید را تعقیب می‌کند و پرتوهای خورشید به کانون آن منعکس می‌شود. انرژی گرمایی خورشید برای به حرکت در آوردن یک موتور استرلینگ بکار می‌رود.

نور خورشید متمرکز شده یک سیال عامل را که در تماس با گیرنده است تا دمایی در حدود ۶۵۰ درجه سانتیگراد گرم می‌کند. انرژی گرمایی باعث حرکت موتور سیلندر و پیستونی به نام موتور استرلینگ می‌شود. پیستون موتور یک آهنربا را در داخل یک کوپل به جلو و عقب میراند و جریان برق AC تولید می‌کند. برای ماکزیمم نمودن توان خروجی، دیش توسط یک سیستم مکانیکی در دو محور به حرکت در می‌آید و خورشید را در طول روز دنبال می‌کند. از مزیت‌های این سیستم این است که زمین کمتری اشغال می‌کند و این زمین الزاماً نباید تخت باشد.

موتور استرلینگ یک موتور احتراق خارجی است که از سیکل ترمودینامیکی استرلینگ استفاده می‌کند. دلایل استفاده از این موتور به شرح زیر است:


- انرژی ورودی می‌تواند از طریق نور خورشید جمع‌آوری شده توسط دیش که در کانون دیش متمرکز شده وارد موتور شود.
- این سیکل از بازده نسبتاً بالایی برخوردار است.



شکل ۲۵ دیش و موتور استرلینگ

یکی از مشکلات این سیستم که هنوز به طور کامل حل نشده اتلاف حرارتی آن می‌باشد. بعضی تحقیقات صرفاً تست‌هایی برای کارکرد این سیستم در شرایط اتلاف حرارتی به صورت جابجایی و با گیرنده در شرایط بدون باد را گزارش کرده‌اند. چهار نمونه گیرنده به شکلهای مکعب، مستطیل، استوانه و نیم کره بررسی شده‌اند.

ابداعات جدید در زمینه تکنولوژی PDC موجب شده تا این تکنولوژی پربازده اما گران مقرون به صرفه باشد. با این وجود، این سیستم‌ها سازه‌های بسیار سنگین و گرانی دارند که باید خورشید را به دقت دنبال کنند تا بیشترین بازده را داشته

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
		DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	27 of 43

باشند. استفاده از موتورهای حرارتی سیکل‌های با میزان تبدیل انرژی بالا سبب شده که این سیستم‌ها بازده بالایی داشته باشند چراکه آنها نیازی به سیال انتقال حرارت ندارند.

جدا از جنبه‌های مثبت این تکنولوژی، یک بعد منفی آن این است که PDC براحتی قابلیت متصل شدن به محیط ذخیره انرژی گرمایی را ندارد، خصوصاً در پروژه‌های صنعتی بزرگ برای تولید برق در مقیاس صنعتی. بنابراین، شاید این تکنولوژی برای استفاده در مقیاس کوچک و استفاده برای همان مجموعه و یا اطراف مناسبتر باشد.

۲.۲. انتخاب سیستم CSP

مطابق نتیجه تمام تحقیقات و بررسی‌هایی که بر روی انواع سیستم‌های CSP بعمل آمد و با توجه به شرایط کشورمان، سیستم گیرنده برج مرکزی از میان سایر سیستم‌های CSP بعنوان بهترین گزینه برای احداث نیروگاه است. یکی از مهمترین فاکتورها در این تصمیم، توانایی تهیه آینه‌ها که اصلی‌ترین اجزای نیروگاه هستند می‌باشد. اگرچه تکنولوژی آینه‌های سهموی خطی بیشتر در دنیا مطرح است و نیروگاه‌های بیشتری از این نوع وجود دارد، اما عدم وجود یک سازنده مجرب این آینه‌ها به نوعی که بتواند کیفیت مناسبی از آنها را ارائه دهد سبب شده تا این تکنولوژی در اولویت قرار نگیرد. شرایط مشابهی نیز برای آینه دیش استرلینگ وجود دارد و تکنولوژی آینه خطی فرسند نیز هنوز در ابتدای راه و بیشتر در فاز تحقیقاتی قرار دارد.


۲.۳. ذخیره‌سازی انرژی گرمایی

ذخیره‌سازی انرژی گرمایی (TES¹) تکنولوژی است که انرژی گرمایی را با گرم کردن یا سرد کردن یک محیط ذخیره‌ساز ذخیره می‌کند به گونه‌ای که انرژی ذخیره شده می‌تواند در زمان دیگری برای کاربردهای گرمایش یا سرمایش یا تولید انرژی استفاده شود. سیستم‌های TES بویژه در ساختمان‌ها و در صنایع فرآیندی استفاده می‌شوند. در این کاربردها تقریباً نیمی از انرژی استفاده شده به شکل گرماست. این سیستم‌ها می‌توانند به بالانس عرضه و تقاضای انرژی در یک بازه روزانه، هفتگی و یا حتی فصلی کمک کنند. آنها همچنین می‌توانند به کاهش پیک تقاضا، مصرف انرژی، تولید مونوکسیدکربن و هزینه از طریق افزایش بازدهی سیستم‌های انرژی کمک کنند. بعلاوه، تبدیل و ذخیره انرژی‌های متغیر تجدیدپذیر به شکل حرارت می‌تواند سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید انرژی را افزایش دهد. TES خصوصاً در تولید برق در نیروگاه‌های CSP اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند، چراکه گرما می‌تواند در مواقعی که خورشید نمی‌تابد برای تولید برق استفاده شود. سه نوع سیستم TES وجود دارد:

۱- **ذخیره‌ساز گرمای محسوس:** که بر اساس ذخیره انرژی گرمایی با گرم کردن و یا سرد کردن یک ماده ذخیره‌ساز مایع یا جامد (نظیر آب، ماسه، نمک مذاب، سنگ و...) انجام می‌شود. ذخیره‌ساز گرمای محسوس نسبت به دو نوع دیگر ارزانتر است و در سیستم‌های خانگی، گرمایش مرکزی و نیازهای صنعت کاربرد دارد. با این وجود، به طور کلی ذخیره‌ساز گرمای محسوس نیازمند فضای زیادی است زیرا چگالی انرژی آن کم است (۳ تا ۵ برابر کمتر از انواع دیگر). بعلاوه، سیستم‌های ذخیره‌ساز گرمای محسوس نیازمند طراحی مناسبی برای تخلیه انرژی گرمایی در دماهای ثابت هستند.

۲- **ذخیره‌ساز گرمای نهان:** گرمای نهان انرژی است که توسط ماده جذب یا آزاد می‌شود در حالی که دمای ماده ثابت باقی می‌ماند. گرمای نهان انرژی مورد نیاز برای تبدیل یک ماده جامد به مایع یا مایع به گاز است. وقتی که در یک ماده از گرمای نهان و گرمای محسوس با هم استفاده شود ظرفیت ذخیره انرژی بالاتر است. امروزه تغییر فاز از

¹ Thermal energy storage

Project Name:				
-				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	28 of 43

جامد به مایع بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد و موادی که از این تکنولوژی استفاده می‌کنند مواد با تغییر فاز (PCM¹) نامیده می‌شوند.

۳- ذخیره ساز ترمو-شیمیایی (TCS²): در این نوع از ذخیره انرژی که کمتر توسعه یافته، ذخیره گرما به صورت ترمو-شیمیایی است که در واکنش‌های گرماگیر و گرماده برگشت‌پذیر اتفاق می‌افتد. مدل‌های گرمای محسوس و نهان تنها برای مدت‌های طولانی می‌توانند انرژی را ذخیره کنند، بنابراین فرآیندهای ترمو-شیمیایی روشی برای ذخیره انرژی در بازه زمانی کوتاه هستند. برخلاف چگالی انرژی بالایی که مواد ترمو-شیمیایی دارند، قیمت بالای این مواد سبب شده که هنوز در مراحل اولیه تحقیقات باقی بمانند.

