

# 태양열 발전 기술의 동향과 전망



김동윤  
에너지환경정책학과,  
고려대학교  
그린스쿨대학원



김경남  
에너지환경정책학과,  
고려대학교  
그린스쿨대학원

## 요 약

Concentrated solar power(CSP) is receiving attention for its ability to generate dispatchable power from heat stored in thermal energy storage(TES). There are currently four types of CSP technology, however experts expect that only parabolic trough and solar tower are to survive from the market due to its higher efficiency and larger capacity in storage. While the initial cost for installing CSP plant is still expensive, the experts expect that investment cost of CSP would decline to the level which would be competitive with PV or wind in the near term future. In addition, further growth in its installation capacity is expected due to the United States and China's aggressive investments in CSP.

## 서 론

인류의 태양열 사용은 인류 역사 만큼이나 오래됐다. 태양열 에너지의 위력은 기원전 122년, 아르키메데스가 아군 병사들의 구리방패로 태양빛을 모아 적군의 함선을 불태웠다는 전설에서도 잘 나타난다<sup>1)</sup>.

1) 이 전설은 허구라는 것이 정설이지만 2005년 MIT의 2,009라는 연구팀이 실험을 통해 가능성을 증명해내기도 했다.([http://web.mit.edu/2.009/www/experiments/deathray/10\\_ArchimedesResult.html](http://web.mit.edu/2.009/www/experiments/deathray/10_ArchimedesResult.html))

현대에는 이와 마찬가지로 원리로 태양열을 집중해 발전을 하는 기술이 등장했다. 그러나 태양열 발전(Concentrated Solar Power; CSP)으로 수익을 얻기 위한 최소 DNI(Direct Normal Irradiance; 직달일사량) 수준을 갖춘 지역이 한정적이었고 발전단가도 높았다. 또한 결정적으로 재생에너지 시장의 트렌드 세터인 중국이 태양광(Photovoltaic; PV) 기술에 대규모 R&D를 집중하면서 태양열 발전 기술이 들어설 곳이 없어 보였다.

하지만 최근 태양광과 풍력의 단가가 대폭 하락하면서 역설적으로 다시 CSP 기술이 각광을 받기 시작했다. CSP 기술은 기존 태양광과 풍력의 최대 단점인 자연적 조건에 따른 발전의 단속성을 보완할 수 있기 때문이다. 물론 배터리 기술이 이를 해결할 수 있지만 현재 전력저장장치(Battery Energy Storage System; BESS)는 그 가격이 매우 비싸 현실화되기 어렵다. 반면에 CSP는 낮에 발전을 하는 동시에 잉여 태양열을 배터리보다 상대적으로 저렴한 열저장장치(Thermal Energy Storage; TES)에 저장했다가 전력 수요 피크 시간대에 방출해 발전을 할 수 있다. CSP 기술은 다른 재생에너지와 달리 연속적인 전력 생산이 가능하며 이는 곧 임의로 전력 발전 시간과 양을 통제할 수 있음을 의미한다.

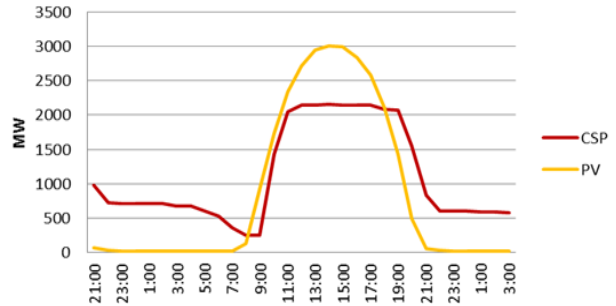
본고는 이런 CSP 기술의 작동원리와 종류 및 장단점에 대해 간략하게 살펴본 후 CSP의 기술동향에 대해 소개한 뒤 미래 전망에 대해 설명하며 마무리하려 한다.

## 본 론

### CSP 기술 작동원리 및 장단점

CSP는 거울을 이용해 태양광선을 한 점이나 선에 집중해 생성된 증기로 터빈을 가동해 전력을 생산한다. 이는 기존 석탄이나 가스의 연소를 통해 발전하는 화력발전소의 원리와 동일하다.<sup>[1]</sup> 다만 열을 얻는 방식이 다를 뿐이다.

