

واکاوی کارایی سلاح‌های لیزری پرتوان علیه شناورهای تندرو

مهدی محمدبیگی^۱، ابوالحسن رضاپور کورنده^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد فیزیک لیزر، عضو هیئت‌علمی دانشگاه امام حسین (علیه‌السلام)، دانشگاه علوم دریایی امام خمینه‌ای (مدظله‌العالی)، دانشکده علوم پایه،

ایمانامه: mmb.1343@gmail.com

^۲ کارشناسی ارشد مخابرات، عضو هیئت‌علمی دانشگاه امام حسین (علیه‌السلام)، دانشگاه علوم دریایی امام خمینه‌ای (مدظله‌العالی)، دانشکده فناوری حضرت

جوادالائمه (علیه‌السلام)، ایمانامه: arezapourk@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۸/۱۴)

چکیده

از اواخر دهه ۱۹۹۰-۱۹۸۰ میلادی، لیزر به‌عنوان یک ابزار شناسایی در کنار رادار بکارگیری شد. در دهه‌ی ۲۰۰۰-۱۹۹۰ میلادی طراحی و تولید سلاح‌های انرژی هدایت‌شده‌ی الکترومغناطیسی پرتوان آغاز و به‌عنوان یک سلاح ضد موشک و کلاهک‌های اتمی جزو سلاح سازمانی ارتش قدرت‌های بزرگ قرار گرفت. اخیراً، ناوگان دریایی آمریکا در خلیج فارس از استقرار سامانه‌ی توپ لیزری بر روی تعدادی از شناورهای خود به‌منظور مقابله با شناورهای تندرو و پهپادهای نیروی دریایی سپاه خبر داده است. البته، علی‌رغم ادعای آنها، در توانایی حقیقی و کارآمدی این سلاح ابهام زیادی وجود دارد. در این مقاله، به‌طور مستدل و علمی و مبتنی بر قوانین ترمودینامیک، جزئیات فرایند برهم‌کنش لیزر با سطوح فلزی و غیرفلزی (فایبرگلاس) تجهیزات و بدنه‌ی شناورها بررسی می‌گردد. همچنین، تأثیر جنس بدنه و تحرک شناور (سرعت و زاویه‌ی حرکت) در عملکرد و کارایی سلاح لیزری مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج بررسی‌ها و نمودارهای ارائه‌شده نشان می‌دهد که توانمندی سلاح‌های لیزری در انهدام شناورهای تندرو و حتی پهپادها، با محدودیت‌های جدی بسیاری مواجه‌اند و عملاً هنوز این سلاح‌ها نمی‌توانند کاربرد عملیاتی چندان مؤثری داشته باشند.

واژه‌های کلیدی

سلاح‌های انرژی الکترومغناطیسی هدایت‌شونده پرتوان، لیزر، توپ لیزری پرتوان، پدافند لیزری، شناورهای تندرو.

Investigating the performance of high power Laser guns against high speed crafts

Mehdi Mohammad Beigi¹, Hassan Rezapour Kourandeh²

¹Imam Hussein University, Faculty of Science and Technology of Javadal-Aemeh as, Email: mm.b1343@gmail.com

²Imam Hussein University, Faculty of Science and Technology of Javadal-Aemeh as, Email: arezapourk@gmail.com

(Submitted: 2016/Aug/01; Accepted: 2016/Nov/04)

Abstract

Laser has been used from the late of 1980-1990 decade as an identifying weapon besides radar. In 1990-2000 decade the design and production of high power electromagnetic guided energy weapons was started and used as an anti-missile and nuclear weapons for world big power armies. Recently, US Navy force in Persian Gulf reported from a Laser gun system on their ships against Sepah's UAV and high speed crafts. Of course, its true capability and efficiency is unbelievable and has many problems. In this paper, based on thermodynamic laws, scientifically discuss the details of Laser interaction with metal and nonmetal (fiberglass) surfaces of ship's equipments and body. Also, the effect of ship's body material and mobility (speed and direction) on the performance of Laser gun is analyzed. Our analysis results and presented curves shows that the capability of Laser gun against UAV and high speed crafts seriously is limited and still they are not efficient tactically.

Keywords

High power directed electromagnetic weapons, Laser, High power Laser gun, Laser defence, High speed craft.

