بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

ارزیابی حرارتی کندکننده زیمان بدون استفاده از سامانه خنک کننده جانبی

داود رزاقی، حسین شاهرخ آبادی، رضا گودرزی

پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

davrazzaghi@yahoo.com, hshahrokhabadi@aeoi.org.ir, rego.physics@gmail.com

چکیده – در این پژوهش کندکننده زیمان به عنوان یک بخش اساسی از سامانه سردسازی لیزری معرفی و طراحی گردید. طراحی حاضر شامل ۱۰ سیم‌لوله دارای طول‌های مختلف می‌باشد که به صورت عمودی روی هم قرار گرفته‌اند. توزیع سه بعدی دما درون کندکننده زیمان با استفاده از روش المان محدود محاسبه شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد حداکثر دمای کندکننده زیمان طراحی شده با افزایش جریان از ۰٫۵ A تا ۲ A از ۳۰۲ K تا ۳۴۰ K می‌رسد. به علاوه با افزایش رسانندگی حرارتی عایق الکتریکی به کار رفته در کندکننده زیمان طراحی شده از ۴-۱۴ W/m.K دمای بیشینه سامانه حدود ۳ درجه سانتی گراد کاهش یافته است.

کلید واژه- تحلیل حرارتی، روش المان محدود، سردسازی لیزری، کندکننده زیمان،گرمایش اهمی.

Zeeman slower heat assessment without the utilization of axillary cooling system

Davood Razzaghi, Hossein Shahrokhabadi, Reza Goodarzi
Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran
davrazzaghi@yahoo.com, hshahrokhabadi@aeoi.org.ir, rego.physics@gmail.com

Abstract- In this research, Zeeman slower was introduced and designed as an essential part of the laser cooling technology. Present configuration consists of 10 vertically aligned solenoids with different lengths. Three dimensional temperature distribution of the devised instrument has been calculated through the finite element method. Increment of the maximum temperature of Zeeman slower from 302 K to 340 K by the enhancement of applied current from 0.5 A to 2 A is demonstrated by the outcomes of the present study. In addition, growth of heat conduction coefficient of applied electrical insulator from 4 to 14 W/m.K leads to the 3 °C reduction of maximum temperature.

Keywords: Finite Element Method, Heat Assessment, Laser Cooling, Ohmic Heating, Zeeman Slower.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

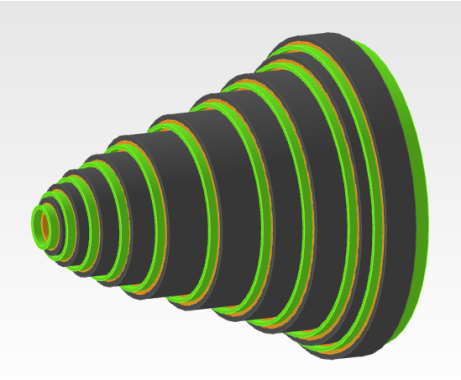
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

