

## امکان‌سنجی فنی ساخت نیروگاه متصل به شبکه با فناوری فتوولتائیک به ظرفیت 1/5 مگاوات در شهر یزد

■ محمد حسین شمس<sup>+</sup>\*

تهران، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی شریف، صندوق  
پستی: 13445-686

■ بهداد مهدوی<sup>1</sup>

تهران، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی شریف، صندوق  
پستی: 13445-686

تاریخ دریافت: 1392/09/28 و تاریخ پذیرش: 1392/11/29

### چکیده

اولین گام برای گسترش و ساخت نیروگاه‌های فتوولتائیک در کشور اخذ مجوز از سازمان‌های مربوطه است. این مجوزها شامل بررسی مطالعات امکان‌سنجی فنی و اقتصادی ساخت نیروگاه از سازمان انرژی‌های نو ایران و مجوز اتصال به شبکه آن از توانیر است. هدف این مقاله، انجام مطالعات امکان‌سنجی فنی احداث نیروگاه فتوولتائیک با ظرفیت 1/5 مگاوات در شهر یزد قابل ارائه به سانا برای اخذ مجوز است. در این مقاله، ابتدا شرایط اقلیمی و تابش محل احداث نیروگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس ماژول و اینورتر مناسب انتخاب شده و با استفاده از نرم‌افزار sunny design که مورد تأیید سانا است، مطالعات فنی نیروگاه صورت می‌پذیرد. در این بررسی، آرایش بهینه پنل‌ها و کمینه کردن اثر سایه‌اندازی آنها روی یکدیگر با استفاده از نرم‌افزار PVSyst انجام می‌شود. نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار مذکور، استفاده از 3 عدد اینورتر 500 کیلوواتی، پنل‌های 250 وات به‌صورت عمودی دو ردیفه با فاصله ردیف‌های 5/23 متر جهت استحصال توان خروجی بهینه از نیروگاه در منطقه مورد نظر را مناسب می‌داند. در نهایت، گزارش شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط نرم‌افزارهای PVSyst و Sunny Design ارائه می‌شود.

**واژگان کلیدی:** نیروگاه فتوولتائیک یزد، مگاوات اینورتر، پنل خورشیدی، اثر سایه‌اندازی.

\* عهده دار مکاتبات

+ شماره نامبر: 021-66075013 و آدرس پست الکترونیکی: [Mhshams@alum.sharif.edu](mailto:Mhshams@alum.sharif.edu)  
1 شماره نامبر: 021-66075013 و آدرس پست الکترونیکی: [B\\_mahdavi6182@yahoo.com](mailto:B_mahdavi6182@yahoo.com)

## 1- مقدمه

انرژی خورشیدی عظیم‌ترین منبع انرژی جهان است. در سال‌های اخیر به دلیل رو به اتمام بودن منابع فسیلی، منابع انرژی تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی خورشیدی از توجه خاصی بهره‌مند گردیده است. سیستم‌های فتوولتائیک یکی از پرمصرف‌ترین و کاربردی‌ترین موارد استفاده از انرژی خورشیدی است. بدون شک در آینده‌ای نه چندان دور سیستم‌های فتوولتائیک به‌عنوان جایگزین مناسب، پاک و بی‌خطر جای سوخت‌های فسیلی را خواهند گرفت. در این راستا در کشور پروژه‌های مختلف تحقیقاتی - اجرایی در زمینه احداث نیروگاه‌های فتوولتائیک تعریف شده است. اولین گام در پیاده‌سازی نیروگاه‌های فتوولتائیک در کشور اخذ مجوزهای لازم است.

از آنجا که مطالعات امکان‌سنجی فنی و اقتصادی ساخت نیروگاه لازمه اخذ مجوز از سانا است، هدف اصلی این مقاله بررسی امکان‌سنجی فنی ساخت این نیروگاه در شهر یزد است. در سال‌های اخیر، مقالات متعددی در زمینه بررسی و بهینه‌سازی ساخت نیروگاه‌های خورشیدی ارائه شده است. بهادری‌نژاد به موضوع استفاده از برق خورشیدی در ساختمان‌های اداری با توجه به سیاست‌های دولت در مورد انرژی پرداخته است [1]. بانی<sup>2</sup> و گوپیناتان<sup>3</sup> به بررسی تغییرات پارامتری طراحی مزرعه خورشیدی پرداخته است [2 و 3]. باررا<sup>4</sup> مدلی را برای نیروگاه خورشیدی با در نظر گرفتن اثر سایه پیشنهاد کرده است [4]. نینگ<sup>5</sup> به تخمین ظرفیت تولید توان خورشیدی به روش شبکه عصبی پرداخته است [5]. در مقاله دیگر، استفاده از نیروگاه خورشیدی در یک منطقه راه دور، مورد بررسی قرار گرفته است [6]. وینستاک به شبیه‌سازی بهینه مزرعه خورشیدی با استفاده از جعبه ابزار بهینه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB پرداخته است [7]. گلکار روشی برای بدست آوردن زاویه بهینه پنل‌های خورشیدی ثابت در شهرهای مختلف ایران ارائه کرده است [8]. مقاله دیگری، به طراحی بهینه ابعاد بهینه پنل خورشیدی در یک زمین با ابعاد مشخص با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) پرداخته است [9]. اما در هیچ‌یک از بررسی‌های انجام شده موارد مورد نظر سانا جهت تأیید مطالعات امکان‌سنجی فنی به‌طور کامل لحاظ نشده است. بنابراین در این

مقاله سعی بر آنست که بتوان این مطالعات را براساس ملاحظات سانا جهت صدور مجوز تهیه نمود.

## 2- موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی

شکل شماره 1، موقعیت جغرافیایی پیشنهاد شده جهت احداث نیروگاه در شهر یزد را به نمایش می‌گذارد. طول و عرض جغرافیایی این منطقه 54/34 درجه شرقی و 31/81 درجه شمالی است که با دانشگاه‌های آزاد و سراسری یزد در حدود 2 تا 3 کیلومتر به سمت جنوب فاصله دارد. بنابراین با توجه به کویری بودن و میزان شدت تابش در این اقلیم، انتخاب مناسبی جهت احداث نیروگاه فتوولتائیک صورت گرفته است. یزد دارای آب و هوای اقلیمی گرم و خشک و بیابانی است و نوسان دما در تابستان و زمستان و حتی در شب و روز بالا و متغیر است و این از ویژگی‌های آب و هوایی منطقه به شمار می‌رود. از این نگاه می‌توان گفت: یزد دارای دو فصل است فصل بلند گرما (از اسفند تا مهر) و فصل کوتاه سرما (از آبان تا اواخر بهمن).

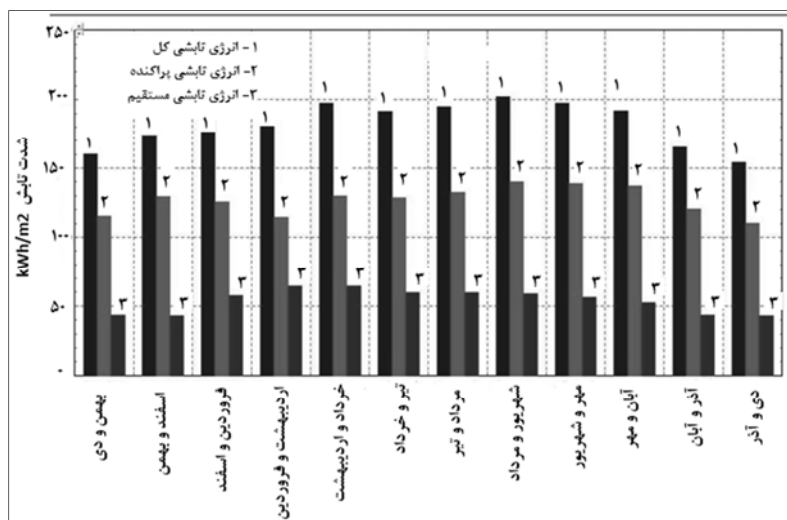


شکل 1: تصویر ماهواره‌ای محل پیشنهاد شده جهت احداث نیروگاه [12]

## 2-1- پارامترهای هواشناسی منطقه

در بررسی پارامترهای هواشناسی یک منطقه برای احداث نیروگاه فتوولتائیک، شدت تابش خورشید و درجه حرارت محیط از اهمیت بسزایی برخوردار است؛ لذا در سال‌های اخیر، پیش از احداث نیروگاه‌ها، آنالیز این پارامترها و رصد تغییرات آنها در منطقه، در تخمین میزان توان استحصالی آنها اثرگذار خواهد بود. در شکل شماره 2، میانگین دریافت انرژی در شهر یزد از طریق سه نوع تابش: مستقیم، پراکنده و کل بر واحد سطح افق و در هر ماه و بدون در نظر گرفتن شیب بهینه صفحات خورشیدی نشان داده شده است که انرژی دریافتی کل از مجموع انرژی حاصل از تابش مستقیم و پراکنده بدست آمده است.