سیستم‌های ذخیره انرژی گرمایی می‌توانند به صورت متمرکز یا گسترده باشند. کاربردهای متمرکز شامل گرمایش یا سرمایش مرکزی، کارخانه‌های صنعتی بزرگ، نیروگاه‌های تولید همزمان برق و حرارت، یا در نیروگاه‌های برق تجدیدپذیر (مانند CSP) هستند. سیستم‌های گسترده معمولاً در ساختمان‌های خانگی یا تجاری برای استفاده از انرژی خورشید برای گرمایش یا سرمایش آب و هوا کاربرد دارند. در هر دو مورد، TES می‌تواند باعث کاهش تقاضای انرژی در زمان پیک انرژی شود (پیک سایه).

عملکرد اقتصادی یک سیستم TES تا حد زیادی به کاربرد خاص آن و الزامات عملکردی آن بستگی دارد که شامل تعداد و فرکانس سیکل‌های ذخیره است. به طور کلی، سیستم‌های PCM و TCS گرانتر از ذخیره‌ساز گرمای محسوس هستند و از نظر اقتصادی تنها برای کاربردهای با تعداد سیکل بالا به صرفه هستند.

۲.۳.۱. نمک مذاب


نمک یک ماده معدنی و غالباً شامل سدیم کلراید است اما ممکن است دیگر آنیون‌ها مانند نیترات‌ها، کلرایدها، کربنات‌ها و سولفات‌ها را نیز شامل شود، اما نمک مذاب نمکی است در حالت مایع که بعنوان نوعی مایع یونی شناخته می‌شود. نمک‌ها می‌توانند در دسته‌های مختلف و بر اساس ترکیبات، نقطه ذوب و خواص ترموفیزیکی دسته‌بندی شوند. معروف‌ترین آنیون‌ها کلراید، فلوراید، سولفات، نیترات و کربنات هستند. ترکیب این مواد با موادی نظیر سدیم، پتاسیم، منیزیم و کلسیم، معمولترین نمک‌های موجود در معادن نمک صنعتی را نتیجه می‌دهد. در واقع نمک‌ها ترکیبات متنوعی دارند اما مرسوم‌ترین آنها که در معادن یافت می‌شوند شامل موارد زیرند:

- نمک‌های پایه کلراید نظیر سدیم کلراید (NaCl)، پتاسیم کلراید (KCl)، منیزیم کلراید (MgCl₂)، کلسیم کلراید (CaCl₂)
- نمک‌های پایه سولفات نظیر سدیم سولفات (Na₂SO₄)، کلسیم سولفات (CaSO₄)
- نمک‌های پایه کربنات نظیر کلسیم کربنات (CaCO₃)

مشخصات مطلوب برای یک نمک مذاب شامل فشار بخار پایین، هدایت حرارتی بالا، واکنش‌پذیری پایین، ظرفیت حرارتی خوب و هزینه پایین است. یک ویژگی منفی نمک‌ها این است که وقتی مستقیماً از تولید صنعتی بدست می‌آیند معمولاً گران هستند. خواص روغن‌ها نشان می‌دهد که همه مشابه هم هستند اما مقایسه دمای آنها با دمای نمک‌ها (جدول ۴) این نکته را نشان می‌دهد که همه دمای نسبتاً پایینی در مقابل نمک‌ها دارند و صرفاً به ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه محدود می‌شوند. نمک‌ها

¹ Phase change material

² Thermo-chemical storage

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
		DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	29 of 43

مقادیر متنوعتری در دماهای گرم و سرد، هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی حجمی دارند که این امر امکان استفاده از آنها در بازه‌های مختلف دمایی را بسته به اندازه نیروگاه خورشیدی، میزان تقاضا و توان خروجی مورد نیاز فراهم می‌کند. به طور کلی خواص نمک‌ها بهتر به شرایط و کاربردهای مختلف منطبق می‌شود و هدایت حرارتی میانگین و ظرفیت حرارتی حجمی آنها نیز به طور قابل توجهی بالاتر از روغن‌هاست، به این معنی که آنها از قابلیت بهتری برای هدایت حرارت و تجمع آن به میزان بالاتر برخوردارند، خواصی که برای یک سیال انتقال حرارت یا ذخیره ساز انرژی در سیستم CSP بسیار پراهمیت هستند.


جدول ۴ نمک‌های ذخیره حرارتی و خواص آنها

سدیم کلراید (جامد)	سدیم مایع	نمک‌های کربنات	نمک‌های نیترات	نمک‌های نیتريد	ماده ذخیره‌ساز
200	270	450	265	250	دمای سرد ($^{\circ}C$)
300	530	850	565	450	دمای گرم ($^{\circ}C$)
1700	850	2100	1870	1825	چگالی متوسط (kg / m^3)
1.0	71.0	2.0	0.52	0.57	هدایت حرارتی متوسط ($W / m.K$)
1.3	1.3	1.8	1.6	1.5	ظرفیت حرارتی متوسط ($kJ / kg.K$)
60	80	430	250	152	ظرفیت حرارتی حجمی (kWh / m^3)

هر چهار تکنولوژی استفاده از CSP به همراه گزینه‌های معمول برای سیال انتقال حرارت و ذخیره‌سازی قابل استفاده در آنها در جدول ۵ آمده‌اند. مطابق تجربه نیروگاه Gemasolar که صرفاً از نمک مذاب استفاده می‌کند، استفاده از نمک مذاب بعنوان سیال انتقال حرارت و ذخیره‌ساز انرژی خوبی را ارائه داده است. امروزه تنها گزینه اقتصادی برای ذخیره انرژی در بازه‌های طولانی (بین ۸ تا ۱۵ ساعت) نمک مذاب است که تطابق بهتری با نیاز بازار مصرف برق برای یک نیروگاه ایجاد می‌کند.

جدول ۵ گزینه‌های معمول مورد استفاده برای سیال انتقال حرارت و ذخیره‌ساز انرژی در تکنولوژی‌های CSP


گزینه‌های قابل استفاده	تکنولوژی CSP
PTC-oil: روغن بعنوان HTF و نمک مذاب برای ذخیره‌سازی	سه‌موی خطی (PTC)
PTC-SHS: بخار سوپر هیت بعنوان HTF	
PTC-MS: نمک مذاب بعنوان HTF و ذخیره‌سازی	
Fresnel SaS: بخار اشباع بعنوان HTF	آینه خطی فرسنل (LFR)
Fresnel SHS: بخار سوپر هیت بعنوان HTF	
CTR-SaS: بخار اشباع بعنوان HTF	برج گیرنده مرکزی (CTR)
CTR-SHS: بخار سوپر هیت بعنوان HTF	
CTR-MS: نمک مذاب بعنوان HTF و ذخیره‌سازی	