مقدمه

در سال‌های اخیر فناوری سردسازی اتم‌ها با استفاده از لیزر یکی از موضوعات مورد علاقه پژوهشگران فیزیک بنیادی و تجربی بوده است [۱]. چهارچوب نظری سردسازی لیزری به وسیله هانش[1] و شوالوف[2] در سال ۱۹۷۵ ارائه شد [۲] و اولین مشاهده تجربی آن در سال ۱۹۸۵ توسط چو[3] صورت گرفت [۳]. در فناوری سردسازی لیزری اتم‌ها پس از خروج از کوره تبخیر حدودا دارای دمای ۴۰۰ °C -۳۵۰ می‌باشند. سرعت معادل این اتم‌ها حدود ۴۳۰ m/s می‌شود. از طرفی اتم‌هایی با این سرعت در دام اپتومغناطیسی زیمان اسیر نمی‌گردند [۴]، لذا باید با قراردادن قطعه‌ای به نام کندکننده زیمان مابین کوره تبخیر و دام اپتومغناطیسی سرعت اتم‌های ورودی به دام را تا حدود ۵۰ m/s کاهش داد. در کندکننده زیمان میدان مغناطیسی توسط تعدادی سیم‌لوله که جریان بالایی (حدود ۱ A) از آنها می‌گذرد تولید می‌گردد. به دلیل جریان بالایی که از سیم‌های مسی داخل سیم‌لوله-های کندکننده زیمان عبور می‌کند، گرمایش اهمی قابل ملاحظه‌ای درون سیم‌لوله‌ها به وجود می‌آید که از گلوگاه-های اصلی فناوری کندکننده زمان می‌باشد، و برای حل این مشکل از خنک کننده‌های جانبی مانند ایجاد چرخه آب درون کندکننده زیمان استفاده می‌کنند [۵]. در پژوهش پیش‌رو یک کندکننده زیمان شامل ۱۰ سیم‌لوله چند لایه دارای طول‌های متفاوت طراحی شده است که جریان ثابت از تمام سیم‌لوله‌ها عبور می‌کند. با استفاده از روش المان محدود توزیع دما به صورت سه بعدی درون کندکننده زیمان محاسبه شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد برای کندکننده زیمان طراحی شده، افزایش جریان عبور از سیم‌های مسی درون سیم‌لوله‌ها تا ۱/۵ A سبب تولید دمای قابل تحملی برای پوشش پلی استر سیم‌ها می‌شود. اما با افزایش جریان عبوری از سیم‌های مسی تا ۲ A گرمایش اهمی موجب ایجاد دمای غیر قابل تحمل برای شارلاک سیم‌های مسی خواهد شد.

مدل سازی و روش حل

در این مقاله، کندکننده زیمان با استفاده از نرم افزار محاسباتی Lumerical شبیه‌سازی شده است. کندکننده زیمان در این شبیه‌سازی شامل ده دسته سیم‌لوله مسی حامل جریان است که به ترتیب در چهار سیم‌لوله درونی از چهار دور سیم استفاده شده و در شش سیم‌لوله انتهایی از شش دور سیم استفاده شده است. شعاع داخلی و بیرونی سیم‌لوله‌ها به ترتیب از داخلی‌ترین تا بیرونی‌ترین عبارتند از: ۹/۵-۱۳/۵، ۱۶/۵-۲۰/۵، ۲۳/۵-۲۷/۵، ۳۰/۵-۳۴/۵، ۳۷/۵ – ۴۳/۵، ۴۶/۵ -۵۲/۵، ۵۵/۵ -۶۱/۵، ۶۴/۵ -۷۰/۵، ۷۳/۵ – ۷۹/۵ و ۸۲/۵ -۸۸/۵ میلی‌متر و همچنین بین هر سیم‌لوله یک لایه عایق الکتریکی از جنس ... به ضخامت ۳ میلی‌متر قرار داده شده است. در شکل ۱، هندسه مربوط به کندکننده زیمان شبیه‌سازی شده، نشان داده شده است. دمای محیط ۳۰۰ کلوین درنظر گرفته شده است و تبادل حرارتی از طریق هوای پیرامون کندکننده زیمان صورت می‌گیرد. توزیع دمای کندکننده زیمان طراحی شده به استفاده از روش المان محدود محاسبه شده است.