- 2 Bany
- 3 Gopinathan
- 4 Barra
- 5 Naing



شکل 2: نمودار میزان دریافت انرژی و واحد سطح افق با سه نوع تابش مختلف [11]

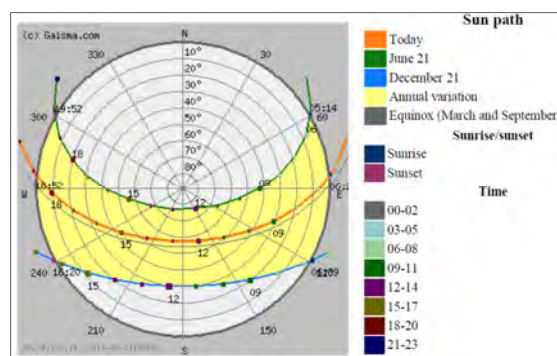
درجه حرارت محیط، سرعت باد، میزان بارش، روزهای مرطوب در طی سال 2005-1983 میلادی آورده شده است. به عنوان مثال در جدول شماره 1 در ماه June که معادل ماههای شمسی خرداد و تیر است، دارای بالاترین میانگین شدت تابش در 22 سال بوده است و این آمار نیز، برای درجه حرارت محیط برای ماه میلادی جولای که معادل ماههای شمسی مرداد و شهریور می باشد، صادق است.

جدول شماره 2، میانگین ماهیانه شدت تابش مستقیم که در طول 22 سال نمونه برداری شده را با میانگین سالیانه  $6/76 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$  نشان می دهد.

جدول شماره 3، بیشینه و کمینه میانگین ماهیانه این سالها را ارائه می دهد و در جدول شماره 4، میانگین ماهیانه ساعات روشنایی روز در طول این 22 سال آورده شده است.

جدول شماره 5، میانگین شدت تابش در زاویای مختلف را که تغییرات در تابش مستقیم کاملاً محسوس است، به همراه شاخص وضوح نشان می دهد.

شکل شماره 3 نمودار حرکتی خورشید در زمانهای مختلف در طول سال را نمایش می دهد. همانطور که ملاحظه می گردد، خورشید اکثر اوقات در جنوب شهر یزد قرار می گیرد. این حالت در همه شهرهای ایران تکرار می گردد. به همین خاطر صفحات خورشید به صورت 100% رو به جنوب با شیب معادل عرض جغرافیایی محل احداث نیروگاه نصب می گردد.



شکل 3: نمودار مسیر حرکت خورشید [15]

جدول شماره 1 میانگین ماهانه کلیه پارامترهای هواشناسی مهم مربوط به شهر یزد از جمله میزان انرژی دریافتی بر واحد سطح، شاخص صافی هوا (0-1) پایین ترین وضوح تا وضوح کامل)،

جدول 1: میانگین ماهانه پارامترهای هواشناسی مربوط به شهر یزد طی سالهای 1983-2005 [6]

ماه	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
شدت تابش $\text{kWh/m}^2/\text{day}$	3/04	4/05	4/79	5/80	6/77	7/48	7/27	6/94	6/06	4/70	3/35	2/78
صافی هوا 0-1	0/55	0/59	0/56	0/58	0/61	0/66	0/65	0/67	0/67	0/63	0/57	0/55
درجه حرارت ( $^{\circ}\text{C}$ )	0/62	5/50	9/57	16/94	22/40	27/26	29/25	27/81	23/22	17/51	11/25	5/93
سرعت باد (m/s)	5/93	6/09	6/19	5/74	6/40	7/47	8/05	7/72	6/64	5/74	5/55	5/91
میزان بارش (mm)	11	12	13	9	5	0	0	0	0	1	3	9
روزهای مرطوب (d)	4/2	3/9	4/8	4/2	2/2	0/1	0/1	0	0	0/9	1/8	3/2

جدول 2: میزان میانگین ماهیانه شدت تابش مستقیم (kWh/m<sup>2</sup>/day) [13]

Lat31/81 - Lon54/35	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	میانگین سالیانه
میانگین 22 سال	5/93	6/93	6/20	6/26	7/14	7/60	7/30	7/45	7/32	6/96	6/32	5/78	6/76

جدول 3: اختلاف بیشینه و کمینه میانگین شدت تابش مستقیم ماهیانه (%) [13]

Lat31/81 - Lon54/35	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
کمینه	-9	-11	-9	-15	-7	-4	-5	-5	-4	-7	-17	-12
بیشینه	18	9	19	15	13	6	2	4	10	6	8	12

جدول 4: میانگین ماهیانه ساعات روشنایی (ساعت) [13]

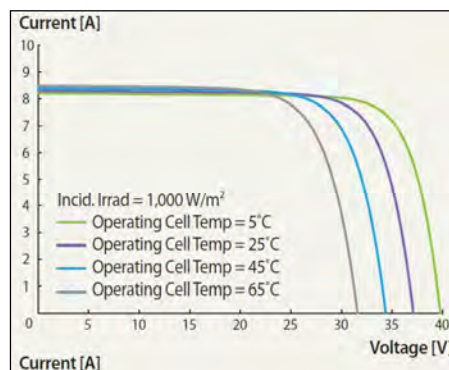
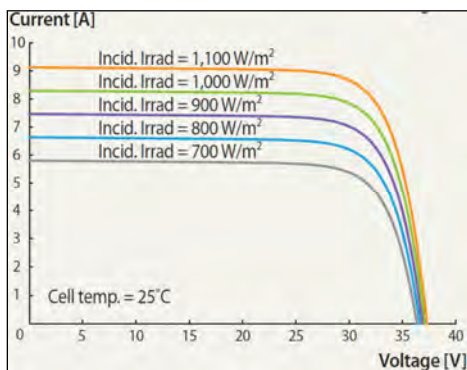
Lat31/81 - Lon54/35	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
میانگین	10/3	11/1	11/9	12/9	13/7	14/1	14	13/3	12/3	11/4	10/5	10/1

جدول 5: میانگین شدت تابش بر زاویه مختلف سطح جاذب (kWh/m<sup>2</sup>/day) [13]

Lat31/81 - Lon54/35	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	میانگین سالیانه
SSE HRZ	3/47	4/55	5/17	5/97	6/87	7/26	7/02	6/72	5/95	4/86	3/78	3/21	5/40
شاخص وضوح	0/6	0/64	0/59	0/58	0/61	0/63	0/62	0/64	0/64	0/64	0/62	0/60	0/62
تابش پراکنده	0/88	1/02	1/53	1/91	2/04	2/08	2/06	1/78	1/45	1/13	0/90	0/80	1/47
تابش مستقیم	5/93	6/93	6/20	6/26	7/14	7/60	7/30	7/45	7/32	6/96	6/32	5/78	6/76
0°	3/41	4/52	5/11	5/84	6/84	7/22	6/98	6/69	5/86	4/82	3/70	3/16	5/35
16°	4/38	5/49	5/66	6/05	6/73	6/96	6/80	6/77	6/35	5/68	4/68	4/18	5/81
31°	5/05	6/09	5/86	5/92	6/28	6/36	6/27	6/47	6/46	6/17	5/33	4/88	5/93
46°	5/42	6/33	5/75	5/50	5/52	5/44	5/43	5/85	6/22	6/30	5/68	5/30	5/72
90°	4/69	5	3/79	2/89	2/40	2/16	2/25	2/78	3/73	4/70	4/79	4/73	3/65
زاویه بهینه	5/49	6/34	5/87	6/05	6/85	7/22	6/98	6/79	6/47	6/30	5/73	5/42	6/29

جدول 6: مشخصات پنل خورشیدی لحاظ شده در طراحی

MG250HIS-S	مدل
250	توان نامی (W)
15/46	راندمان در STC (%)
37/50	ولتاژ مدار باز (V)
30/50	ولتاژ نامی (V)
8/70	جریان اتصال کوتاه (I)
8/20	جریان نامی (I)
1000	بیشین ولتاژ سطح ولتاژ اتصال (V)



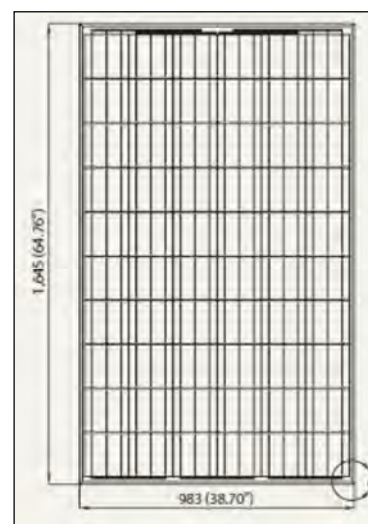
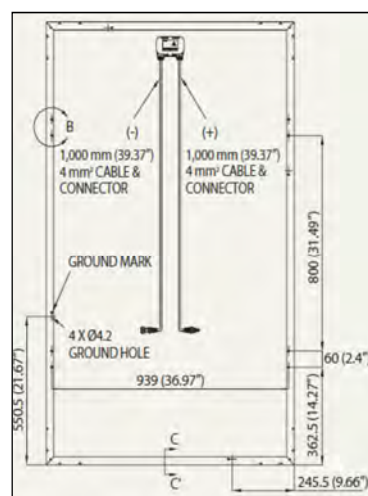
شکل 4: رفتار پنل خورشیدی لحاظ شده در طراحی در درجه حرارتها و شدت تابش های مختلف

### 3- انتخاب پنل و اینورتر

#### 3-1- انتخاب پنل و مشخصات فنی

پنل در نظر گرفته شده برای این طراحی از شرکت Hyundai کشور کره جنوبی است که دارای مشخصاتی مطابق با جدول شماره 6 است. در این طراحی تعداد 6048 پنل استفاده شده که ظرفیت نامی نیروگاه را به 1/51 مگاوات می‌رساند.