CSP 기술의 가장 큰 장점으로는 서론에서 이미 언급했듯이, 원하는 시간대에 원하는 양의 전력(설비용량 한도



Note: Data modified from Red Eléctrica de España(2016)<sup>[3]</sup>

그림 1. 태양열 플랜트와 태양광 플랜트 총 발전량 비교(스페인 8월 맑은 날 사례)

내에서)을 생산할 수 있다는 점이다. 스페인의 PV 플랜트와 CSP 플랜트의 총 발전량을 비교한 그림 1을 보면 PV는 태양이 없는 시간인 21시부터 작동을 멈춘 반면 태양열 발전은 21시부터 다음 날 아침 9시까지 전력을 생산한다.<sup>[2]</sup> 이는 PV 플랜트의 설치용량이 4.6GW, CSP 플랜트 설치용량은 2.3GW에<sup>[3]</sup> 불과한 것을 감안하면, CSP 기술이 전력 수요 피크에 기여할 수 있는 잠재적 가능성이 크다는 것을 알 수 있다. 둘째, CSP 기술은 그 작동 원리가 기본적으로 화력발전소와 동일하기 때문에 기존의 석탄, 가스 발전소와의 조합이 가능하다는 장점이 있다.<sup>[4]</sup> 또한 발전소를 건설하는 데 필요한 부품들은 주로 철, 유리 등 구하기 쉬운 자원들이기 때문에 설치가 용이하다.<sup>[5,6]</sup> 그리고 마지막으로 주택용 규모부터 태양열 발전단지까지 설치 목적에 따라 다양한 규모로 설치를 할 수 있다는 부가적인 장점이 있다.<sup>[7]</sup>

한편 CSP 기술의 단점으로는 태양광 발전이나 풍력 발전에 비해 여전히 높은 투자비용, 가동 및 유지비용을 들 수 있다.<sup>[8]</sup> 또한 태양열 발전이 가능한 최소 직달일사량을 갖춘 지역은 주로 건조한 사막지역이 많은데 비해 CSP는 물 사용량이 많아(스팀 생성용, 냉각용, 거울 세척용 등 Life cycle water use는 MWh 당 약 7 L의 물이 필요하다) 어려움을 겪고 있다. 마지막으로 설비용량 단위 당 토지

2) PTC 플랜트는 그 투자비용이 TES가 없으면 보통 \$4,600-\$8,000, TES가 장착되었으면 \$5,500/kW, 동급 ST 플랜트는 \$5,700/kW 정도이다. O&M 비용은 \$0.02-\$0.04/kWh 정도이다.<sup>[8]</sup>

사용 면적이 크다(Life cycle land use는 MWh 당 약 0.25 m<sup>2</sup>가 소요)는 단점이 있다.<sup>[9]</sup>

### CSP 기술 종류<sup>[10,11]</sup>

CSP 플랜트는 기술에는 따라 4가지 종류로 나누어진다. 이는 각각 Dish/Stirling Engine, Parabolic Trough, Linear Fresnel, Solar Tower이다. 각각의 기술에 대한 설명은 다음과 같다:

#### Dish/Stirling Engine

Dish/Stirling Engine 기술은 포인트 포커스 콜렉터(Point Focal Collector)로 태양을 두 축으로 추적하여, 접시 모양의 반사판 중앙에 위치한 리시버에 태양광을 집중해 열을 발생시킨다. 리시버 내부에 있는 유체는 그 온도가 750°C 이상까지 올라가며 이 내부에 장착된 엔진 혹은 가스 터빈으로 전력을 발생시킨다. 이 기술의 효율은 약 20~30% 정도이며<sup>[12]</sup> 용량은 다른 기술에 비해 작은 편이다. 미국 유타 주의 1.5MW 용량의 Tooele Army Depot 플랜트가 현재 가동되고 있는 유일한 Dish/Stirling Engine 종류의 CSP 플랜트이다.<sup>[3]</sup>