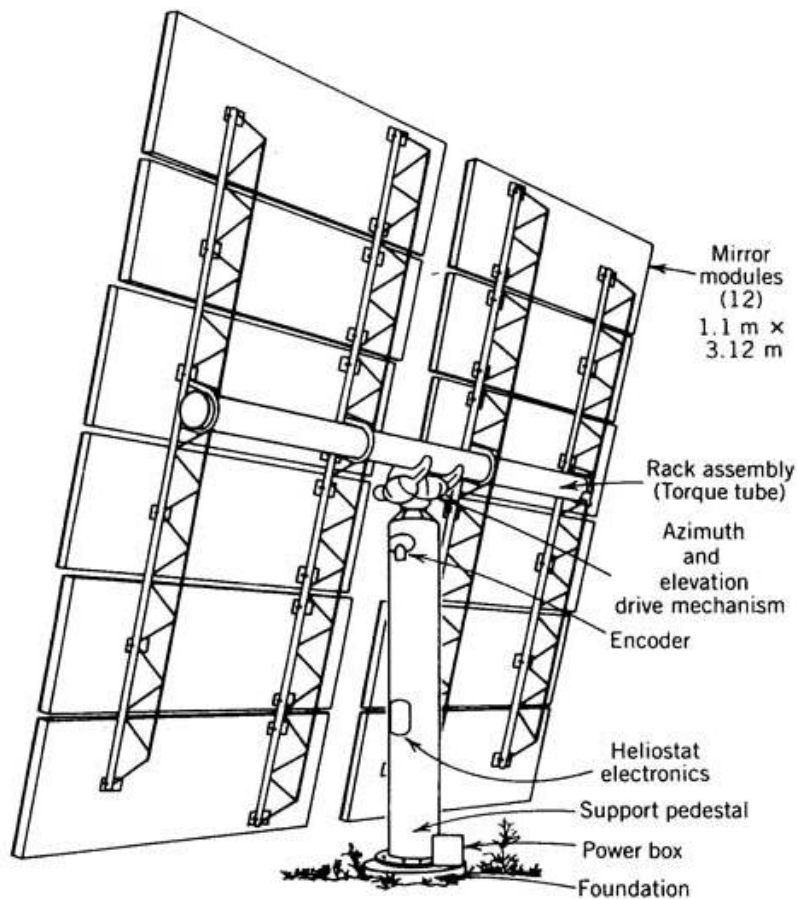
Project Name:				
-				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	30 of 43

CTR-AR: هوا با فشار محیط برای HTF و سیکل رانکین	
CTR-GT: هوای فشرده برای HTF و سیکل برایتون	
CTR-SC: سیکل فوق‌بحرانی	
CTR-CC: هوای فشرده برای HTF و سیکل ترکیبی	
PDC: هلیوم یا هیدروژن در سیکل استرلینگ	دیش سهموی (PDC)

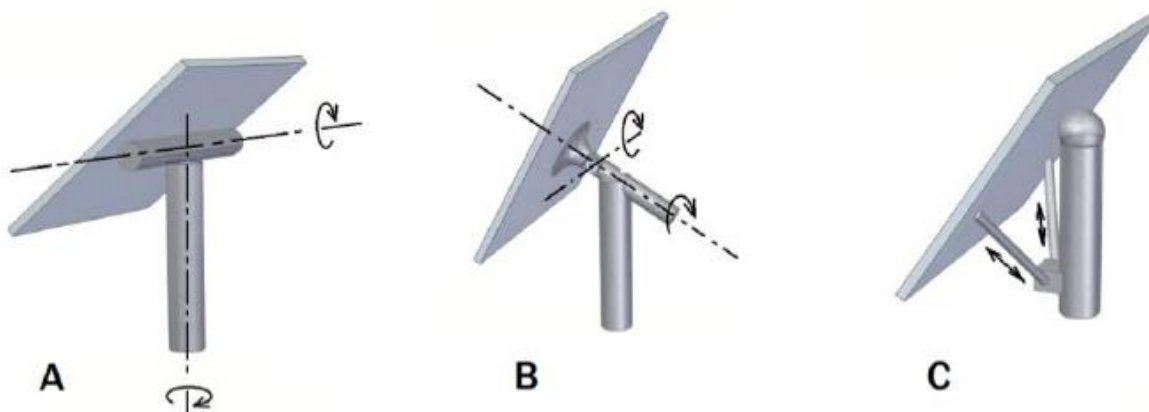
۲,۴. هلیوستات

هلیوستات یک آینه متحرک مکانیکی است که در سیستم‌های برج گیرنده خورشیدی استفاده می‌شود (شکل ۲۶). هزینه هلیوستات بخش مهمی از هزینه کلی نیروگاه را تشکیل می‌دهد. هلیوستات‌ها ممکن است بسته به نحوه سوار شدن actuator به دسته‌های سری یا موازی دسته‌بندی شوند. در نوع سری actuatorها مانند یک ربات سری پشت سر هم وصل شده‌اند. محرک Azimuth elevation یا Az-El (شکل ۲۷ a) و همچنین نوع جدید هلیوستات target aligned (شکل ۲۷ b) از این نوع هستند. مزیت این طرح در سادگی و کنترل راحت آن است و عیب آن کاهش قابلیت اطمینان آن می‌باشد. دسته دیگر هلیوستات‌ها موازی هستند که حداقل دو actuator همزمان متصل به ماژول آینه و زمین هستند (شکل ۲۷ c). مزیت این طرح افزایش قابلیت اطمینان آن است. اما کنترل آن باید به گونه‌ای صورت گیرد که حلقه‌های بسته در مکانیزم را کنترل نماید (چون بیش از یک مسیر از زمین به آینه وجود دارد. نوع استاندارد طراحی، مدل Az-El است و تنها مدلی که در پروژه‌های واقعی بزرگ استفاده می‌شود همین مدل است. مدل هلیوستات target aligned از نظر اپتیکی این مزیت را دارد که چگالی میدان هلیوستات بیشتری دارد. اما یک لولای بیشتر ممکن است هزینه هلیوستات را بالا ببرد.

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
		DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	31 of 43




شکل ۲۶ یک هلیوستات معمول با قسمت‌های مختلف آن



شکل ۲۷ سه مکانیزم برای هلیوستات (A Azimuth-Elevation (B Target aligned (C هلیوستات موازی

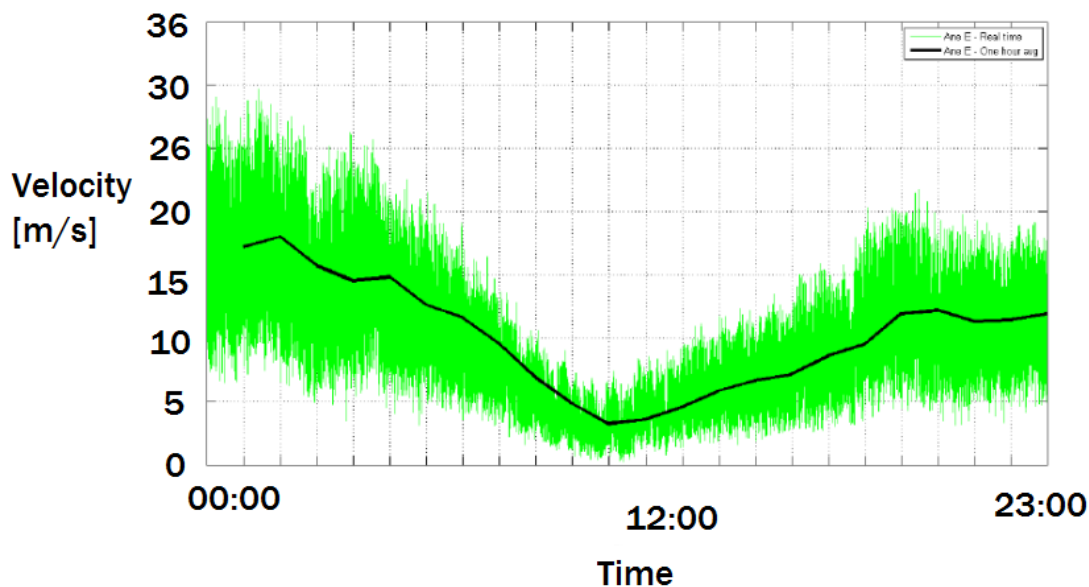
نوع Az-EI نخستین بار در کوره خورشیدی ساخته شده در دهه ۱۹۵۰ در فرانسه ساخته شد. این هلیوستات‌ها با مساحت ۴۵ متر مربع با محرک‌های Az-EI بودند و مفهومی کاملاً مشابه هلیوستات‌های استفاده شده در نیروگاه‌های برج خورشیدی از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۲ داشتند.