رفتار این پنل در درجه حرارت‌های مختلف و همچنین شدت‌های مختلف تابش در شکل شماره 4 آورده شده است. ابعاد پنل و مشخصات اندازه قاب دور پنل، سائز کابل اتصال DC، خروجی از پنل که  $4\text{mm}^2$  در نظر گرفته شده، همگی در شکل شماره 5 آورده شده است.



شکل 5: مشخصات ابعادی پنل

#### 3-2- انتخاب اینورتر و مشخصات فنی

طبق بررسی‌های به عمل آمده و با توجه به اعتبار بسیار بالای محصولات شرکت SMA آلمان، در این طراحی اینورترهای

شرکت مذکور در نظر گرفته شده است. لذا از نرم افزار Sunny Design جهت سائز کردن اینورتر استفاده شده است. نتایج حاصل از نرم افزار، بهترین گزینه از منظر کمترین تلفات در تولید انرژی، بیشترین کارایی به جهت تطبیق اینورتر با پنل و شرایط اقلیمی نیروگاه و در نهایت ظرفیت نیروگاه، بهره‌گیری از 3 اینورتر به ظرفیت 500 کیلووات را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که استفاده از 15 اینورتر 100 کیلوواتی و 6 اینورتر 250 کیلوواتی مدنظر بود که به علت عدم وجود این دو محصول در وب سایت رسمی این شرکت [14] و به تبع آن در نرم افزار مذکور، امکان مقایسه با مورد انتخابی وجود نداشت.

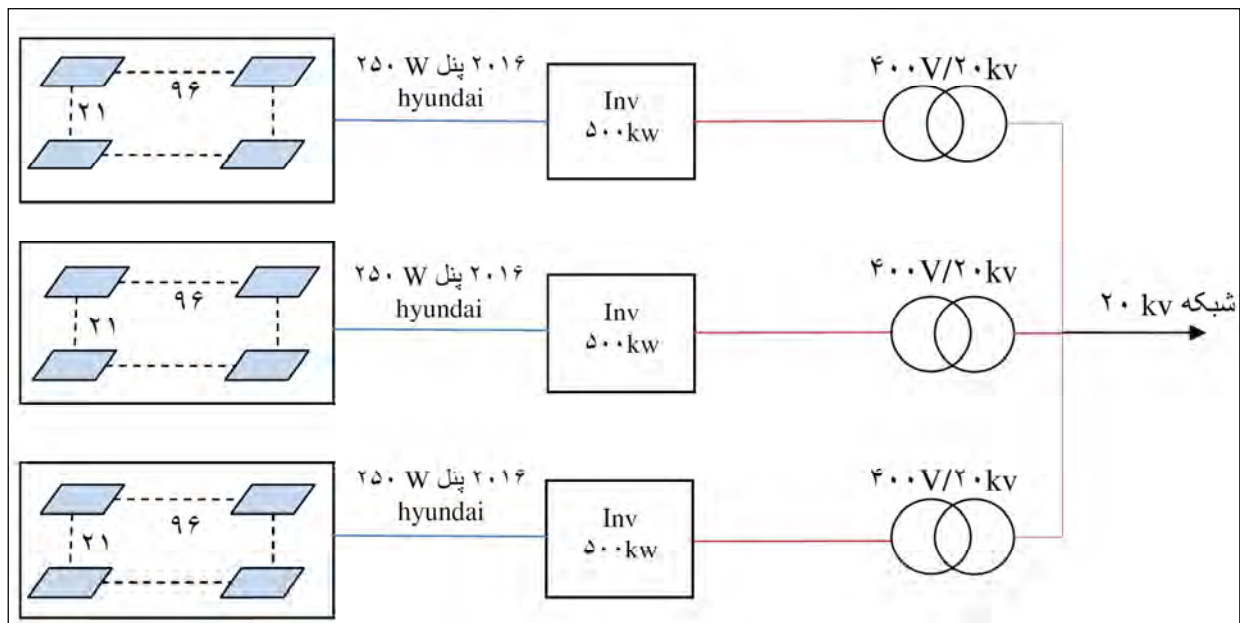
اینورتر برگزیده شده در این طرح دارای مشخصات جدول شماره 7 است.

جدول 7: مشخصات اینورتر 500 کیلوواتی SMA لحاظ شده در طراحی [14]

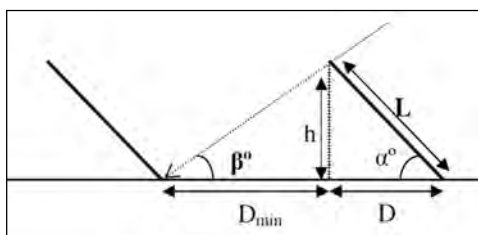
مدل	SC XT 500CP
بیشینه توان DC (KW)	560
ولتاژ DC min و max (V)	400-1000
ولتاژ نامی DC (V)	449
جریان max DC (I)	1250
توان نامی AC (kVA)	550
ولتاژ AC max و min (V)	243-310
ولتاژ نامی (V)	270

از مشخصات شایان توجه این اینورتر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

1. کارکرد مداوم با بیشینه توان در دمای محیط 50 درجه سانتیگراد.
  2. بهینه‌سازی جهت کار در بازه دمایی 40- تا 60+ درجه سانتیگراد.
  3. بازه کارکرد DC وسیع جهت استفاده از پنل‌ها مختلف با ولتاژهای متفاوت.
  4. تنظیم دقیق در مواجه با نوسانات دمایی از سوی پنل‌ها.
- در این طراحی به هر اینورتر، 504 کیلووات پنل متصل می‌شود که در آرایش برای هر اینورتر 21 سازه در نظر گرفته شده که با هم سری هستند و هر کدام شامل 96 پنل هستند که با یکدیگر موازی شده‌اند. تعداد پنل‌های متصل به هر اینورتر، 2016 پنل است که به هر اینورتر 500 کیلوواتی متصل است و خروجی سمت AC توسط 3 ترانسفورماتور 20 کیلوولتی به شبکه تزریق می‌شود که شرح آن در شکل شماره 6 به تفصیل آورده شده است.



شکل 6: شماتیک نیروگاه 1/5 مگاواتی بزد



شکل 7: نحوه محاسبه فاصله محور تا محور ردیف‌ها در آرایه‌های نیروگاه

$$D = L \times \cos \alpha \quad (1)$$

$$h = L \times \sin \alpha \quad (2)$$

$$D_{min} = (h / \tan \beta) \quad (3)$$

$$D_{Axe-Axe} = D + D_{min} \quad (4)$$

محاسبات فوق برای 4 وضعیت مختلف از لحاظ سازه نصب [16] در نظر گرفته شده است که در جدول شماره 8 نشان داده شده است. قابل توجه است که تصمیم‌گیری در مورد جانمایی آرایه‌های نیروگاه به شرایط سایت از دیدگاه نقشه‌برداری و مکانیک خاک ابعاد واقعی زمین ارتباط مستقیم دارد. لذا مواردی که در ادامه در 4 گروه پیشنهادی جهت نصب سازه‌ها آورده شده صرفاً مطابق با محاسبات و شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری [11] بوده است.

جدول 8: تلفات سایه و فاصله بهینه نسبت به چیدمان در سازه پنل‌ها

نوع سازه	فاصله بهینه (متر)	تلفات سایه (%)
عمودی تک ردیف	2,61	6,3
عمودی دو ردیف	5,23	6,1
افقی تک ردیف	1,56	6,4
افقی دو ردیف	3,13	6,6

#### 4- آنالیز سایه‌اندازی و چیدمان پنل‌ها

در این قسمت به بررسی پارامترهای مربوط به نحوه چیدمان بهینه پنل‌ها و محاسبات سایه‌اندازی جهت دستیابی به حداقل فاصله بهینه ردیف‌ها از یکدیگر پرداخته شده که 4 نوع آرایش مختلف از دیدگاه شکل سازه به جهت دستیابی به کمترین میزان سایه‌اندازی و تلفات در نظر گرفته شده است.

از روابط مربوط به تعیین فاصله بهینه محور تا محور ردیف‌ها، نتایجی مطابق با جدول شماره 8 حاصل شد که در ادامه به شرح آنها پرداخته خواهد شد. لازم به ذکر است که در کوتاه‌ترین روز سال، این فاصله بهینه باید طوری تعیین شود که بین ساعات 10 صبح تا 2 بعدازظهر میزان تلفات سایه به حداقل خود برسد.

#### 4-1 محاسبات انجام شده در خصوص فاصله بهینه پنل‌ها

پنل خورشیدی پیشنهادی پنل 250 وات مدل HIS-S250MG شرکت Hyundai کره جنوبی است که دارای ابعادی معادل 1645 × 983 میلی‌متر است. کلیه محاسبات صورت گرفته در خصوص فاصله بهینه پنل‌ها مطابق با روابط 1 تا 4 انجام شده است [15 و 16] که در آن زاویه شیب مطابق با عرض جغرافیایی منطقه (Latitude) و  $\beta$  (Altitude) برای کوتاه‌ترین روز سال محاسبه شده است؛ چراکه در آن روز ارتفاع خورشید از زمین در کوتاه‌ترین وضعیت خود قرار دارد و به جهت آن طول سایه‌ها بلندتر خواهد بود.

شکل شماره 11، نمای کلی نیروگاه پس از نصب به روش سازه عمود در دو ردیف را نمایش می‌دهد. نحوه روند تغییرات در شکل نشان می‌دهد که در کوتاه‌ترین روز سال پس از ساعت 10 صبح تلفات ناشی از سایه بسیار ناچیز بوده و در طول ساعات روشنایی تلفات به 6/1% می‌رسد.