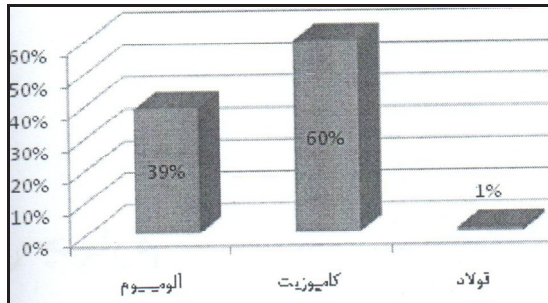
۱- مقدمه

پرتو لیزر، مهم‌ترین اختراع نیمه‌ی اول قرن بیستم با کاربردهای فراوان در مخابرات، صنعت و پزشکی است. این اختراع، از اواخر دهه‌ی ۱۹۹۰-۱۹۸۰ میلادی به‌عنوان یک سلاح شناسایی در کنار رادار به کار گرفته شد. در دهه‌ی ۲۰۰۰-۱۹۹۰ میلادی طراحی و تولید سلاح‌های انرژی هدایت‌شده‌ی الکترومغناطیسی پرتو لیزر آغاز گردید و به‌عنوان یک سلاح لیزری ضد موشک و کلاهک‌های اتمی جزو سلاح سازمانی ارتش قدرت‌های بزرگ قرار گرفت. در سال ۲۰۱۳ میلادی اولین توپ لیزری برای مقابله با شناورهای تندروی ایران روی کشتی جنگی «پونس»^۱ آمریکا نصب و به خلیج فارس گسیل گردید. این سامانه‌ی لیزری با هدف تخریب هواپیماهای بدون سرنشین و از کار انداختن قایق‌های کوچک و کور کردن حسگرهای فناوری برتر طراحی شده است [۱]. در [۲] به تفصیل تاریخچه‌ی سلاح‌های لیزری آورده شده است و نویسندگان آن با فرض توانمندی این سلاح‌ها در تخریب و انهدام شناورهای کوچک، راهکارهایی را برای مقابله با آنها ارائه داده‌اند.

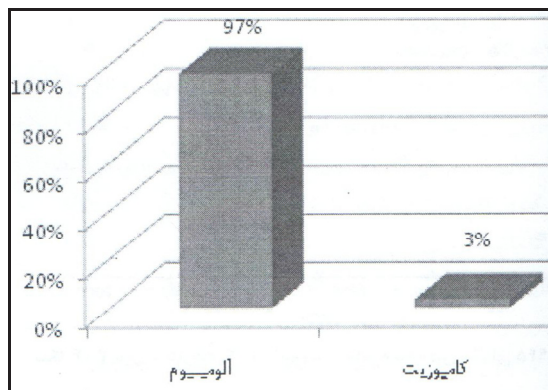
با توجه به پارامترهای ساخت شناورهای تندرو، لازم است بدنه‌ی آنها به ترتیب از جنس کامپوزیت (فایبرگلاس)، آلومینیم و به‌ندرت از فولاد باشد [۳]. مطالعات آماری انجام‌شده در خصوص مواد مورد به کار گرفته شده برای بدنه‌ی انواع شناورها (از کلاس‌های مختلف و کاربردهای متفاوت)، نشان می‌دهد که جنس بدنه‌ی غالب شناورهای تندرو در دنیا، به ترتیب از کامپوزیت (فایبرگلاس)، آلومینیم و فولاد می‌باشد (شکل (۱))؛ اما به دلیل عدم وجود فناوری بالای موردنیاز در ساخت و شکل‌دهی بدنه‌ی شناورهای تندرو از مواد کامپوزیتی، در کشورهای حاشیه‌ی خلیج‌فارس و دریای عمان، غالباً شناورها آلومینیمی می‌باشند (شکل (۲)) [۳]. بر این اساس، در متن مقاله، بیشتر به تأثیر لیزر بر سطوح فلزی (آلومینیم، فولاد و حتی مس) توجه شده است.

آلومینیم همانند اکثر فلزات بیشتر به‌صورت آلیاژ در صنعت مصرف و استفاده می‌شود و به سهولت با بسیاری از عناصر و فلزات دیگر نظیر سیلیسیم، مس، منیزیم، روی و نیکل آلیاژهای دوگانه و چندگانه تشکیل می‌دهد.

آلومینیم خالص در حرارت ۶۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و آلیاژهای آن در بازه‌ی ۴۸۰ تا ۶۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد ذوب می‌شوند و تغییر رنگی در دامنه‌ی گرم و ذوب شدن آن دیده نمی‌شود.



شکل (۱): پراکندگی جنس بدنه‌ی شناورهای تندروی مدرن موجود در دنیا [۳].



