بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

طراحی متمرکز کننده‌های آینه‌ای خطی فرنلی برای نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی

هادی برزویی

[1]دانشکده مهندسی، دانشگاه فناوری‌های نوین سبزوار، کد پستی ۹۶۱۵۹۱۸۳۳۹
h_borzouei@yahoo.com

از بازتابنده‌های سهموی خطی برای پیش‌گرم یا تامین حرارت مورد نیاز نیروگاهی استفاده می‌کنند. بازتابنده‌های فرنلی جایگزین مناسب و ارزان قیمتی برای متمرکز کننده‌های سهموی خطی هستند. در این شبیه‌سازی، نمونه کوچک مقیاسی از بازتبانده فرنلی با آینه‌های تخت شبیه‌سازی شده و با کمک معیار دهانه عددی نموداری عمومی برای طراحی بازتابنده فرنلی در هر مقیاس دلخواهی ایجاد شده است. در این طراحی تعداد ۳۷ آینه با پهنای ۱۰ سانتی متر برای دریافت ۶۸ درصد نور رسیده به سطح مقطع نورگیر استفاده شده است. زاویه دید سامانه متمرکز کننده برای رسیدن به بازده ۶۸درصد، ۶۵ درجه است. استفاده از آینه‌های مقعر با شعاع انحنای ۵ متر به جای آینه‌های تخت، شدت نور متمرکز شده بر روی لوله انتقال حرارت را ۲,۵ برابر افزایش داده است.

کلید واژه- انرژی خورشیدی، بازتابنده فرنلی، آینه‌های متمرکز کننده، نیروگاه حرارتی، آینه‌های مقعر.

Design of Linear Fresnel Reflector as A Solar Thermal Generator

Hadi Borzouei

Engineering Faculty, Sabzevar university of new technology, Iran, 9615918339
h_borzouei@yahoo.com

The parabolic linear reflectors are the common concentrator for solar thermal generators. The linear Fresnel reflectors are the best replacement for linear parabolic concentrators. In this study the small scale of linear Fresnel reflectors with the flat mirror designed. The numerical aperture criteria assisted to make lockup table. In this simulation, the 37 discrete mirror of 10 cm width collects the 68% of received optical power. The half width of overall system is 2.4 m and the system field of view is 65 degrees. Replacement of flat mirror by concave mirror of 5 m radiuses has increased the intensity on absorber pipe by 2.5 times.

Keywords: Fresnel reflector, Mirror Concentrator, Solar Energy, Thermal power generator.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-10]

مقدمه

نیروگاه‌های خورشیدی فرنلی یکی از جدیدترین نیروگاه-های حرارتی خورشیدی هستند [۱]. این نیروگاه‌ها با هندسه ساده‌تر نسبت به نیروگاه‌های سهموی خطی، هزینه‌های ساخت کمتری دارند. [۲].

دست‌یابی به دماهای بالاتر توسط نیروگاه‌های بازتابی فرنلی بازده مولد برق را افزایش می‌دهد. برای دست‌یابی به دمای بالاتر باید تمرکز شدت نور بیشتر شود و برای افزایش شدت نور روی لوله انتقال حرارت، دو راه وجود دارد: افزایش تعداد آینه‌ها و کانونی کردن بیشتر نور توسط انحنا دادن به آینه‌ها. انحنای هر آینه باعث می‌شود که پهنای لکه روی لوله جاذب کمتر شود. در این مقاله اثر تعداد آینه‌ها بر شدت نور متمرکز شده بررسی شده و نیزآینه‌های تخت با آینه‌های مقعر جایگزین شده‌اند. بهینه انحنای هر آینه محاسبه شده و اثر مضاعف آن بر شدت روی لوله مطالعه شده است.