#### ج - استقرار افقی تک ردیف

در این نوع آرایش فاصله عرضی ردیف‌ها از یکدیگر به 1/56 متر می‌رسد که در بین 4 گزینه کمترین عرض را در کل سایت اشغال می‌کند ولی در مقابل بیشترین طول را در اجرا در بین 4 گزینه در آرایه‌های متصل به یک اینورتر در برمی‌گیرد.

#### د - استقرار افقی دو ردیف

این سازه در مقایسه با سازه افقی نوع تک محوره در مقایسه با آرایه‌های متصل به یک اینورتر فضای عرضی بیشتر و طولی کمتری را اشغال می‌کند. همان‌طور که در شکل شماره 14 نشان داده شده است، فاصله 3/13 متر برای این چیدمان برای بلندترین سایه در کوتاه‌ترین روز سال کمترین میزان افت به جهت ایجاد سایه را شامل می‌شود.

در شکل‌های شماره 9، 11، 13 و 15، نمودار میزان تلفات سایه از زمان طلوع تا غروب در روز 21 دسامبر (بیشترین طول سایه) آورده شده است که در بین ساعات 10 صبح الی 2 بعدازظهر که تابش مطلوب رخ می‌دهد، این تلفات به حداقل خود می‌رسد.

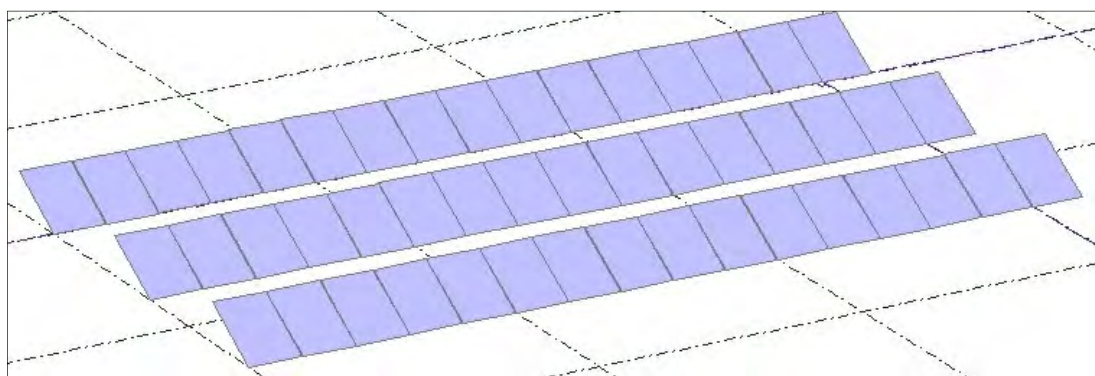
حال به بررسی جزئیات بدست آمده در جدول شماره 8 پرداخته خواهد شد.

#### الف - استقرار عمودی تک ردیف

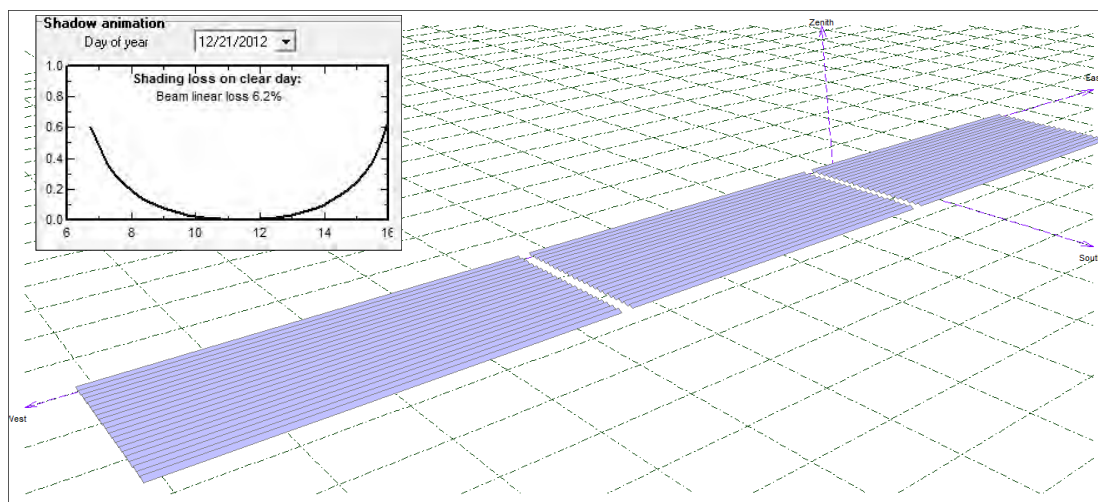
پس از انجام محاسبات توسط روابط فوق‌الذکر، فاصله عرضی محور تا محور کلیه سازه‌ها که به صورت تک ردیف جهت نصب عمودی پنل‌ها بکار می‌رود، 2/61 متر بدست می‌آید.

#### ب - استقرار عمودی دو ردیف

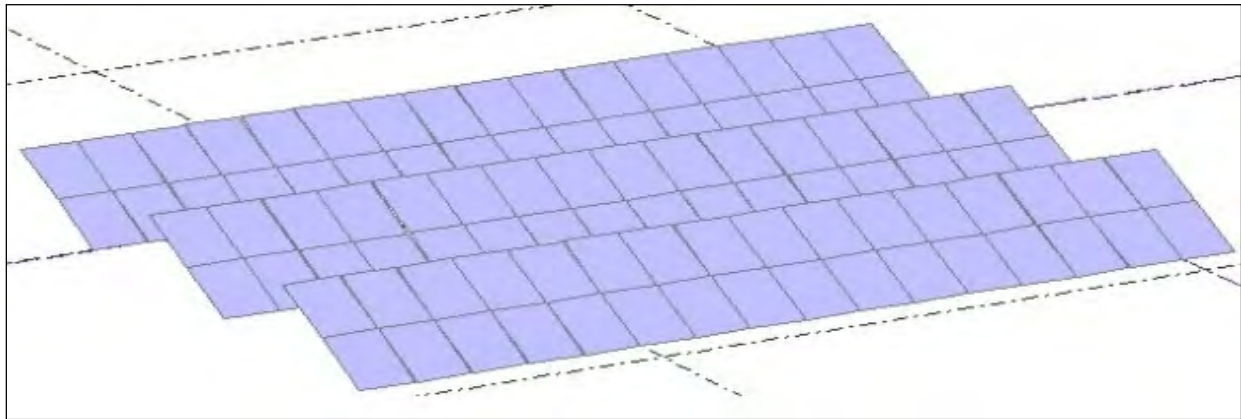
همان‌طور که در شکل شماره 10 نشان داده شده است، فاصله محور تا محور عرضی هر یک از ردیف‌ها 5/2 متر است که این نوع چیدمان به جهت این که در عرض پنل‌ها نصب و به صورت دو ردیف در ارتفاع برده شده کمترین طول را در بین این چهار حالت در آرایه‌های مشابه متصل به یک اینورتر ایجاد می‌کند.



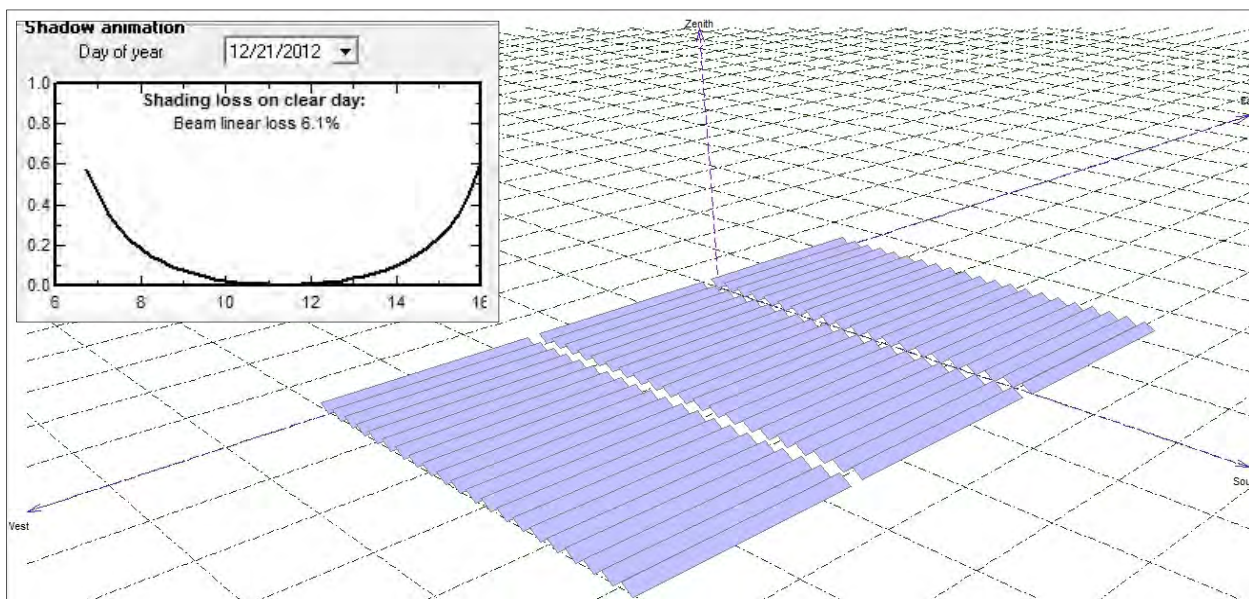
شکل 8: نحوه آرایش سازه‌ها و فاصله بهینه در حالت عمودی تک ردیف