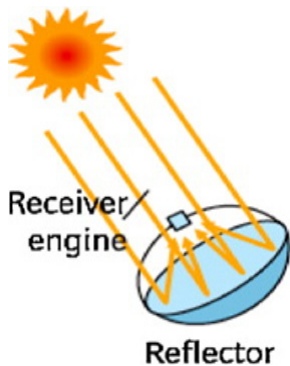


그림 2. Dish/Stirling Engine의 모형<sup>[10]</sup>

#### Parabolic Trough

Parabolic Trough는 여러 개의 곡선형 거울이 태양광을 가운데에 있는 튜브로 모아 발전하는 기술이다. 튜브 안에

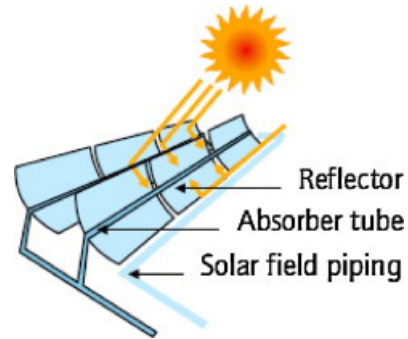


그림 3. Parabolic Trough의 모형<sup>[10]</sup>

흐르는 합성유는 열을 전달하는 매개체로서 그 온도가 약 400°C까지 상승하게 된다. 합성유는 파이프에서 열 교환기로 이동하게 되고 여기서 물은 증기로 전환되어 가열된다. 이 가열된 증기가 터빈을 가동하고 전력을 발생시킨다. 그리고 물은 식혀서 응결된 상태로 다시 열 교환기로 돌아온다. 효율은 약 15% 정도이며<sup>[12]</sup> 미국 캘리포니아 주에 위치한 250MW 용량의 Genesis Solar 플랜트로 대표된다. 가장 기술적 성숙도가 높은 종류의 CSP 기술이다.<sup>[3]</sup>

#### Linear Fresnel

프레넬 렌즈는 빛을 굴절시켜 하나의 중심으로 모으는 역할을 하는데 Linear Fresnel 기술은 거울이 직선으로 나열되어 프레넬 역할을 한다. 이는 쉽게 생각하면 곡선으로 되어 있는 Parabolic Trough의 거울을 여러 개의 직선 거울로 분리한 것이다. 따라서 효율은 다른 기술보다 낮은

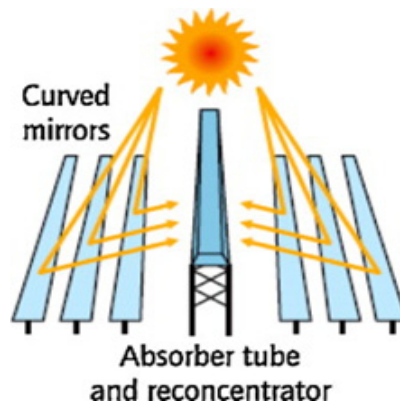


그림 4. Linear Fresnel의 모형<sup>[10]</sup>

편이지만(약 8~10%)<sup>[12]</sup> 설비비용이 상대적으로 저렴하다.<sup>[10,13]</sup> 스페인 무르시아 지역에 설치되어 있는 30MW 용량의 Puerto Errado 2 플랜트가 이 기술이 사용된 대표적인 CSP 플랜트이다.<sup>[3]</sup>

### Solar Tower

Solar Tower는 Heliostat이라고 불리는 여러 개의 거울들이 시시각각 변하는 태양 위치에 따라 움직여 태양광을 Tower의 꼭대기에 위치한 리시버로 집광하는 기술이다. 이렇게 모아진 열로 가열되는 열전달 매개체(물/증기 혹은 Molten salt)는 그 온도가 1,500°C까지 상승하며 발전원리는 Parabolic Trough와 동일하다. 효율은 약 20~35% 정도이며<sup>[12]</sup> 미국 캘리포니아 주에 위치한 392MW Ivanpah Solar 플랜트로 대표된다.<sup>[3]</sup>

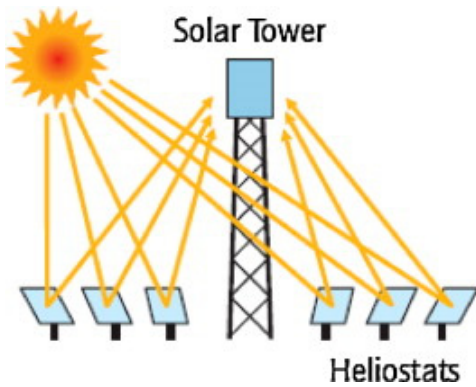
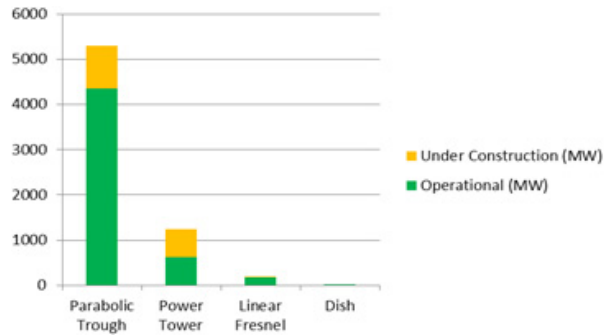