روش طراحی

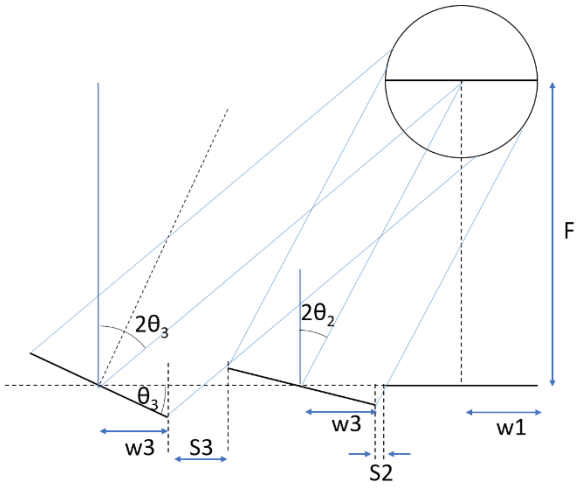
متمرکز کننده فرنلی ترکیبی از آینه‌های تخت است که تحت زاویه‌ها و در فاصله‌های مشخص در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند (شکل ۱). در این طراحی، پهنای تمام آینه‌های نواری یکسان فرض شده است. مرکز تمام آینه‌ها روی خط زمینه قرار داشته و آینه‌ها نسبت به این مرکز می‌چرخند. محل قرارگیری آینه‌ها توسط رابطه ۲ محاسبه می‌شود و زاویه سمت‌گیری هر آینه از رابطه بازگشتی ۳ محاسبه می‌شود.

$$w_n = w_1 \cos(\theta_n) \qquad (۱)$$

$$S_n = w_1 \tan(2\theta_n)(\sin(\theta_n) + \sin(\theta_{n-1})) \qquad (۲)$$

$$F \tan(2\theta_n) - w_n - S_n = \left(\sum_{1}^{n-1} 2w_j + S_j \right) - w_1 \qquad (۳)$$

که n شماره آینه، w_n پهنای موثر آینه، θ_n زاویه سمت-گیری آینه نسبت به محور افقی، S_n شکاف بین هر آینه و آینه قبلی و F فاصله کانونی بازتابنده فرنلی است.



شکل ۱: هندسه متمرکز کننده فرنلی برای کانونی کردن نور خورشید بر لوله انتقال سیال.

در بازتابنده فرنلی به علت شکاف خالی بین دو آینه نواری، توان دریافتی تابعی خطی از پهنای سطح مقطع نورگیر متمرکز کننده آینه فرنلی نیست. با افزایش اندازه دهانه عددی در بازتابنده فرنلی، فاصله‌های تاریک بین دو آینه متوالی نیز بیشتر شده و مقدار بیشتری از توان رسیده به پهنای کل متمرکز کننده هدر خواهد رفت. ما برای مطالعه رفتار بازتابنده فرنلی با هر اندازه و ابعادی از مشخصه شناخته شده دهانه عددی استفاده می‌کنیم:

$$NA = n \sin(\theta_m) \qquad (۴)$$

که n ضریب شکست محیط و θ_m بزرگترین زاویه تابش نور به متمرکز کننده فرنلی است. بزرگ شدن دهانه عددی معادل افزایش تعداد آینه‌ها است و توان بیشتری از نور خورشید بر لوله انتقال حرارت متمرکز خواهد شد.

علاوه بر اثر دهانه عددی، انحنای آینه‌ها نیز بر شدت نور اثر دارند که تا کنون محاسبه سرراست برای آن انجام نشده است. اگر به جای آینه‌های نواری تخت از آینه‌های

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-10]

مقعر استفاده شود پهنای لکه نور روی لوله جاذب کمتر شده و تمرکز نور بیشتر خواهد شد. در تابش خارج از محور به آینه‌ی مقعر، رابطه بین جسم و تصویر برای پرتوهای مماسی (تانژانتی) از معادله زیر محاسبه می‌شود [۳]:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{2}{R\cos(\theta)} \qquad (۶)$$

که p محل جسم نسبت به آینه، q محل تصویر پرتوهای مماسی، R شعاع انحنای آینه مقعر و θ نصف زاویه بین پرتو تابش و بازتابش است.