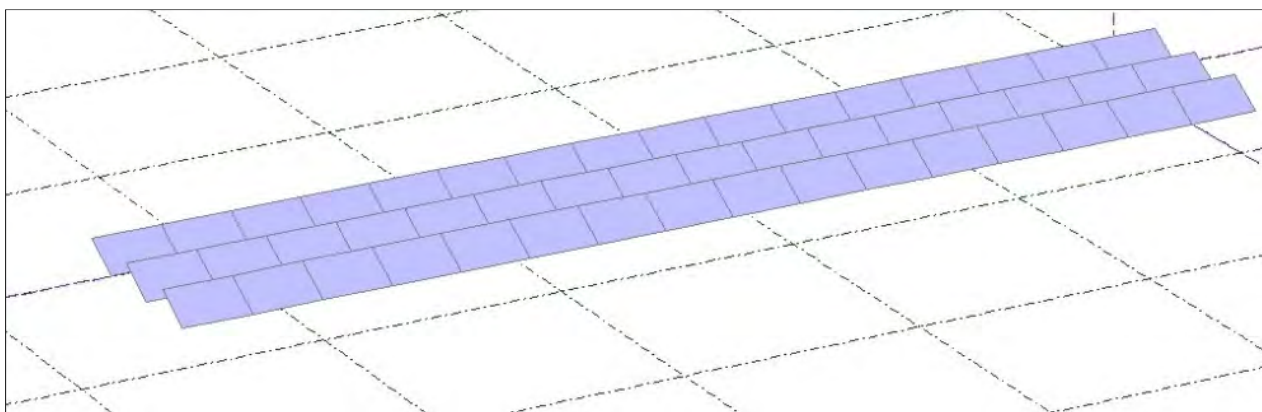
شکل 9: نمای نحوه استقرار آرایه‌ها با سازه عمودی در یک ردیف



شکل 10: نحوه آرایش سازه‌ها و فاصله بهینه در حالت عمودی در دو ردیف

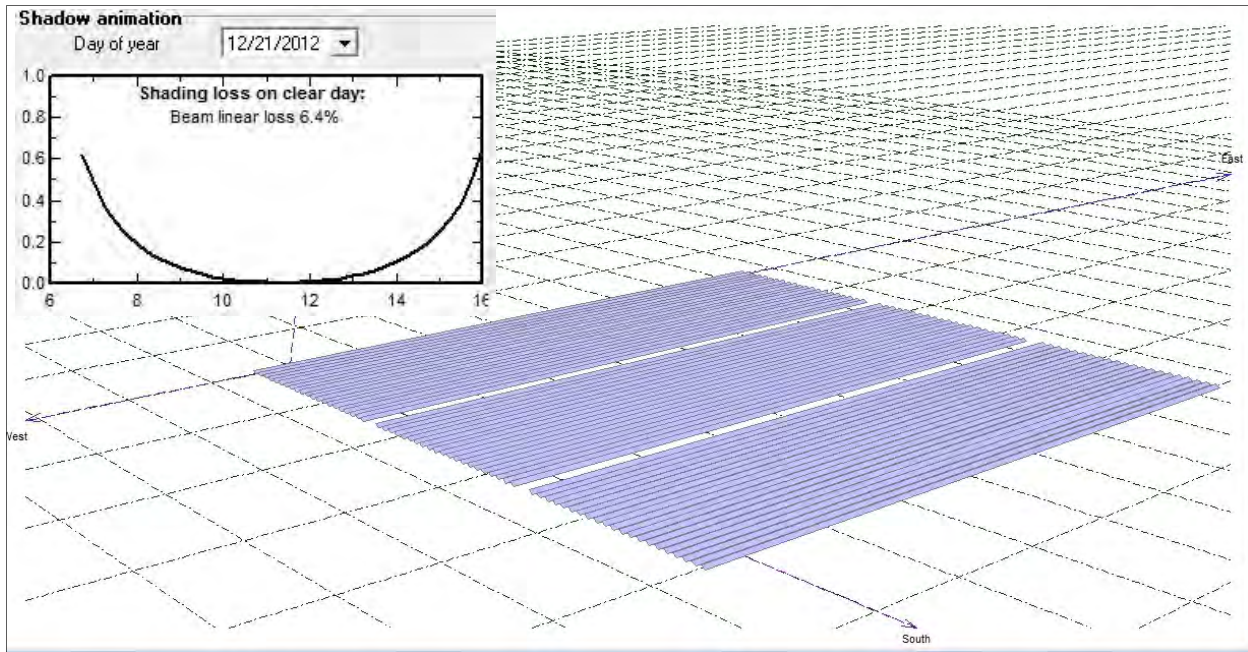


شکل 11: نمای نحوه استقرار آرایه‌ها با سازه عمودی در دوردیف

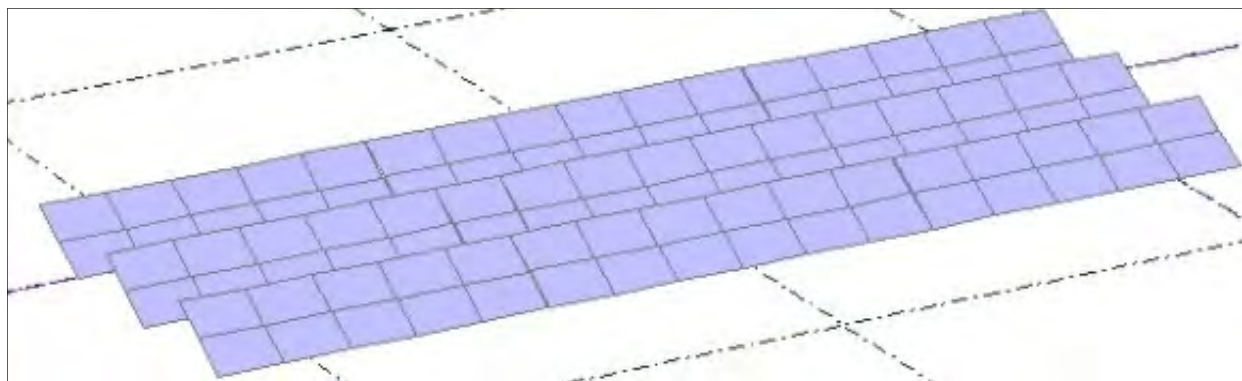


شکل 12: نحوه آرایش سازه‌ها و فاصله بهینه در حالت افقی در یک ردیف

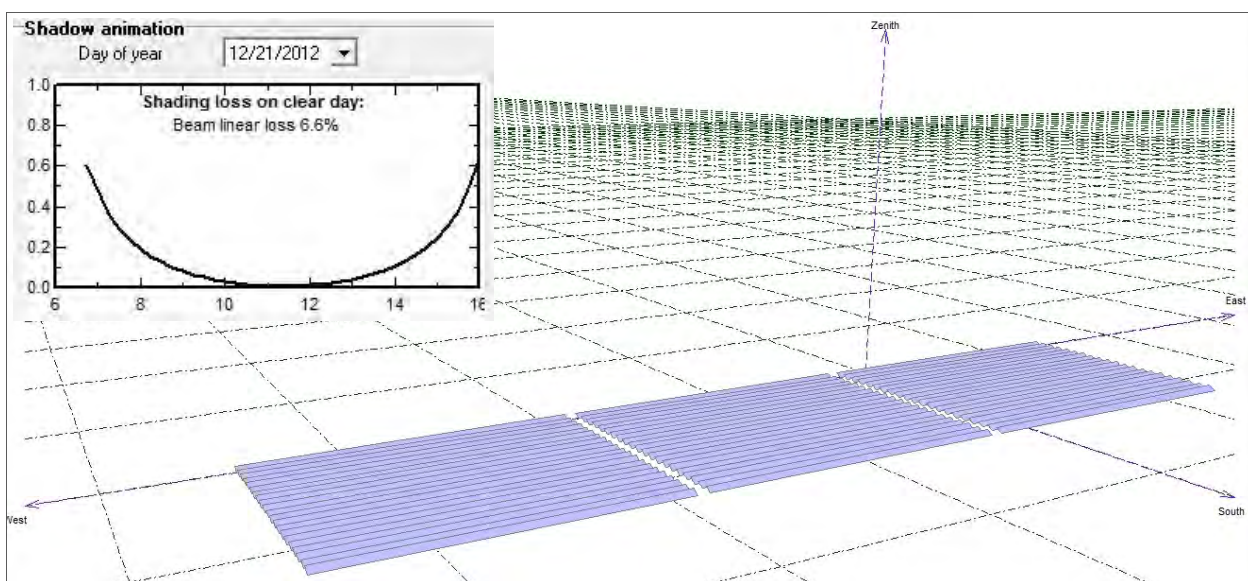




شکل 13: نمای نحوه استقرار آرایه‌ها با سازه افقی در یک ردیف



شکل 14: نحوه آرایش سازه‌ها و فاصله بهینه در حالت افقی در دو ردیف



شکل 15: نمای نحوه استقرار آرایه‌ها با سازه افقی در دو ردیف

## 5- گزارش شبیه‌سازی

در این بخش، به بیان گزارش نیروگاه فتوولتائیک 1/5 مگاواتی یزد پرداخته شده است که توسط نرم افزارهای تخصصی Sunny Design و PVSYST شبیه‌سازی شده است. در نرم افزار Sunny Design هدف، محوری از شبیه‌سازی است که شامل انتخاب اینورتر بهینه پیشنهادی توسط این نرم افزار و تطبیق آن با پنل انتخابی موردنظر در شرایط محیطی است. خروجی این نرم افزار، پارامترهایی همچون میزان توان استحصالی از نیروگاه، ضریب کارایی نیروگاه و تعیین شاخه‌های سری موازی در طراحی، سطوح مختلف ولتاژ کاری در دماهای مختلف و برخی دیگر از پارامترهاست که شرح آن در گزارش آورده شده است.