그림 5. Solar Tower의 모형<sup>[10]</sup>

각 기술 별 현황을 살펴보면 Parabolic Trough의 경우, 가동 중인 플랜트의 총 설비용량은 약 4.2GW이며 약 0.95GW가 건설 중에 있어 태양열 발전 기술 중 가장 많은 비중을 차지하고 있다. 이어서 Solar Tower는 약 0.6GW가 가동 중이며 약 0.7GW가 건설 중이다. Solar Tower 기술은 최근에 들어 대규모 건설과 가동이 성공적으로 이루어졌으며, 열저장장치 사용이 비교적 용이해 앞으로 점진적인 투자와 설치 확대가 기대된다. Linear Fresnel과 Dish/Stirling Engine 기술은 각각 0.16GW, 0.01GW가 가동 중이며, 현재 건설 중인 플랜트는 없다. 이 두 기술은 낮은

효율로 인해 점차 도태될 것으로 예상된다. 앞서 설명한 현황과 수치는 아래 그림 6에 나타나 있다.<sup>[3]</sup>



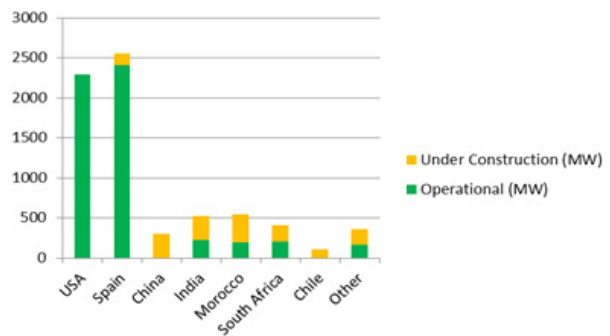
Note: Data modified from NREL(2017)<sup>[3]</sup>

그림 6. 전세계 CSP 기술별 설치 현황

### CSP 플랜트 전세계 설치현황

태양열 발전은 앞서 설명했듯이 DNI가 일 5kWh/m<sup>2</sup> 혹은 연 1,825kWh/m<sup>2</sup> 이상 되는 지역에서만 수익이 보장된다.<sup>[14]</sup> (참고로 한국은 DNI가 가장 높은 지역인 부산도 연 1,400kWh/m<sup>2</sup>를 넘지 못한다<sup>[15]</sup>) 따라서 CSP 플랜트 설치가 유리한 곳은 남유럽(스페인 등), 미국 서부(캘리포니아, 네바다, 애리조나 등), 중동지역 및 북아프리카(모로코, 요르단, 튀니지 등), 남아프리카공화국, 중국의 고비 사막, 인도 등이다.

그림7의 그래프는 주요 국가별 CSP 설치 현황 및 CSP 건설 현황을 보여준다.<sup>[3]</sup> 스페인은 그 용량이 약 2.6GW로



Note: Data modified from NREL(2017)<sup>[3]</sup>

그림 7. 국가별 CSP 설치 현황



선두를 지키고 있다. 2007년부터 시행된 발전차액지원제도(Feed in Tariff; FIT)가 2012년에 급작스럽게 폐지되어 투자자들의 신뢰를 잃게 되었다.<sup>[16]</sup> 그 이후로 기존 프로젝트는 무산되었고 새로운 플랜트 건설 계획이 없다.

반면 미국은 2011년, 미국 에너지부(Department of Energy; DOE)에서 시행된 SunShot 이니셔티브에 힘입어 태양열 발전 플랜트 설치용량의 급격한 성장을 이루어냈다. 총 \$58.4억 규모의 차관을 제공하여 Crescent Dunes Project, Ivanpah Project, Genesis Project, 그리고 Mojave Project 등을 이루어냈고, 총 \$1.4억을 CSP 관련 R&D에 투자해 스페인과 비슷한 수준인 약 2.2GW의 설비용량을 갖추게 되었다.<sup>[17]</sup>

중국은 오히려 2020년까지 10GW 규모 플랜트를 설치하기로 했던 기존 계획에서 5GW로 후퇴했다. 한편, 단기적으로는 2018년까지 1.35GW 규모의 태양열 플랜트를 1.15 CNY/kWh(\$0.22/kWh)의 FIT로 건설하는 것을 목표로 내세웠다. 그 일환으로 2016년 9월, 중국 에너지국(China's National Energy Agency; CNEA)은 총 1GW의 설비 규모에 이르는 태양열 플랜트의 리스트(9개의 Solar Tower와 7개 Parabolic Trough, 그리고 4개의 Linear Fresnel)를 발표했다.<sup>[18]</sup> 목표한대로 중국이 2020년까지 5GW의 설비를 갖추게 되면 이는 태양열 발전 부문 선두주자인 미국과 스페인의 수준과 비슷해진다.