شکل ۱: چیدمان کلی کندکننده زیمان

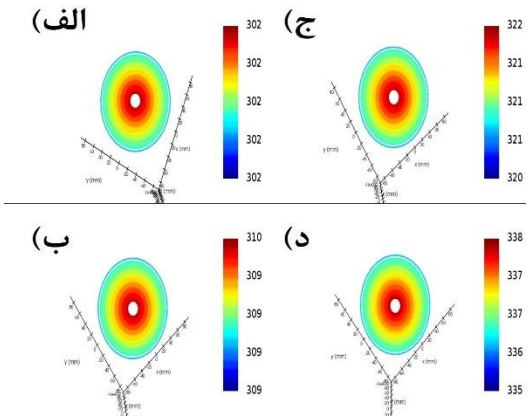
[1] Hansch
[2] Shawlow
[3] Chu

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

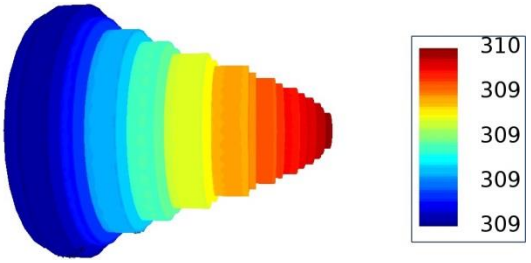
نتایج و بحث

همان‌طور که گفته شد، در اثر عبور جریان الکتریکی از سیم‌لوله، میدان مغناطیسی مورد نظر جهت سردسازی لیزری[۴] حاصل می‌شود؛ اما از سوی دیگر به‌دلیل عبور جریان از سیم فلزی، طبق قانون گرمایشی اهمی[۵]، بخشی از انرژی الکتریکی در اثر مقاومت سیم مسی به حرارت تبدیل می‌شود و این موضوع باعث افزایش دمای قسمت‌های مختلف کندکننده زیمان می‌شود. ابتدا تغییرات دمایی کندکننده زیمان به ازای جریان‌های عبوری به ترتیب ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ آمپر در زمان‌های مختلف تا رسیدن به حالت تعادل مورد بررسی قرار گرفت. ضریب انتقال حرارتی عایق مورد استفاده در این بخش ۱۴ W/m.K درنظر گرفته شد. در شکل ۲ الف) تا د) دمای مقطع عرضی کندکننده زیمان در زمانی که تبادل حرارتی مجموعه با محیط به تعادل رسیده است (۲۰۰۰۰ ثانیه) به ترتیب برای جریان‌ها ۰/۵ تا ۲ آمپر رسم شده است.



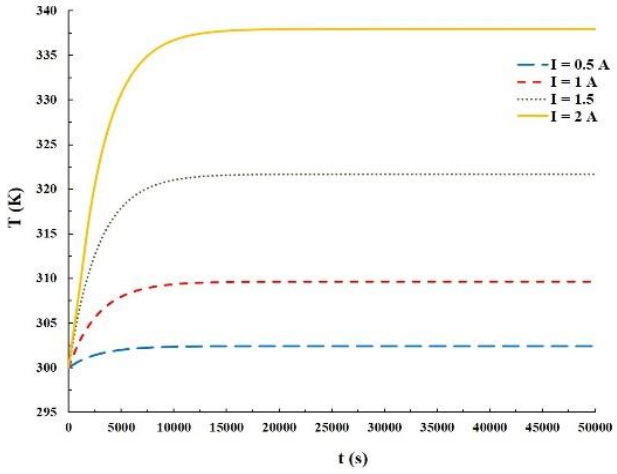
شکل ۲: دمای مقطع عرضی کندکننده زیمان در زمانی که تبادل حرارتی مجموعه با محیط به تعادل رسیده است به ترتیب برای جریان‌های الف) ۰/۵ ب) ۱ ج) ۱/۵ و د) ۲ آمپر

توزیع سه بعدی دما در طول کندکننده زیمان در شکل ۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۳: توزیع سه بعدی دمای در طول کندکننده زیمان

در نمودار شکل ۴ تغییرات دمای بیشینه کندکننده زیمان به ازای جریان‌های به ترتیب ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ آمپر در زمان‌های مختلف رسم شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش جریان، بیشینه دمای کندکننده نیز افزایش می‌یابد چنان‌که به ازای جریان ۱/۵ آمپر دمای مجموعه به ۳۲۰ کلوین می‌رسد که تا این دما کندکننده زیمان به لحاظ حرارتی از حاشیه امنیت خوبی برخوردار است. اما به ازای جریان ۲ آمپر دما به ۳۴۰ کلوین می‌رسد و در این دما به‌دلیل آسیب رسیدن به لایه‌های عایق و همچنین آسیب احتمالی به قطعات الکترونیکی موجود در سیستم سردسازی لیزری، نمی‌توان بدون یک سیستم آب-خنک از کندکننده زیمان استفاده نمود.