در نرم افزار PVSYST از همان پنل و اینورتر مشابه جهت شبیه‌سازی استفاده شده است و تنها تفاوت در مختصات جغرافیایی است که دقیقاً همان مختصات جغرافیایی محل اعلام شده در شهر یزد جهت احداث نیروگاه است. همچنین کلیه آنالیزهای صورت گرفته جهت حداقل سازی تلفات سایه‌اندازی نیز با این نرم افزار صورت گرفته است. در مجموع گزارش آنالیز PVSYST به شرح بیشتری از پارامترها پرداخته است ولی اطمینان از انتخاب اینورتر 500 کیلووات SMA به کمک Sunny Design انجام شده است. در ادامه خروجی گزارش شبیه‌سازی هر دوی این نرم افزارها به تفصیل آورده شده است.

### 5-1- شبیه‌سازی نیروگاه فتوولتائیک 1/5 مگاواتی یزد

#### توسط نرم افزار Sunny design

نتایج بدست آمده با کمک نرم افزار PVSyst که در بخش

5-2 آورده شده، نشان از حصول خروجی‌های بسیار مشابه و در مواردی کاملاً یکسان در پارامترهای کلیدی از شبیه‌سازی نیروگاه دارد که دقت در طراحی و شبیه‌سازی با هر دو نرم افزار را به نمایش می‌گذارد؛ تعداد شاخه‌های سری و موازی متصل به هر اینورتر و در نتیجه ولتاژ و جریان نامی محاسبه شده مشابه در هر شاخه از این نمونه‌اند.

در جدول شماره 9، مشخصات کلی نیروگاه شامل تعداد پنل‌ها، زاویه نصب، تعداد اینورترها و ظرفیت نامی نیروگاه بیان شده است.

در جدول شماره 10، مشخصاتی همچون ولتاژ اتصال به شبکه در اینورتر بیشینه و کمینه درجه حرارت و میانگین در شهر یزد آورده شده است که برای تطبیق ولتاژی آرایش پنل‌ها بسیار مهم است.

در جدول شماره 11، ولتاژ و جریان نامی اینورتر پس از اتصال به مجموعه پنل‌ها به همراه بیشینه و کمینه این پارامترها در بالاترین و پائین‌ترین درجه حرارت آورده شده است که آرایش بهینه شاخه‌های سری و موازی را بیان می‌کند.


در جدول شماره 12، نمودار تطبیق ولتاژ پنل‌ها پس از آرایش بهینه سری- موازی را نشان می‌دهد که باید در دامنه ولتاژ کاری اینورتر با رعایت تغییرات ولتاژ در کمینه و بیشینه درجه حرارت در نظر گرفته شوند را بیان می‌کند.

جدول 9: اطلاعات فنی نیروگاه

<b>Project name:</b>	<b>1.5 MW Yazd</b>	<b>Location:</b>	<b>Iran / Yazd</b>
<b>Project number:</b>			
<b>Project file:</b>		<b>Grid voltage:</b>	<b>3~20 kV</b>
<b>System overview</b>			
<b>6048 x Hyundai HIS-S250MG (PV array 1)</b>			
Azimuth angle: 0°, Inclination: 30°, Mounting type: Free installation, PV peak power: 1.51 MWp			
<b>3 x SC 500CP XT</b>			
<b>Technical data</b>			
Total number of PV modules:	6048	Energy usability factor:	100 %
PV peak power:	1.51 MWp	Performance ratio (approx.):*	88.4 %
Number of inverters:	3	Spec. energy yield (approx.):*	1994 kWh/kWp
Nominal AC power:	1.50 MW	Line losses (In % of PV energy):	---
AC active power:	1.50 MW	Unbalanced load:	0.00 VA
Active power ratio:	99.2 %	Self-consumption:	---
Annual energy yield (approx.):*	3014.32 MWh	Self-consumption quota:	---

جدول 10: اطلاعات کلی نیروگاه و اینورتر

<b>Project name: 1.5 MW Yazd</b>	<b>Location: Iran / Yazd</b>
Project number:	<b>Cell temperature:</b>
Project file:	Record Low Temperature: -10.00 °C
	Average High Temperature: 50.00 °C
	Record High Temperature: 70.00 °C
<b>Part project 1</b>	
<b>3 x SC 500CP XT</b>	
PV peak power:	1.51 MWp
Total number of PV modules:	6048
Number of inverters:	3
Max. DC power (cos φ = 1):	509.00 kW
Max. AC active power (cos φ = 1):	500.00 kW
Grid voltage:	20 kV
Nominal power ratio:	101 % <span style="color: green;">✔</span>
Displacement power factor cos φ:	1

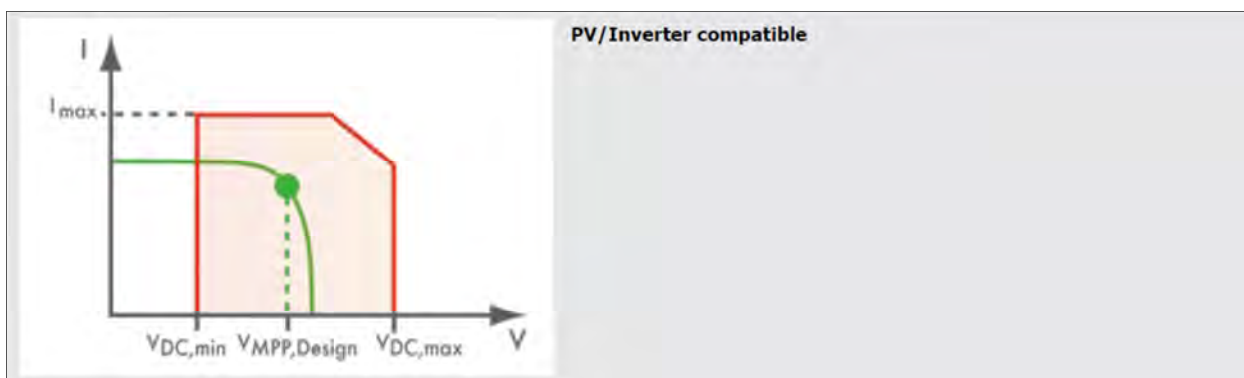


**SC 500CP XT**

جدول 11: مشخصات الکتریکی اینورتر پس از اتصال به پنل‌های خورشیدی

Technical data			
<b>Input A: PV array 1</b>			
2016 x Hyundai HIS-S250MG, Azimuth angle: 0°, Inclination: 30°, Mounting type: Free installation			
	<b>Input A:</b>		
Number of strings:	96		
PV modules per string:	21		
Peak power (input):	504.00 kWp		
Typical PV voltage:	574 V	<span style="color: green;">✔</span>	
Min. PV voltage:	520 V	<span style="color: green;">✔</span>	
Min. DC voltage (Grid voltage 20 kV):	430 V		
Max. PV voltage:	882 V	<span style="color: green;">✔</span>	
Max. DC voltage (PV):	1000 V		
Max. current of PV array:	787.2 A	<span style="color: green;">✔</span>	
Max. DC current:	1250.0 A		

جدول 12: نمودار تطبیق ولتاژی اینورتر و پنل



نیروگاه از جمله انرژی تولید شده در طول یک سال و نمودار کارایی نیروگاه در ماه‌های مختلف سال به همراه تحلیل پارامترهای کلیدی در ماه‌های مختلف سال به شکل جدول آورده شده است.

در شکل‌های شماره 17 و 18 به ترتیب جانمایی کل نیروگاه در بهترین حالت خود از دیدگاه آنالیز سایه‌اندازی و ترسیم نمودار آنالیز سایه در فصول مختلف سال را نشان می‌دهد. شکل شماره 19 کل تلفات سیستم به تفکیک تابشی، DC و AC است و از زمانی که تابش به سطح افق می‌رسد تا زمانی که انرژی به شبکه تزریق می‌شود را بیان می‌کند.

## 2-5- گزارش شبیه‌سازی نرم افزار PVSyst

در شکل شماره 16 پارامترهایی همچون مشخصات جغرافیایی سایت، زاویه نصب پنل و تعداد پنل‌ها، ولتاژ نامی اینورترها، تعداد پنل‌ها فضای مورد نیاز بدون در نظر گرفتن سایه اندازی جهت نصب پنل‌ها با توجه به ابعاد آنها را در اختیار می‌گذارد.

در جدول شماره 13 علاوه بر تکرار برخی مشخصات اینورتر و پنل‌ها اطلاعات دقیق‌تری از آنها را به همراه فاکتورهای تلفات حاصل از سیم‌کشی و دما را در اختیار می‌گذارد.