인도는 초반에 여러 악재가 겹쳐 풍부한 DNI를 갖췄음에도 태양열 발전 플랜트 건설에 부진했다. 인도는 신뢰할 만한 DNI 측정 데이터가 없었고 태양열 발전 플랜트 건설은 물론 시범건설 경험도 전무했고, 따라서 자본 투자를 효과적으로 성장으로 견인해낼 자국기업이 부족했다.<sup>[14]</sup> 그 외에도 정책적 측면에서 인도는 무분별한 Reverse-auction을 통해 부실한 기업이 참여해 기한 내에 건설하는데 실패했고, 이는 투자자들의 신뢰에 큰 타격을 주었다.<sup>[16]</sup>

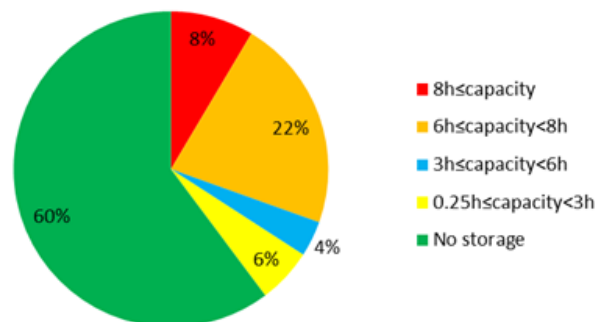
그 외 중동지역 및 북아프리카(Middle East North Africa; MENA)는 최근 들어 태양열 발전에 많은 투자를 감행하고 있다. 그 중 성공적인 예로 모로코의 160MW 규모 NOOR I 태양열 발전 플랜트(Parabolic Trough)가 있

다. 같은 지역에 NOOR 2(200MW Parabolic Trough)와 3(150MW Solar Tower)가 건설 중에 있다.<sup>[19]</sup> 한편 튀니지에서는 TuNur라는 프로젝트가 진행 중이다. 이는 DNI가 풍부한 튀니지의 사하라 사막에 2,250MW 규모의 태양열 발전 플랜트를 건설해 2GW HVDC 해저 케이블로 이탈리아에 송전하는 프로젝트로 매년 약 9,450GWh의 전력을 발생시킬 것으로 예상된다.<sup>[20]</sup>

이처럼 미래의 전 세계 태양열 발전 기술 시장은 중국과 인도 등의 신흥경제국과 모로코 등으로 대표되는 MENA 지역이 선도해 나갈 것으로 예상된다. 해해 인구상승과 더불어 전력수요가 기하급수적으로 증가하는 중국, 인도의 저역 피크에 태양열 발전 기술이 큰 기여를 할 것으로 보이며, 모로코 등 MENA에서는 이 기술에의 투자를 통해 경제성장의 효과를 노릴 것으로 기대된다.

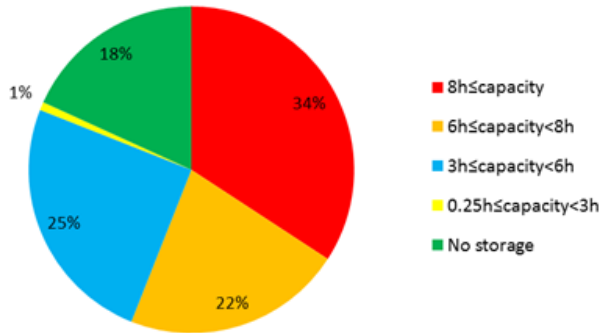
## CSP 전망

CSP는 재생에너지의 단속성을 극복할 수 있는 TES가 핵심이기 때문에 점차 더 큰 용량의 TES를 장착한 플랜트가 증가하는 추세이다. 그림 8에 나와 있듯이 이미 지어진 CSP 플랜트의 60%는 TES가 없고 이는 연속적인 발전이 불가능하다는 의미이다. 반면 그림 9에서 볼 수 있듯이, 현재 건설 중인 플랜트의 34%는 용량이 8시간 이상인 TES를, 22%는 용량이 6시간 이상 8시간 미만인 TES를 장착