در مورد اندازه آینه برای هر هلیوستات، اندازه‌های مختلفی پیشنهاد شده است و در واقع تنها تفاوت اصلی هلیوستات‌های ساخته شده فعلی نیز همین پارامتر است. طراحی یک هلیوستات باید اهداف زیر دنبال شود:

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	32 of 43

- ضریب انعکاس بالا
- دقت اپتیکی بالا
- دقت ترکیب بالا
- سازه مقاوم


حضور بارهای ناشی از باد شدیداً هزینه هلیوستات را بالا می‌برد زیرا سازه آن باید به اندازه‌ای مقاوم باشد که در برابر نیروی باد پایدار بماند. مسئله نیروی باد می‌تواند به دو قسمت تقسیم شود: ابتدا نیروی باد سازه نگهدارنده آینه را منحرف کرده و کیفیت اپتیکی نور منعکس شده را پایین می‌آورد که این موضوع به مسئله صلبیت معروف است. دوم، بارهای ناشی از باد ممکن است به سازه آسیب بزنند، خواه بدلیل بادهای ناگهانی شدید که باعث شکستگی استاتیک می‌شوند و خواه شکستگی ناشی از خستگی که در اثر نیروهای سیکلی باد اتفاق می‌افتد. این مسئله به بحث دوام معروف است. بعلاوه، از آنجا که نیروی باد متغیر است (شکل ۲۸) بادهای متغیر باعث ایجاد ارتعاش می‌شوند و این موضوع دقت کنترل هلیوستات را کاهش می‌دهد.



شکل ۲۸ تغییرات سرعت باد روی هلیوستات، داده برداری توسط بادسنج Google در Tracy در کالیفرنیا، ۲/۷۵ متر بالای سطح زمین. منحنی سبز سرعت لحظه‌ای و منحنی سیاه مقدار میانگین آن در یک ساعت است.

پارامتر دیگری که باید مد نظر قرار گیرد انبساط حرارتی مواد استفاده شده در سازه است. از آنجا که انحراف‌های کوچک آینه (بالای ۲ میلی رادیان) باعث انحراف قابل توجه می‌شود، انتخاب متریال باید با دقت انجام شود.

شکل ۲۹ نمای جلویی و عقبی یک طراحی معمول هلیوستات که در نیروگاه PS-10 اسپانیا استفاده شده را نشان می‌دهد.

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
		DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	33 of 43



شکل ۲۹ نمای پشت و جلوی هلیوستاتی با ۱۲۱ متر مربع مساحت آینه در نیروگاه PS10 اسپانیا

۲.۵. گیرنده مرکزی

گیرنده‌های خورشیدی که در بالای برج مرکزی نصب می‌شوند می‌توانند به دو دسته زیر تقسیم شوند:


- نوع خارجی
- نوع حفره‌ای^۱

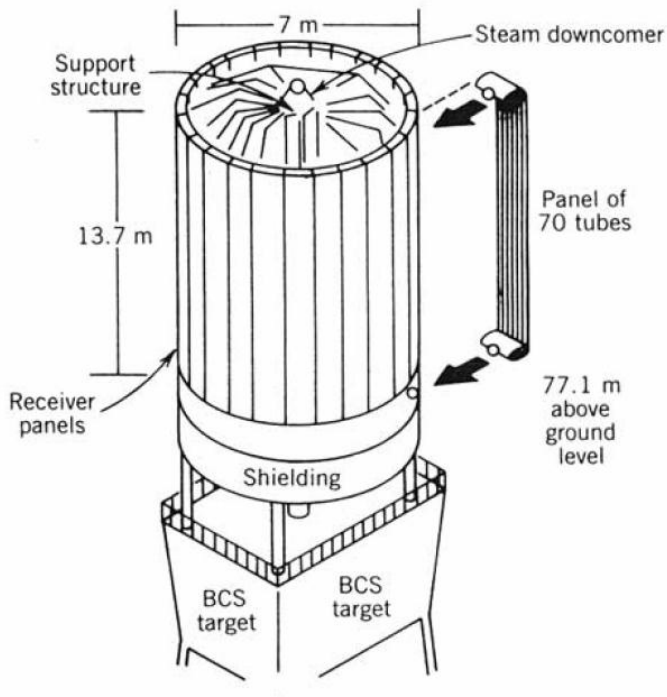
گیرنده استفاده شده در نیروگاه Solar One از نوع خارجی است که در شکل ۳۰ a نشان داده شده است. این گیرنده در بالای برج قرار دارد و شامل ۲۴ پنل است (قطر گیرنده ۷ متر می‌باشد). ۶ پنل برای پیش گرم کردن آب و ۱۸ پنل برای تولید بخار استفاده می‌شوند. گیرنده Solar two نیز از نوع خارجی بوده و در شکل ۳۱ (چپ) نشان داده شده است. گیرنده‌های خارجی عموماً نسبت ارتفاع به قطر ۱:۱ تا ۲:۱ دارند. به منظور کاهش افت حرارت، معمولاً گیرنده به گونه‌ای طراحی می‌شود که مساحت آن حداقل باشد. اما حداقل مساحت گیرنده توسط بیشترین دمای کاری لوله‌های مبدل و هدایت حرارتی سیال انتقال حرارت (برای دفع حرارت) تعیین می‌شود تا سیال انتقال حرارت بیش از حد گرم نشود. حد پایین مساحت گیرنده می‌تواند با استفاده از لوله‌های با تحمل دمای بالاتر یا با استفاده از سیال انتقال حرارت با هدایت حرارتی بهتر کاهش یابد. سیال انتقال حرارت شامل آب/بخار، روغن‌های مصنوعی، سدیم مایع یا نمک‌های مذاب است که از میان آنها نمک‌های مذاب و سدیم مایع قابلیت بهتری برای دفع حرارت دارند.

یک مثال از یک گیرنده حفره‌ای در شکل ۳۰ b دیده می‌شود. گیرنده حفره‌ای نیروگاه PS10 نیز در شکل ۳۱ (راست) آورده شده است. شار رسیده از مزرعه هلیوستات از یک دیافراگم (تقریباً یک سوم تا یک دوم سطح مقطع جذب کننده داخلی) گذشته و روی سطوح جذب کننده که دیواره‌های حفره را تشکیل می‌دهند منعکس می‌شود. اندازه حفره کمترین میزان ممکن استفاده می‌شود تا افت‌های کانوکشن و تشعشع را کاهش دهد.

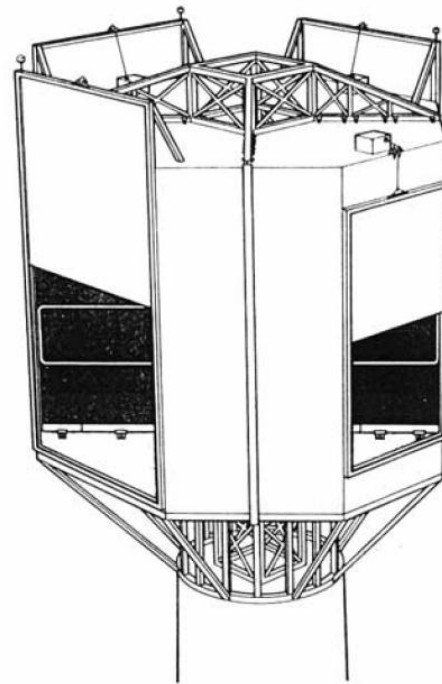
اصلی‌ترین عامل محدود کننده طراحی گیرنده، شار حرارتی است که می‌تواند از سطح گیرنده جذب شود و به سیال انتقال حرارت منتقل شود بدون اینکه دیواره‌های گیرنده و سیال انتقال حرارت داخل آن را بیش از حد گرم کند. دو موضوع مهم دیگر گرادیان دماها در طول پنل‌های گیرنده و گرم و سرد شدن هر روز و پریودیک تیوب‌های گیرنده هستند.

¹ Cavity-type

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
		DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	34 of 43




(a)



(b)

شکل ۳۰ (a) گیرنده خارجی (b) گیرنده حفره‌ای

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
		DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	35 of 43



شکل ۳۱ چپ: گیرنده خارجی نیروگاه Solar two. راست: گیرنده حفره‌ای نیروگاه PS10

۲.۵.۱. توان تولیدی توربین با ذخیره‌سازی انرژی


شرایط نیروگاه در حالتی که ذخیره‌سازی داریم به گونه‌ای است که توربین یا در حال کار با توان ثابت است و یا خاموش می‌شود. بنابراین بازده بدست آمده از قسمت قبل همواره ثابت است و در کد وارد می‌شود.