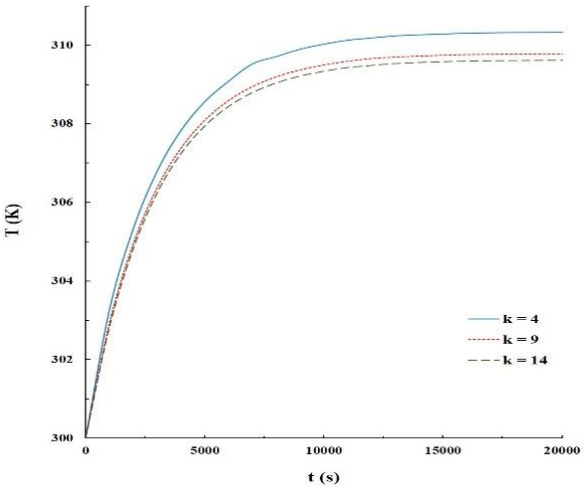
شکل ۴: تغییرات دمای بیشینه کندکننده زیمان به ترتیب برای جریان‌های ۰/۵ تا ۲ آمپر

[۴] Laser Cooling
[۵] Ohmic heating

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

در ادامه به منظور بررسی تأثیر رسانندگی حرارتی لایه عایق، مقادیر 4, 9 , 14 W/m.K به عنوان ضریب رسانندگی حرارتی در نظر گرفته شد. در شکل ۵ تغییرات دمای بیشینه کندکننده زیمان بر حسب زمان برای حالاتی که به ترتیب از عایق‌های با رسانندگی حرارتی‌های مذکور استفاده شده، رسم شده است.



شکل ۵: تغییرات دمای بیشینه کندکننده زیمان به ترتیب برای رسانندگی حرارتی 4, 9, 14 W/m.K

همان‌طور که از شکل ۵ می‌توان استنباط کرد، با افزایش ضریب رسانندگی حرارتی، دمای بیشینه مجموعه به دلیل تبادل حرارتی بهتر و انتقال حرارت مؤثرتر، کاهش می‌یابد. همچنین در صورت عدم استفاده از عایقی با ضریب رسانندگی مطلوب، دمای کندکننده زیمان افزایش می‌یابد توجهی داشته و از این‌رو برای ادامه فعالیت نیازمند یک سیستم آب-خنک می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از محاسبه توزیع دمای سه بعدی درون کندکننده زیمان نشان می‌دهد، برای جریان عبوری کمتر از ۱/۵ A می‌توان از این فناوری بدون استفاده از سامانه خنک کننده جانبی استفاده نمود. اما با افزایش جریان عبوری تا ۲ A دمای تولید شده در کندکننده زیمان به آستانه تحمل روکش پلی استر سیم های مسی به کار رفته نزدیک می‌شود. همچنین مشاهده شد که افزایش رسانندگی حرارتی عایق الکتریکی به کار رفته در سامانه کندکننده زیمان تاثیر قابل ملاحظه ای در توزیع دمای این فناوری ندارد.

سپاسگزاری

در این مقاله از شرکت تک-فن به ویژه خانم دکتر ساره شهیدانی به دلیل مشاوره‌ها و راهنمایی‌های ارزشمندشان کمال تقدیر و تشکر را داریم.

مرجع‌ها

[1] V. Schkolnik, O. Fartmann, and M. Krutzik, "An extended-cavity diode laser at 497 nm for laser cooling and trapping of neutral strontium," *Laser Physics*, vol. 29, p. 035802, 2019.

[2] T. W. Hänsch and A. L. Schawlow, "Cooling of gases by laser radiation," *Optics Communications*, vol. 13, pp. 68-69, 1975.

[3] S. Chu, "Nobel Lecture: The manipulation of neutral particles," *Reviews of Modern Physics*, vol. 70, p. 685, 1998.

[4] M. Schioppo, "Development of a transportable strontium optical clock," PhD thesis, Dipartimento di Fisica e Astronomia, Universitadi Firenze, 2010.

[5] Y. B. Ovchinnikov, "A permanent Zeeman slower for Sr atomic clock," *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 163, pp. 95-100, 2008.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]