Note: Data modified from NREL(2017)<sup>[3]</sup>

그림 8. CSP 플랜트의 TES 용량별 비중 현황



Note: Data modified from NREL(2017)<sup>[3]</sup>

그림 9. 현재 건설 중인 CSP의 TES 용량별 비중

표 1. 2015/2025 재생에너지 간 투자비용 및 LCOE 비교

	Investment cost (USD/kW)		LCOE (USD/kWh)	
	2015	2025	2015	2025
PV	1,810	790	0.13	0.06
CSP(PTC)	5,550	3,700	0.15	0.09
CSP(ST)	5,700	3,600	0.15	0.08
Wind(on)	1,560	1,370	0.07	0.05
Wind(off)	4,650	3,950	0.18	0.12

Note: Modified from IRENA(2016)<sup>[8]</sup>

할 것으로 계획되어 있으며 TES가 없는 플랜트는 18%에 불과하다.<sup>[3]</sup>

한편 CSP는 태양광발전 및 풍력발전 기술과 마찬가지로 꾸준히 LCOE가 감소하는 추세를 보이고 있다. IRENA(2016)에 의하면(표 1) 2025년에는 kWh당 LCOE(2015년 미국 달러 기준)가 PTC는 0.15에서 0.09로, ST는 0.15에서 0.08로 떨어질 것으로 보이며 이는 약 40% 정도의 하락이다. 2025년 CSP의 LCOE를 다른 발전기술과 비교해 보면 태양광과는 \$0.02~0.03/kWh, 풍력과는 \$0.03~0.04/kWh 정도 차이가 난다. 이렇듯 CSP 기술이 미래에는 더욱 경쟁력을 갖출 것으로 기대된다.<sup>[8]</sup>

## 참고문헌

[1] Y. Tamaura et al., "Thermodynamic performance of a

hybrid power generation system using biomass gasification and concentrated solar thermal processes", Appl Energy, Vol. 160, pp. 664-672, 2015.

[2] Red El ctrica de Espa a, "Real-time Demand and Generation", <http://www.ree.es/en/activities/realtime-demand-and-generation>, 2017.

[3] NREL, "Concentrating Solar Projects", 2017.

[4] G.S. Miguel, B. Corona, "Hybridizing concentrated solar power(CSP) with biogas and biomethane as an alternative to natural gas : analysis of environmental performance using LCA", Renew Energy, Vol. 66, pp. 580-587, 2014.

[5] NREL, "Collector/Receiver Characterization", 2009.

[6] NREL, Advanced Reflector and Absorber Materials, 2010.

[7] Jay Prakash Bijarniya, K. et al., "Concentrated solar power technology in India: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 63, pp. 593-603, 2016.

[8] IRENA, "The power to change: solar and wind cost reduction potetial to 2025", 2016.

[9] Klein et al. "Life cycle assessment of greenhouse gas emissions, water and land use for concentrated solar power plants with different energy backup systems" Vol. 63, pp. 935-950, 2013.

[10] OECD/IEA, "Technology roadmap: concentrating solar power", 2010


[11] Ummadisingu A., et al. "Concentrating solar power - Technology, potential and policy in India", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 5169-5175, 2011.

[12] Müller-Steinhagen H, Trieb F. Concentrating solar power - a review of the technology. Ingenia - Quarterly of the Royal Academy of Engineering. 18 Feb. - Mar. 2004.

[13] S.A. Kalogirou, "Solar thermal collectors and applications", Progress in Energy and Combustion Science, 30, pp. 231-295, 2004.

[14] Centre for Science and Environment, "The State of Concentrating Solar Power in India", 2015.

[15] SolarGIS, 2014.

- 
- [16] I. Perez et al. “National Incentive Programs for CSP – Lessons Learned”, Energy Procedia, Vol. 49, pp. 1869–1878, 2014.
- [17] DOE, “Tackling challenges in solar”, 2014.
- [18] China’s National Energy Administration, 2016.
- [19] Moroccan Agency for Solar Energy; MASEN, November 2016.
- [20] Nur Energie, <http://www.nurenergie.com/index.php/english/projects/tunisia>, 16 MAY 2017.