کد ابتدا یک عدد را برای ساعات ذخیره‌سازی در نظر می‌گیرد و سپس بر اساس آن توان توربین مناسب را در تمام روزهای سال محاسبه می‌نماید. در نهایت از میان ۳۶۵ توان توربین محاسبه شده، بیشترین میزان آن انتخاب می‌گردد و در محاسبات تعیین قیمت استفاده می‌شود.

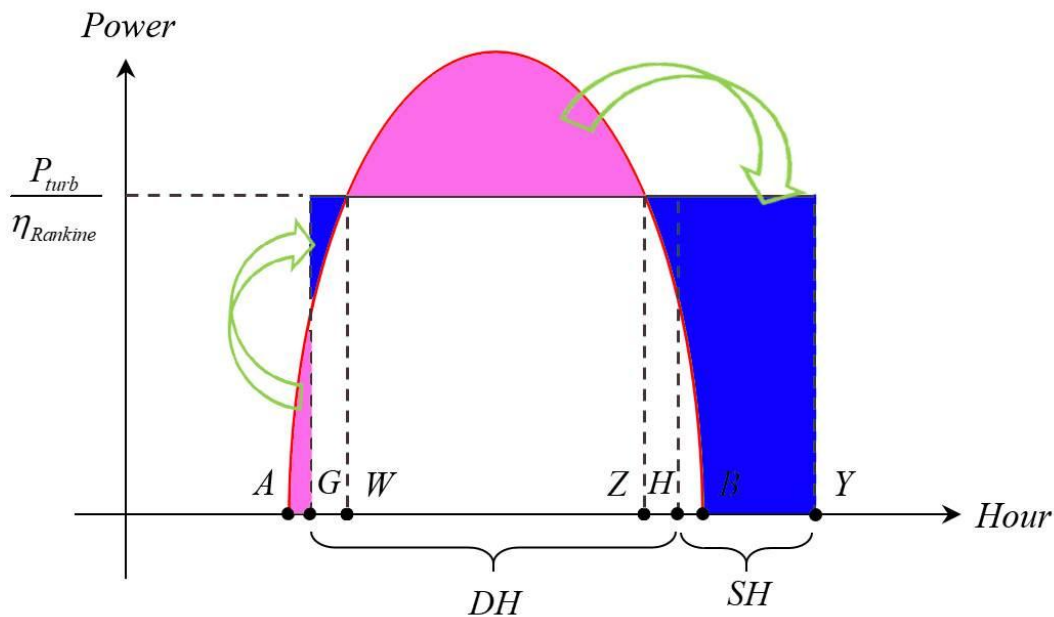
نمک از لوله‌های گیرنده برج عبور می‌کند و به مخزن نمک می‌رسد. سپس این نمک برای گرم کردن آب توربین استفاده می‌شود. شکل ۳۲ نحوه محاسبه توان توربین را در یک روز فرضی از سال نشان می‌دهد. منحنی قرمز نشان دهنده توان رسیده به گیرنده برج، از طلوع خورشید در زمان A تا غروب خورشید در زمان B است. فرض بر این است که افت حرارت از ایزولاسیون لوله‌ها ناچیز باشد. خط افقی که منحنی توان رسیده به برج را قطع کرده نیز توان مورد نیاز توربین است.

با استفاده از سیستم ذخیره‌سازی، در ابتدای صبح که هنوز توان تابش خورشید به حدی نیست که بتواند توربین را به حرکت درآورد، نمک در برج به چرخش درآمده و پیش گرم می‌شود. سپس زمانی که توان رسیده به برج به حدی برسد که بتواند توربین را به حرکت درآورد، توربین شروع به کار می‌کند. این اتفاق در نقطه G رخ می‌دهد. در واقع انرژی ناحیه ارغوانی رنگ از زمان A تا G به ناحیه آبی رنگ G تا W منتقل شده است.

با نزدیک شدن به اواسط روز، توان رسیده به برج از توان مورد نیاز توربین نیز فراتر می‌رود. این مقدار مازاد، قسمت ارغوانی رنگ بالای خط توان مورد نیاز توربین است. این انرژی در مخزن گرم ذخیره می‌شود. پس از گذشتن از ظهر، توان برج کاهش یافته تا جایی که از توان مورد نیاز توربین کمتر می‌شود (نقطه Z). در اینجا از نمک ذخیره شده برای کمک به توان برج استفاده می‌شود. سپس در غروب (زمان B) توان برج به صفر می‌رسد و در اینجا کاملاً از نمک استفاده می‌گردد. اگر نقطه H را به گونه‌ای انتخاب کنیم که ناحیه بالای منحنی قرمز از Z تا H برابر ناحیه پایین منحنی از H تا B باشد، تعداد ساعات از H تا Y معرف ساعات ذخیره‌سازی انرژی است و انرژی آن برابر انرژی ناحیه ارغوانی در بالای خط افقی توان مورد نیاز توربین خواهد بود. در واقع سیستم ذخیره‌سازی نمک باعث شده که در شکل ۳۲، تمام نواحی ارغوانی به نواحی آبی منتقل شوند.

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	DOCUMENT NUMBER.		REV.	PAGE NO.
	D-EN-32/00		00	36 of 43

محاسبات فوق در تمام روزهای سال توسط کد انجام می‌شود. از نقطه G تا نقطه H ساعاتی هستند که در آنها حداقل بخشی از نمک آمده از برج مستقیماً به سمت توربین می‌رود. این ساعات ساعات تولید مستقیم نام گرفته و با DH در کد نشان داده شده‌اند. از نقطه Z تا نقطه Y نیز ساعاتی هستند که از ذخیره نمک استفاده شده و SH نام گرفته‌اند.




شکل ۳۲ نحوه محاسبه توان توربین و ساعات ذخیره‌سازی و تولید مستقیم

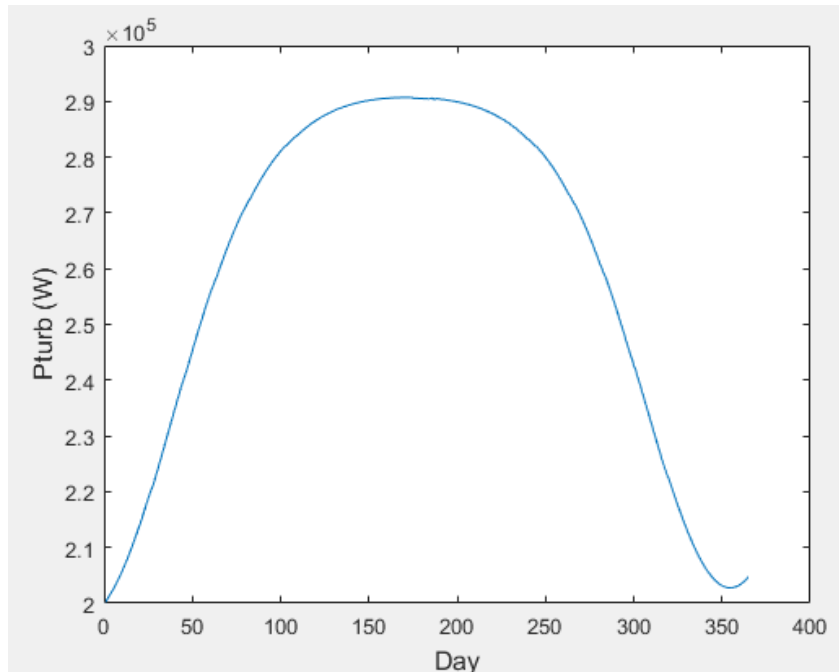
همانگونه که گفته شد، الگوریتم کد در این قسمت به این ترتیب است که ابتدا یک عدد، مثلاً ۴ ساعت، برای تعداد ساعات ذخیره سازی یا SH تعیین می‌شود. سپس یک مقدار برای توان تولیدی توربین حدس زده می‌شود. بعد بر اساس مقدار حدس زده شده، کد باید زمان شش نقطه A، B، G، H، W، Z را که در شکل ۳۲ نشان داده شده‌اند پیدا کند. یافتن نقاط A و B ساده و مستقل از توان توربین حدس زده شده است. نقاط Z و W نیز از قطع دادن توان مصرفی توربین (که برابر توان تولیدی توربین تقسیم بر بازده سیکل رانکین است) بدست می‌آید. نقطه H نیز به گونه‌ای انتخاب می‌شود که ناحیه پایین منحنی قرمز از A تا G تا برابر ناحیه بالای منحنی از G تا W باشد. نقطه H نیز به همین روش بدست می‌آید.