همانگونه که در **Error! Reference source not found.** رسم شده است، در تابش خارج از محور و در زاویه 2θ، اندازه فاصله کانونی هر آینه با کسینوس زاویه کوچک می‌شود. پهنای a اندازه لکه ناشی از بیرونی‌ترین آینه بر روی لوله جاذب از تناسب مثلث‌ها بدست می‌آید:

$$\frac{a}{L-f\cos(\theta)}=\frac{w\cos(\theta)}{f\cos(\theta)} \qquad (۷)$$

که L فاصله لوله جاذب تا آینه، d فاصله لوله تا نقطه کانونی و θ نصف زاویه بین تابش و بازتابش است. با انتخاب تعداد آینه‌های لازم برای ساخت بازتابنده فاصله آخرین آینه تا محور مشخص می‌شود. شعاع انحنای آینه‌ها از رابطه زیر و بر حسب فاصله آینه وسط تا مرکز لوله و فاصله آخرین آینه تا مرکز لوله محاسبه می‌شود:

$$R=2f=2\frac{L_2+L_1}{\cos(\theta_1)+\cos(\theta_2)} \qquad (۹)$$

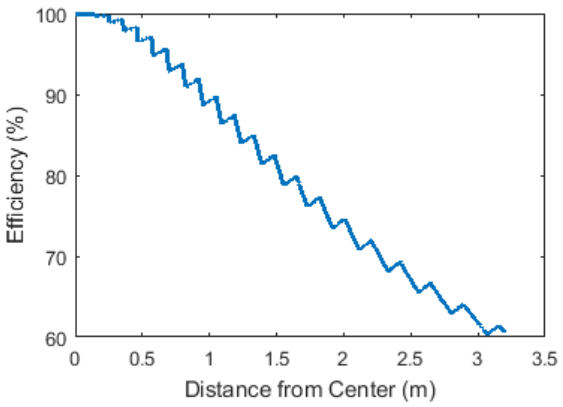
شبیه سازی

برای آنکه مقیاس کردن طراحی انجام شده به اندازه‌های بزرگ‌تر یا کوچک‌تر امکان پذیر باشد، در شبیه‌سازی‌ها، ارتفاع قرارگیری لوله جاذب ۱ متر، پهنای آینه‌ها ۱۰ سانتی‌متر و قطر لوله هم ۱۰ سانتی‌متر (معادل بزرگ‌ترین سطح مقطع موثر آینه) در نظر گرفته شده است. روابط بازگشتی ۱ تا ۳ توسط محیط متلب محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: نتایج طراحی اپتیکی برای محل آینه‌ها و زاویه قرارگیری آن‌ها در نیروگاه بازتابنده فرنلی خورشیدی.

شماره آینه	محل قرارگیری	زاویه	شکاف بین دو آینه
۱	۰	0	0.25
۲	۱۰۰,۲	2.86	1.50
۳	۲۰۱,۴	5.69	3.75
۴	۳۰۴,۳	8.46	6.96
۵	۴۰۹,۸	11.14	11.15
۶	۵۱۸,۶	13.71	16.25
۷	۶۳۱,۵	16.14	22.24
۸	۷۴۹,۲	18.42	29.10
۹	۸۷۲,۶	20.55	36.80
۱۰	۱۰۰۲,۴	22.53	45.33

بازده اپتیکی سامانه در شکل ۲ رسم شده است. توان بازتاب شده روی لوله به توان تابیده شده به واحد سطح محاسبه شده است. شکستگی ایجاد شده در رسم نمودار از گسسته بودن تعداد آینه‌ها ناشی می‌شود و شکل ۳ رفتار زاویه میدان دید و اندازه دهانه عددی را بر حسب فاصله مرکز آینه‌ها از وسط سامانه متمرکز کننده نشان می‌دهد.



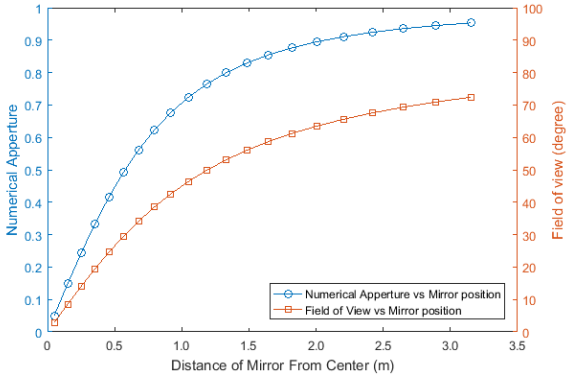
شکل ۲: بازده توان رسیده به لوله جاذب بر حسب فاصله روی محور قرار گیری آینه‌ها.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-10]