در جدول شماره 14 خلاصه‌ای از نتایج اصلی خروجی

Grid-Connected System: Simulation parameters			
<b>Project :</b>	1.5mw(1)		
<b>Geographical Site</b>	<b>Yazd</b>	<b>Country</b>	<b>Iran</b>
<b>Situation</b>	Latitude	31.8°N	Longitude 54.3°E
Time defined as	Legal Time	Time zone UT+3	Altitude 1280 m
	Albedo	0.20	
<b>Meteo data :</b>	Yazd, Synthetic Hourly data		
<b>Simulation variant :</b>	<b>New simulation variant</b>		
	Simulation date	18/05/13 01h49	
<b>Simulation parameters</b>			
<b>Collector Plane Orientation</b>	Tilt	30°	Azimuth 0°
<b>Horizon</b>	Free Horizon		
<b>Near Shadings</b>	Linear shadings		
<b>PV Array Characteristics</b>			
<b>PV module</b>	Si-mono	Model	<b>HIS-S250MG</b>
		Manufacturer	Hyundai
Number of PV modules		In series	21 modules
Total number of PV modules		Nb. modules	6048
Array global power		Nominal (STC)	<b>1512 kWp</b>
Array operating characteristics (50°C)		U mpp	578 V
Total area		Module area	<b>9780 m<sup>2</sup></b>
		In parallel	288 strings
		Unit Nom. Power	250 Wp
		At operating cond.	1346 kWp (50°C)
		I mpp	2329 A
		Cell area	8613 m <sup>2</sup>

شکل 16: پارامترهای کلیدی شبیه‌سازی شده در نیروگاه

جدول 13: مشخصات پنل، اینورتر و فاکتورهای تلفات آرایه‌ها

<b>PV module</b>	Si-mono	Model	<b>HIS-S250MG</b>		
		Manufacturer	Hyundai		
Number of PV modules		In series	21 modules	In parallel	288 strings
Total number of PV modules		Nb. modules	6048	Unit Nom. Power	250 Wp
Array global power		Nominal (STC)	<b>1512 kWp</b>	At operating cond.	1346 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)		U mpp	578 V	I mpp	2329 A
Total area		Module area	<b>9780 m<sup>2</sup></b>	Cell area	8613 m <sup>2</sup>
<b>Inverter</b>		Model	<b>Sunny Central 500CP</b>		
		Manufacturer	SMA		
Characteristics		Operating Voltage	430-820 V	Unit Nom. Power	500 kW AC
Inverter pack		Number of Inverter	3 units	Total Power	1500 kW AC
<b>PV Array loss factors</b>					
Thermal Loss factor		Uc (const)	20.0 W/m <sup>2</sup> K	Uv (wind)	0.0 W/m <sup>2</sup> K / m/s
=> Nominal Oper. Coll. Temp. (G=800 W/m <sup>2</sup> , Tamb=20°C, Wind=1 m/s.)				NOCT	56 °C
Wiring Ohmic Loss		Global array res.	4.2 mOhm	Loss Fraction	1.5 % at STC
Module Quality Loss				Loss Fraction	1.5 %
Module Mismatch Losses				Loss Fraction	2.0 % at MPP
Incidence effect, ASHRAE parametrization		IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	bo Parameter	0.05
<b>User's needs :</b>			Unlimited load (grid)		

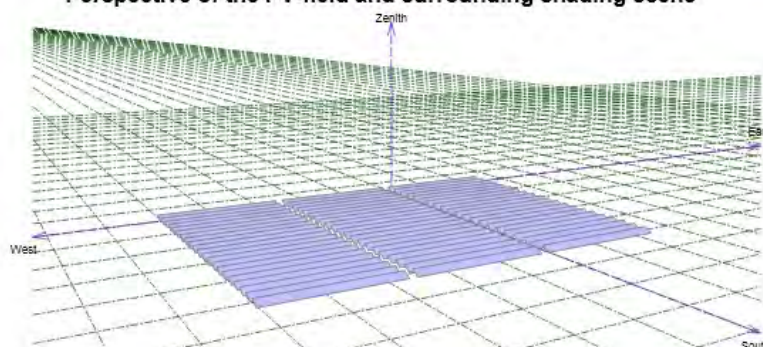
### Grid-Connected System: Near shading definition

**Project :** 1.5mw(1)

**Simulation variant :** New simulation variant

<b>Main system parameters</b>	System type	<b>Grid-Connected</b>			
<b>Near Shadings</b>	Linear shadings				
PV Field Orientation	tilt	30°	azimuth	0°	
PV modules	Model	HIS-S250MG	Pnom	250 Wp	
PV Array	Nb. of modules	6048	Pnom total	<b>1512 kWp</b>	
Inverter	Model	Sunny Central 500CP	Pnom	500 kW ac	
Inverter pack	Nb. of units	3.0	Pnom total	<b>1500 kW ac</b>	
User's needs		Unlimited load (grid)			

Perspective of the PV-field and surrounding shading scene

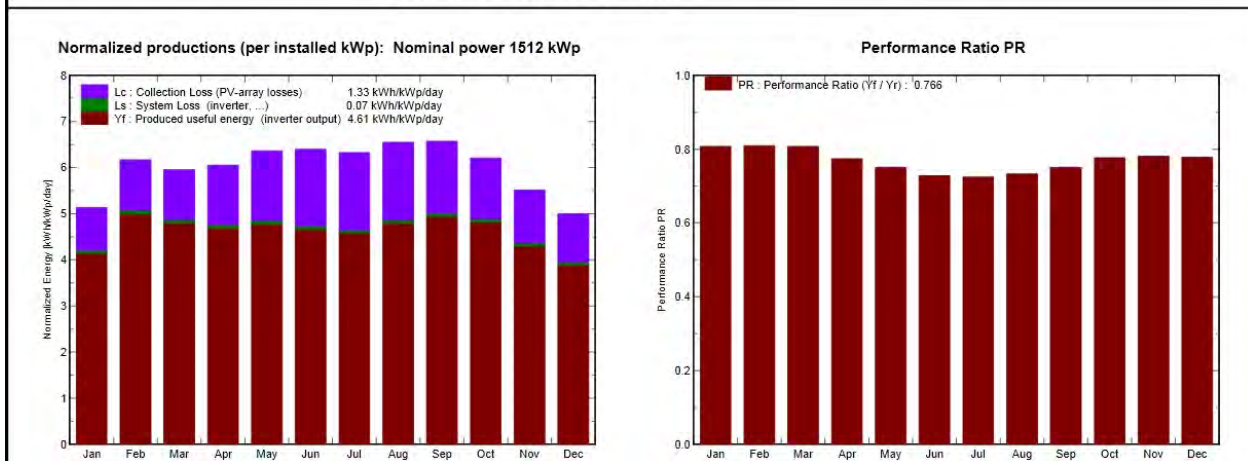


شکل 17: جانمایی 3 بعدی نیروگاه

جدول 14: نمودار و جدول آنالیز کارایی نیروگاه و پارامترهای کلیدی در ماه‌های مختلف سال

Grid-Connected System: Main results			
<b>Project :</b>	<b>1.5mw(1)</b>		
<b>Simulation variant :</b>	<b>New simulation variant</b>		
<b>Main system parameters</b>	System type	<b>Grid-Connected</b>	
<b>Near Shadings</b>	Linear shadings		
PV Field Orientation	tilt	30°	azimuth 0°
PV modules	Model	HIS-S250MG	Pnom 250 Wp
PV Array	Nb. of modules	6048	Pnom total <b>1512 kWp</b>
Inverter	Model	Sunny Central 500CP	Pnom 500 kW ac
Inverter pack	Nb. of units	3.0	Pnom total <b>1500 kW ac</b>
User's needs	Unlimited load (grid)		
<b>Main simulation results</b>			
System Production	<b>Produced Energy</b>	<b>2545 MWh/year</b>	Specific prod. 1683 kWh/kWp/year
	<b>Performance Ratio PR</b>	<b>76.6 %</b>	

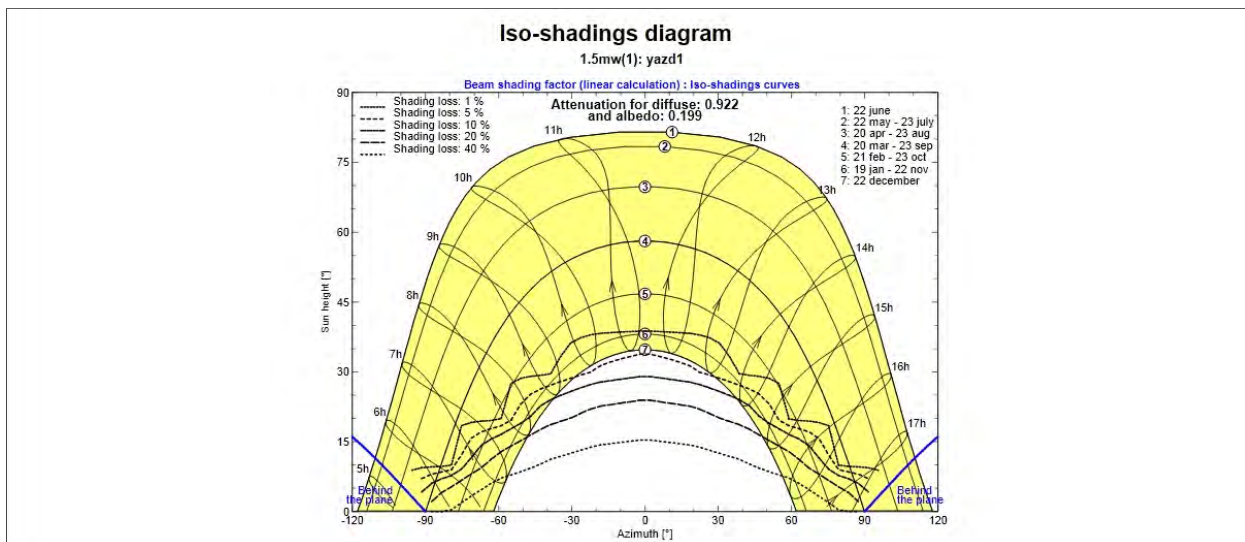
Main simulation results			
System Production	<b>Produced Energy</b>	<b>2545 MWh/year</b>	Specific prod. 1683 kWh/kWp/year
	<b>Performance Ratio PR</b>	<b>76.6 %</b>	