پس از بدست آوردن زمان نقاط، می‌توان مساحت بخش‌های شکل ۳۲ را بدست آورد. در شکل ۳۲ با تقسیم مساحت مستطیل اول (به طول G تا H) به توان مصرفی توربین میزان ساعات تولید مستقیم (DH) و با تقسیم مساحت مستطیل دوم (H تا Y) به توان مذکور، ساعات ذخیره انرژی (SH) بدست می‌آید. اکنون کد مقدار SH بدست آمده را با مقدار اولیه آن مقایسه می‌کند و در صورت برابر نبودن آنها، حدس دیگری برای توان توربین می‌زند و مراحل فوق مجدداً تکرار می‌شود. برای حدس جدید توان توربین نیز از الگوریتم Bisection استفاده می‌شود.

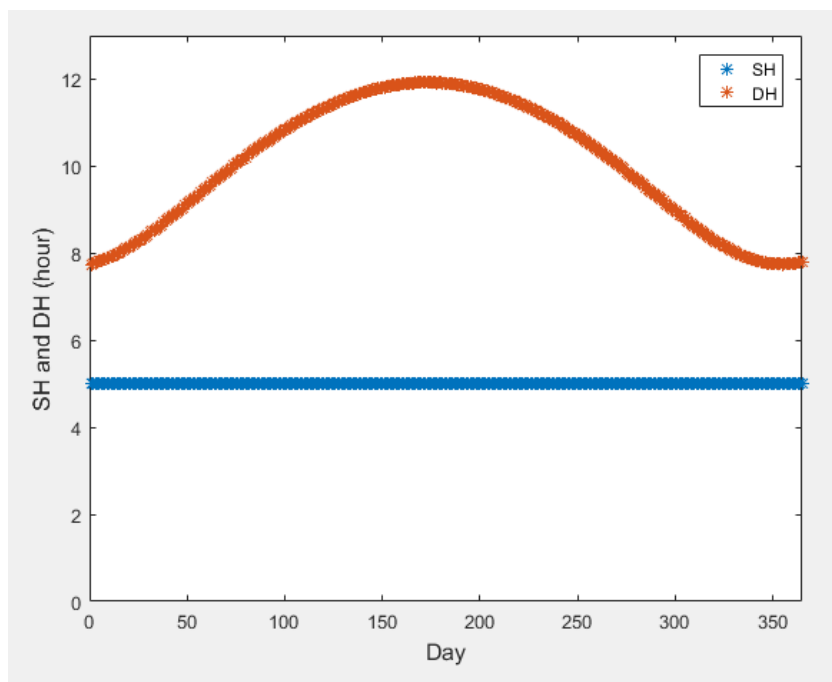
شکل ۳۳ نمودار توان تولیدی محاسبه شده برای توربین را در روزهای مختلف سال برای ۵ ساعت ذخیره سازی با ۳۰۰۰ هلیوستات بعنوان نمونه نشان می‌دهد. ماکزیمم مقدار این عدد یعنی 290 kW به عنوان نامی توربین انتخابی در نظر گرفته می‌شود. همچنین در شکل ۳۴ ساعات تولید مستقیم و تولید با استفاده از ذخیره نمک در روزهای سال آمده است.

در این کد فرض بر این است که انرژی ذخیره شده در هر روز صرفاً تا صبح روز بعد قابل استفاده است. در صورتیکه مجموع ساعات ذخیره سازی و تولید مستقیم از ۲۴ ساعت بیشتر شود کد ساعات ذخیره را در آن روزها کاهش خواهد داد. معنی این حرف آن است که مقداری از انرژی رسیده به برج به برق تبدیل نخواهد شد.

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	37 of 43




شکل ۳۳ نمونه توان‌های توربین محاسبه شده در روزهای سال



شکل ۳۴ نمونه ساعات ذخیره‌سازی و تولید مستقیم محاسبه شده در سال

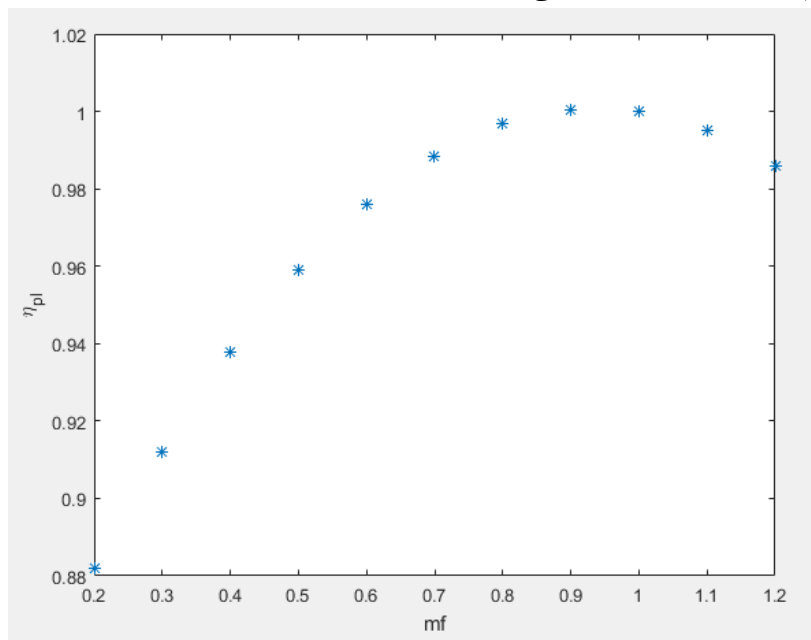
۲.۵.۲. توان تولیدی توربین بدون ذخیره‌سازی انرژی

در حالیکه ذخیره‌سازی انرژی نداریم اپتیمم‌ترین حالت این نیست که توربین صرفاً در حالت نامی خود کار کند. لذا سیاست تولید نیروگاه تغییر می‌کند. کد در صورتیکه ببیند ساعات ذخیره‌سازی برابر صفر قرار داده شده محاسبات توان تولیدی توربین

Project Name:				
Document Title:				
PV & Heliostat تکمیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	38 of 43

را به روش دیگری انجام خواهد داد. با تغییر یافتن انرژی رسیده به برج در طول روز، دبی آب سیکل رانکین به گونه‌ای تغییر می‌کند که دمای بخار خروجی از برج همواره ۳۹۰ درجه سانتیگراد و ۴۰ بار باقی بماند. دو حالت برای محاسبات بدون ذخیره‌سازی انرژی متصور است:

(۱) با کاهش دبی، یک سیستم فیدبک گشتاور مقاوم روی ژنراتور را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که دور توربین روی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه ثابت باقی بماند. این امر سبب می‌شود که توربین در مواقعی که در شرایط دبی نامی خود نیست افت بازده داشته باشد. بازده توربین بر اساس درصدی از دبی نامی آن از شکل ۳۵ بدست می‌آید. لذا در هر لحظه باید دبی توربین محاسبه شده و افت بازده آن از این نمودار بدست آید و در بازده قبلی ضرب شود. پارامتر mf از نسبت توان رسیده به برج در هر لحظه به توان ماکزیمم آن در طول سال بدست می‌آید.