در بررسی تجربی انجام شده توسط مورین و همکاران[۴] هزینه تولید انرژی برق بر حسب تعداد آینه‌ها محاسبه شده است. ارتفاع لوله از آینه اولیه ۷٫۵ متر و پهنای کل گیرنده ۳۵ متر است که از هر طرف ۱۷٫۵ متر را در بر می‌گیرد. زاویه دید آخرین آینه ۶۵ درجه محاسبه شده است. از طرفی، در شکل۳ زاویه ۶۵ درجه با فاصله ۲٫۴ متر معادل است و اگر در ارتفاع ۷٫۵ متر ضرب شود فاصله ۱۸ متر را تایید می‌کند که مطابقت بسیار خوبی با ۱۷٫۵ متر گزارش شده در نتایج تجربی دارد. شکل ۳ مقیاس خوبی برای طراحی نیروگاه فرنلی در هر اندازه دلخواه ایجاد می‌کند.

با انتخاب ارتفاع لوله از متمرکز کننده و زوایه دید لوله از منظر آخرین آینه فاصله آخرین آینه توسط شکل ۳ محاسبه شده و توسط ارتفاع لوله مقیاس می‌شود. بازده اپتیکی بازتابنده نیز به کمک فاصله آخرین آینه توسط شکل ۲ محاسبه می‌شود.



شکل ۳: (سمت راست) دایره‌ها تغییرات دهانه عددی را بر حسب فاصله هر آینه تا مرکز نشان می‌دهند. (سمت چپ) مربع‌ها تغییرات میدان دید را بر حسب فاصله هر آینه تا مرکز نشان می‌دهند

با انتخاب آینه‌های مقعر، توان اپتیکی بر روی لوله نازک‌تری متمرکز خواهد شد. اگر پهنای موثر ۴٫۸ متر با بازده ۶۸ درصد برای دریافت نور فرض شود. فاصله دورترین آینه تا لوله ۲٫۴ متر خواهد بود. زاویه دید آخرین آینه توسط لوله ۶۵ درجه، فاصله آینه مرکزی تا لوله ۱ متر و فاصله آخرین لوله ۲٫۶ و شعاع انحنای آینه‌های نواری پنج متر محاسبه می‌شود. با جایگزینی آینه‌های مقعر با آینه‌های تخت، قطر لوله جاذب از ۱۰ به ۴ سانتی‌متر کاهش یابد که معادل ۲٫۵ برابری شدت نور است.

نتیجه

با استفاده از مفهوم دهانه عددی، مقیاسی تولید شده است که رابطه بین ارتفاع لوله جاذب، پهنای کل بازتابنده و بازده اپتیکی سامانه را میسر می‌سازد. نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شده و کارایی این روش تایید شده است. در این شبیه‌سازی اثر زاویه دید بر تعداد آینه‌ها و بازده اپتیکی بازتابنده‌های فرنلی بررسی شده است. اندازه‌های به کار رفته در شبیه‌سازی تبدیل به مقیاس‌های کوچک‌تر و بزرگ‌تر را به راحتی میسر می‌سازد.

برخلاف طراحی‌های رایج در بازتابنده‌های فرنلی، از آینه‌های خمیده برای بازتاب نور استفاده شده و با این انتخاب، تمرکز نور بالا رفته و شدت بیشتری روی لوله جاذب متمرکز می‌شود. روش سرراست و دقیق برای محاسبه شعاع انحنای بهینه در آینه‌ها بر حسب اندازه‌های بازتابنده ارایه شده است.

مرجع‌ها

[1] Xie, WT, YJ Dai, RZ Wang, and K Sumathy. "Concentrated Solar Energy Applications Using Fresnel Lenses: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, no. 6 (2011): 2588-606.

[2] Mathur, SS, TC Kandpal, and BS Negi. "Optical Design and Concentration Characteristics of Linear Fresnel Reflector Solar Concentrators—Ii. Mirror Elements of Equal Width." *Energy Conversion and Management* 31, no. 3 (1991): 221-32

[3] Dalton, Murphy L. "Astigmatism Compensation in the Czerny–Turner Spectrometer." *Applied optics* 5, no. 7 (1966): 1121-23.

[4] Morin, G., et al. "Road map towards the demonstration of a linear Fresnel collector using a single tube receiver". in *13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies*. 2006

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-10]