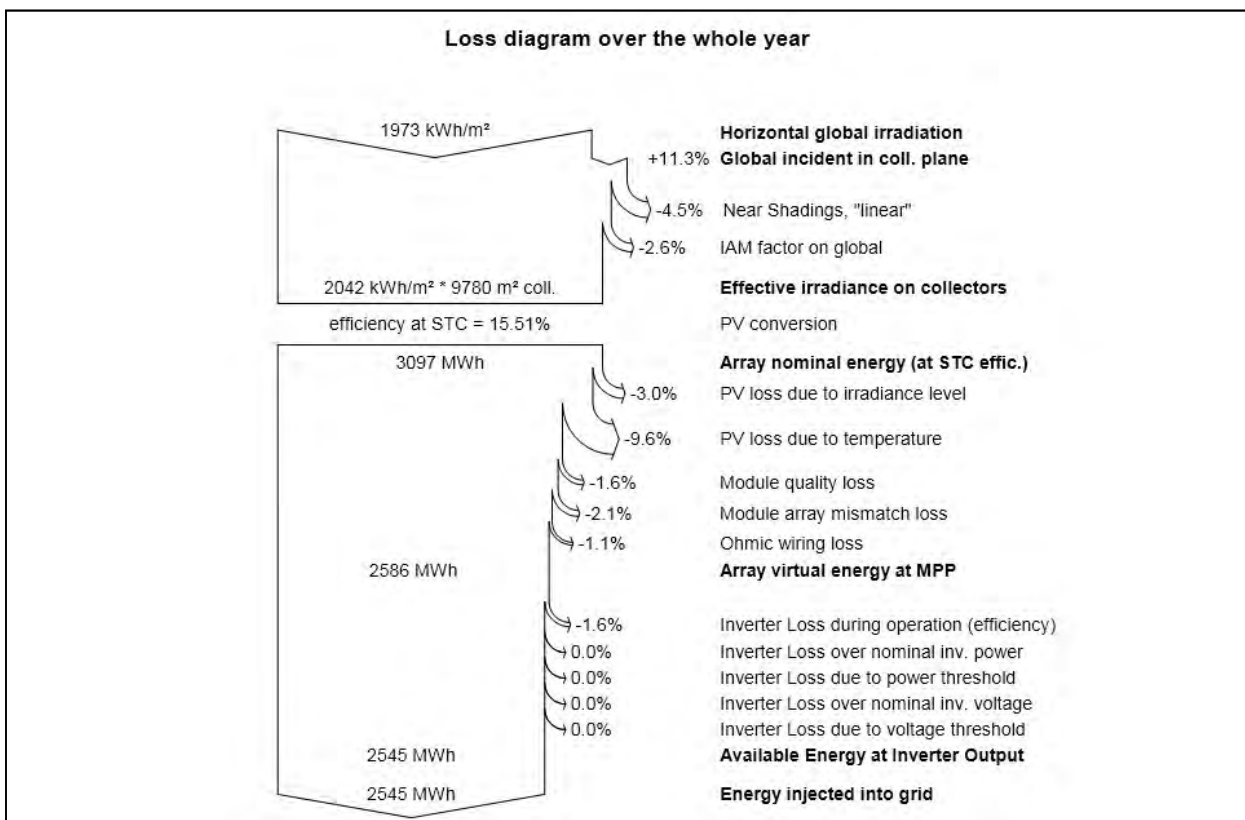
New simulation variant								
Balances and main results								
	GlobHor	T Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	EffArrR	EffSysR
	kWh/m <sup>2</sup>	°C	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	MWh	MWh	%	%
January	107.6	3.20	159.2	144.2	197.3	194.2	12.67	12.47
February	127.4	5.10	172.8	161.4	214.8	211.5	12.71	12.52
March	160.3	9.20	184.5	173.7	228.6	225.1	12.67	12.47
April	179.1	16.10	181.6	169.9	216.2	212.6	12.17	11.97
May	213.0	21.50	197.2	184.5	227.5	223.9	11.79	11.61
June	217.8	26.10	192.0	179.3	214.9	211.4	11.45	11.26
July	217.6	27.90	196.0	183.1	218.0	214.6	11.37	11.20
August	208.3	26.50	203.0	190.8	228.5	224.8	11.51	11.32
September	178.5	22.30	197.1	186.0	227.3	223.7	11.79	11.60
October	150.7	16.60	192.3	181.4	229.3	225.7	12.19	12.00
November	113.4	10.50	165.2	150.9	198.1	195.1	12.26	12.08
December	99.5	5.40	155.0	136.8	185.3	182.4	12.22	12.03
Year	1973.1	15.92	2195.9	2042.0	2585.8	2544.9	12.04	11.85

Legends:

GlobHor	Horizontal global irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
T Amb	Ambient Temperature	E_Grid	Energy injected into grid
GlobInc	Global incident in coll. plane	EffArrR	Effic. Eout array / rough area
GlobEff	Effective Global. corr. for IAM and shadings	EffSysR	Effic. Eout system / rough area



شکل 18: نمودار آنالیز سایه‌اندازی در فصول مختلف سال



شکل 19: نمودار تلفات سیستم از تابش بر سطح تا تزریق به شبکه

### 6- نتیجه‌گیری

شد. ظرفیت مناسب آنها، نحوه اتصال الکتریکی، خروجی و تلفات نیروگاه 1/5 مگاوات با استفاده از نرم‌افزار معرفی شده سانا<sup>6</sup> برای این منظور بدست آمد. نتایج بدست آمده حاکی از تعداد 6048 پنل 250 وات، سه اینورتر 500 کیلووات و خروجی سالانه

در این مقاله اقلیم جغرافیایی و تابشی یزد مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج، حاکی از تابش و شاخص وضوح مساعد منطقه جهت احداث نیروگاه بود. پنل و اینورتر مورد تأیید سانا انتخاب

2545 مگاوات ساعت و تلفات سالانه 552 مگاوات ساعت بود. همچنین چیدمان پنل‌ها در مزرعه برای کاهش تلفات سایه‌افکنی و افزایش خروجی نیروگاه با استفاده از نرم‌افزار PVSyst بررسی شد که در نتیجه آن چیدمان پنل‌های عمودی دو ردیفه در حالت بهینه انتخاب شد. در این حالت، تلفات سایه‌افکنی 6/1% و فاصله بین ردیف‌ها 5/23 متر بدست آمد.

### فهرست منابع

- [1] بهادری نژاد، م؛ فرهمند، ب؛ "طراحی و بررسی اقتصادی سیستم برق خورشیدی برای یک ساختمان اداری در تهران"، بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران 1385.
- [2] Bany, J.; Appelbaum, J.; "The Effect of Shading on the Design of a Field of Solar Collectors", Sol. Cells, Vol. 20, Issue 3, p.p. 201-228, 1987.
- [3] Gopinathan, K.; "Optimization of tilt Angle of Solar Collectors for Maximum Irradiation on Sloping Surfaces", Int. J. Sol. Energy, Vol. 10, Issue 1-2, p.p. 51-61, 1991.
- [4] Barra, O.; Conti, M.; Santamata, E.; Scarmozzino, O.; Visentin, R.; "Shadows' Effect in a Large scale Power Plant", Sol. Energy, Vol. 19, No. 9, p.p. 759-762, 1977.
- [5] Phyo Naing, L.; Srinivasan D.; "estimation of solar power generating capacity", probabilistic methods applied to power systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th international conference on, p.p. 95 - 100, 2010.
- [6] El Mnassri, M.; Leger, A. St.; "Stand Alone photovoltaic solar power generation system: A case study for a remote location in Tunisia", power and energy society general meeting, 2010 IEEE, p.p. 1 - 4, 2010.
- [7] Weinstock, D.; Appelbaum, J.; "Optimal Solar Field Design of Stationary Collectors", ASME J. Sol. Energy Eng., 126, p.p. 898-905, 2004.
- [8] گلکار م؛ مدرسی ج؛ "تعیین زاویه بهینه پنل‌های خورشیدی ثابت برای دریافت بیشترین تابش در شبکه‌های توزیع انرژی در شهرهای مختلف ایران"، هفدهمین کنفرانس شبکه‌های توزیع، تهران، 1391.
- [9] شمس م. ح؛ کیا م؛ همکاران؛ "بهینه سازی تولید در نیروگاه فتوولتائیک متصل به شبکه با کلکتورهای ثابت با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)"، بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، 1390.
- [10] Sunny Design Software
- [11] PVSyst Software
- [12] Google Earth Software
- [13] [www.eosweb.larc.nasa.gov/sse](http://www.eosweb.larc.nasa.gov/sse)
- [14] [www.SMA.de](http://www.SMA.de)
- [15] [www.gaisma.com](http://www.gaisma.com)
- [16] Solarpro Magazin 2009
- [17] Energy Efficiency and Renewable Energy Bulletin. March, 2010