شکل ۳۵ بازده توربین در نسبت دبی‌های مختلف

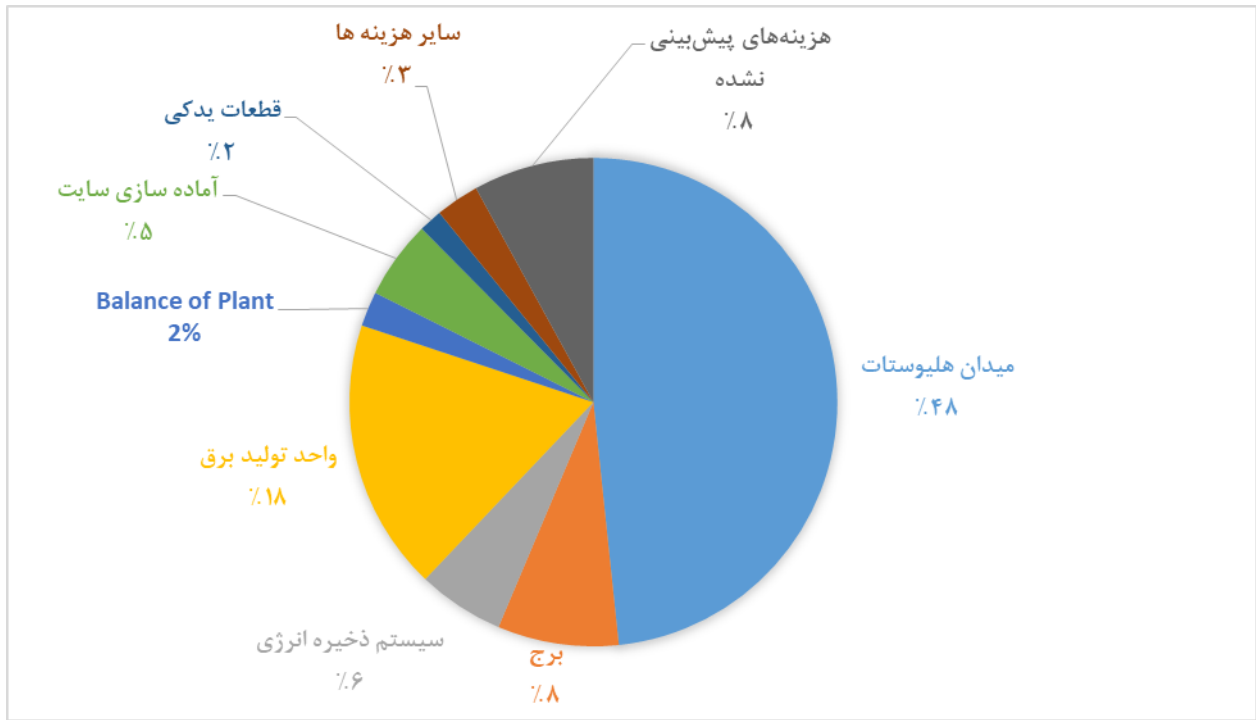
(۲) به توربین اجازه داده می‌شود که مطابق تغییر دبی، دور خود را تغییر دهد. اما در این حالت از یک اینورتر برای تبدیل فرکانس برق به ۳۰۰۰ دور بر دقیقه استفاده خواهد شد. لذا در محاسبات هزینه اولیه نیروگاه، هزینه اینورتر نیز افزوده می‌شود. همچنین توان اینورتر ۹۷/۵ درصد در نظر گرفته می‌شود.

هر دو روش فوق در محاسبات کد وارد شده و البته مشاهده شده است که روش اول دوره بازگشت سرمایه کوتاه‌تری را بدست می‌دهد. ضمناً با توجه به کاتالوگ توربین، اگر توان تولیدی توربین از ۲۳ درصد توان نامی آن کمتر شود توربین قادر به کار نیست. این شرط نیز در کد لحاظ شده است.

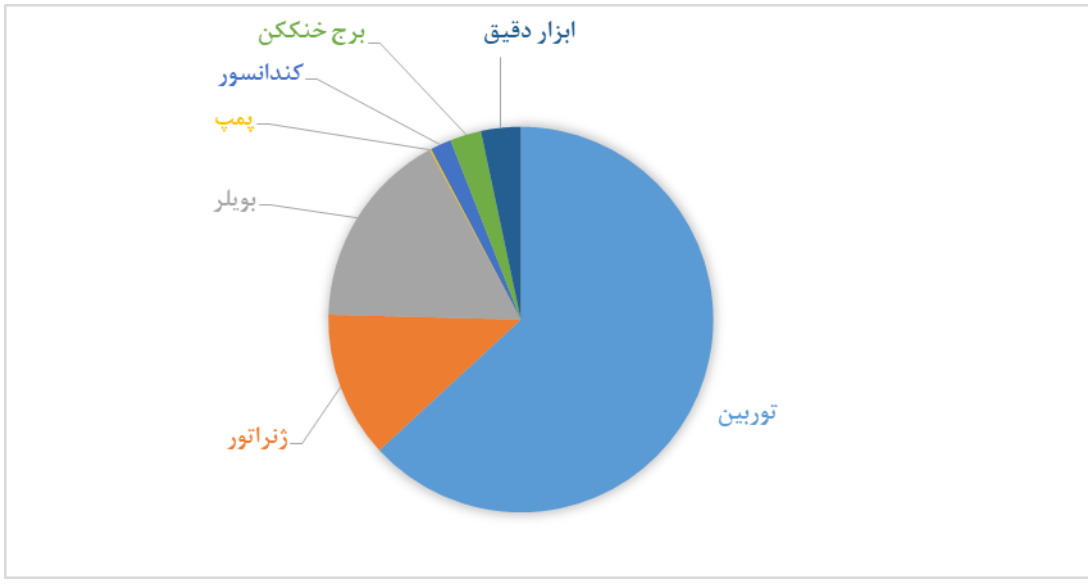
۲.۶. محاسبه هزینه اولیه نیروگاه

هزینه اولیه نیروگاه شامل هزینه هلیوستات‌ها، برج، سیستم ذخیره‌سازی انرژی، واحد تولید برق، هزینه آماده سازی سایت، قطعات یدکی و سایر هزینه‌ها (مجوزها و غیره) است. همچنین در انتها ۸ درصد بعنوان هزینه‌های پیش‌بینی نشده به مجموع موارد فوق افزوده می‌شود.


Project Name:				
-				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	39 of 43

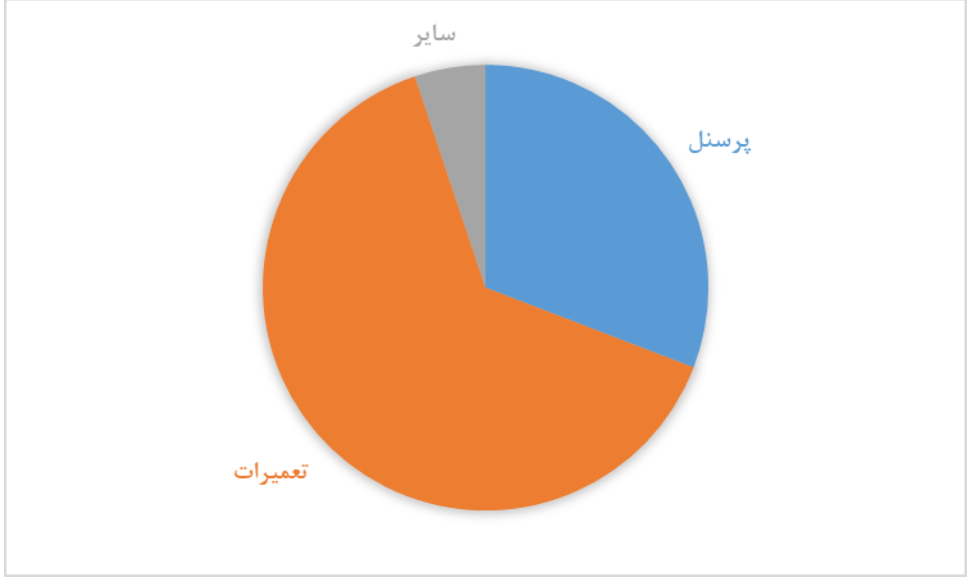


شکل ۳۶ توزیع هزینه‌های اولیه نیروگاه




شکل ۳۷ جزئیات هزینه‌های واحد تولید برق


Project Name: -				
Document Title: تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	40 of 43



شکل ۳۸ توزیع هزینه‌های جاری نیروگاه

<i>Project Name:</i>				
-				
<i>Document Title:</i>				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	41 of 43

۳. فصل سوم
مقایسه و جمع‌بندی

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
		DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	42 of 43

براساس تحقیقات مفصل صورت گرفته توسط شرکت تحقیقات الکترونیک فطروسی، دو نیروگاه فرضی با تکنولوژی فتوولتائیک و CSP، از نظر اقتصادی و دوره بازگشت سرمایه با هم مقایسه شدند. در مورد سیستم فتوولتائیک، پنل ثابت بدون ردیاب و پلی کریستال انتخاب گردید. همچنین در مورد سیستم CSP از میان تکنولوژی‌های موجود، تکنولوژی هلیواستات انتخاب شد. در هر دو تکنولوژی، فرض بر این بود که سرمایه اولیه یک میلیون دلار در دسترس است و تمام محاسبات بر حسب دلار انجام گرفته است.

در مورد سیستم فتوولتائیک، میانگین تابش ماهانه با استفاده از داده‌های تابش نرم‌افزارهای مربوطه استخراج شد و محاسبات با در نظر گرفتن ضرایب افت و در نهایت محاسبه تولید سالانه نیروگاه انجام گرفت. سپس دوره بازگشت سرمایه برای ۲۰ سال کار نیروگاه بدست آمد.


در مورد سیستم CSP بدلیل پیچیدگی بیشتر موضوع و لزوم بهینه‌سازی ساعات ذخیره انرژی، یک کد ایجاد گردید. پارامترهای دخیل در تابش رسیده به نیروگاه به گونه‌ای تنظیم شد که تابش متناظر با مقادیر آن در نیروگاه فتوولتائیک باشد. در نهایت ۶ ساعت ذخیره‌سازی انرژی با فرض اینکه قیمت نمک شامل رویالیتی نشود و حدود ۲ ساعت ذخیره‌سازی با فرض وجود رویالیتی برای این نیروگاه بعنوان بهترین گزینه بدست آمد. خروجی محاسبات انجام شده بصورت زیر است:

میزان انرژی خروجی سالانه	تکنولوژی خورشیدی	توان نامی نیروگاه	میزان سرمایه به دلار
1600MWh	PV	1MW	1,000,000\$
1700MWh	Heliostat	350kW	1,000,000\$

براساس مقایسه صورت گرفته، نیروگاه هلیواستات با میزان سرمایه‌گذاری مشابه نسبت به PV به مقدار 100MWh انرژی بیشتر در سال تولید می‌کند، علاوه بر این نیروگاه هلیواستات تنها نیروگاهی است که در ساعات تاریک شبانه روز نیز قابلیت تولید برق دارد و بر این اساس امکان مدیریت فروش برق در ساعاتی که قیمت خرید آن بیشتر است ایجاد می‌شود.

در نهایت، برخی موارد زیر را می‌توان بعنوان عوامل احتمالی گرایش به سمت تکنولوژی فتوولتائیک در کشورمان نام برد:

- قیمت‌های بالای خرید برق در دو سال گذشته (که در سال‌های بعد تعدیل شد) موجب گردید که خیل عظیمی از سرمایه‌گذاران در احداث نیروگاه‌های تجدید پذیر تعجیل کنند. طبعاً ساده‌ترین شکل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر که نسبت به سایر اشکال نظیر بادی و هلیواستات نیاز به مهندسی پیچیده‌ای در طراحی نداشته، صرفاً از اجزای استاتیک با حداقل اجزا تشکیل شده و ورود تکنولوژی آن به کشور کمترین دردسر را دارد فتوولتائیک می‌باشد. لذا این روند باعث شد شرکت‌های کوچک زیادی در کشور با هدف احداث نیروگاه فتوولتائیک تأسیس شوند. از سوی دیگر این شرکت‌ها در راستای جذب بازار بهتر، به تشویق هرچه بیشتر سرمایه‌گذاران به کار در این حوزه پرداختند، حال آنکه در این مدت چنین شرایطی برای نوع CSP فراهم نشد.
- نیروگاه‌های CSP با داشتن اجزای پیچیده‌تری از نظر مهندسی نظیر سیکل توربین بخار نیازمند توان، دانش و تخصص بالاتری در مراحل طراحی و اجرا می‌باشند و به‌کارگیری متخصصان ماهر در این حوزه نیازمند هزینه بالاتری است که از عهده تعداد بسیار کمتری از شرکت‌ها در کشور برمی‌آید.

Project Name:				
Document Title:				
تکنولوژی‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقایسه بازگشت سرمایه PV & Heliostat				
	-	DOCUMENT NUMBER.	REV.	PAGE NO.
		D-EN-32/00	00	43 of 43

- ضریب بهای ساعتی به گونه‌ای است که برق تولیدی در نیمه دوم شبانه‌روز غالباً با قیمت بالاتری خریداری می‌شود. در حالیکه سیستم فتوولتائیک در مقیاس نیروگاهی قادر به شیفت دادن یا کنترل ساعات تولید در شبانه‌روز نیست، نیروگاه‌های CSP می‌توانند در ساعات نیمه دوم شبانه‌روز نیز تولید داشته و با قیمت بالاتری برق را به فروش برسانند. این مسئله غالباً در ارزیابی اقتصادی و مقایسه دو نوع نیروگاه در کشور مدنظر قرار نمی‌گیرد.
- نیروگاه فتوولتائیک می‌تواند از مقیاس بسیار کوچک نظیر تأمین برق یک خانه مسکونی آغاز شود و روند طراحی و اجرای آن در مقیاس نیروگاهی، اگر به همان روال نباشد، بسیار نزدیک به مقیاس خانگی است. لذا پذیرش ریسک انتخاب فتوولتائیک بسیار پایین است چرا که اجرای نمونه کوچکتر آن امکان پذیر است. حال آنکه در مورد نیروگاه‌های CSP نظیر هلیوستات، اجرای نمونه‌های کوچکتر در مقیاس خانگی تقریباً امکان پذیر نیست. پس سرمایه‌گذار باید ریسک اجرای نمونه نیروگاهی را بدون تجربه عملکرد مقیاس کوچک آن بپذیرد؛ مسئله‌ای که به شدت به توان و تخصص شرکت طراح و مجری نیروگاه بسته است. همین امر موجب می‌شود تا سرمایه‌گذاران کمتری در کشور به این حوزه وارد شوند.
- آنچه در ابتدای فصل سوم از نظر خواننده محترم گذشت از زبان افراد صاحب فن و محقق بود که بیش از ۲۰ سال است در حوزه انرژی خورشیدی در حال فعالیت و کسب تجربه هستند. همانگونه که ذکر شد، تکنولوژی CSP بدلیل عدم توان ذخیره‌سازی، در حدود ۱۰ الی ۱۵ سال از رشد و توسعه عقب ماند و در این حین تکنولوژی فتوولتائیک فرصت پیدا کرد تا قیمت‌های تمام شده خود را کاهش دهد. اما از سال ۲۰۰۵ با معرفی تکنولوژی ذخیره‌سازی و خصوصاً نمک مذاب، توجه دوباره به CSP از سر گرفته شده است. آنچه امروز برای CSP در حال رخ دادن است همان روندی است که برای انرژی باد در گذشته اتفاق افتاد. لذا باید آینده نیروگاه‌های خورشیدی را در تکنولوژی CSP دانست.