شکل (۲): جنس بدنه‌ی شناورهای موجود در خلیج‌فارس و دریای عمان [۳].

در این مقاله، مبتنی بر استدلال‌های علمی و قوانین ترمودینامیکی، به واکاوی پارامترهای برهم‌کنش پرتو لیزر با سطح فلز و غیرفلزی می‌پردازیم و کارایی عملکردی سلاح‌های لیزری علیه شناورهای تندرو را موردبررسی قرار می‌دهیم.

۲- واکاوی پارامترهای برهم‌کنش پرتو لیزر با سطح فلز

در فرایند برهم‌کنش لیزر با یک سطح فلزی قبل از دمای ذوب فلز، به علت ضریب بازتاب بالا جزء کوچکی از انرژی لیزر تابشی جذب می‌شود. بخشی از انرژی جذب‌شده در اثر انتشار حرارت از سطح به لایه‌های درونی‌تر فلز انتقال می‌یابد و به همین دلیل، دمای آن به

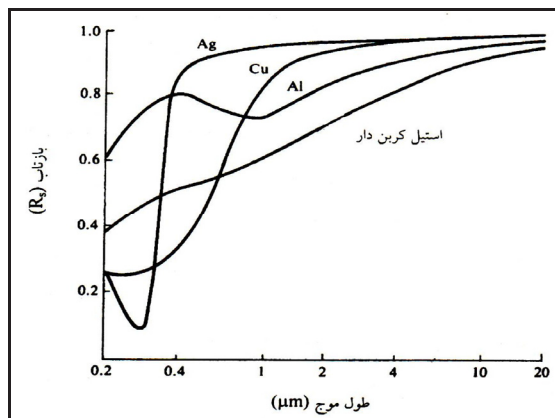
¹ USS Ponce

کندی بالا می‌رود [۴]؛ اما وقتی دمای سطح به نقطه‌ی ذوب می‌رسد، ضریب جذب لیزر به صورت جهشی بسیار زیاد می‌شود، به گونه‌ای که انرژی کافی برای تبخیر لایه‌ی سطحی فلز فراهم می‌گردد. در اثر پدیده‌ی تبخیر، به علت وجود گرادیان دمای زیاد در مرز ناحیه‌ی تبخیر با لایه‌ی درونی فلز، یک پالس حرارتی بزرگ به درون فلز انتشار می‌یابد. از این لحظه به بعد، فرایند برهم‌کنش پرتو لیزر با فلز وارد مرحله‌ی متفاوتی (فاز دوم) می‌شود که در آن پرتو لیزری فقط به لایه‌ی بخار فلز انرژی می‌دهد و به واسطه‌ی این لایه، انرژی حرارتی به لایه‌های بعدی منتقل می‌شود. اگر در این مرحله، سرعت انتقال انرژی بیشتر از سرعت جذب آن باشد، دمای درونی فلز نمی‌تواند به دمای ذوب برسد و لذا فرایند فقط به شکل تبخیر سطحی به پیش می‌رود. در غیر این صورت، فلز می‌تواند به نقطه ذوب برسد و فرایند به صورت ذوب و تبخیر توأمان مدل‌سازی گردد. بر این اساس، در ادامه‌ی این مقاله، برهم‌کنش لیزر با سطح ماده (فلز یا هدف) در دو فاز (حالت) به طور کامل بررسی می‌گردد. ابتدا در فاز اولیه (تحت عنوان فاز گذرا)، با فرض ابعاد نامحدود برای صفحه‌ی سخت و پرتو لیزر، برهم‌کنش را تا مرحله‌ی رسیدن به دمای ذوب، به کمک معادلات انتقال حرارت مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهیم. در مرحله‌ی دوم (تحت عنوان فاز ماندگار)، معادلات برهم‌کنش پرتو لیزری محدود با سطح فلز به صورت ذوب و تبخیر (توآمان)، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲-۱- فاز ۱ (فاز گذرا)

ابتدا فرض می‌کنیم که یک پرتو لیزری به ابعاد نامحدود و با تابندگی^۱ ثابت، به طور عمودی به سطح صاف نامحدود ماده‌ای (با عمق محدود) برخورد کند. با توجه به توضیحات داده شده در قسمت قبل، با فرض ضریب بازتاب R_S برای سطح فلز، آهنگ جذب انرژی توسط فلز از پرتو لیزری با شدت $I \text{ J/m}^2\text{s}$ برابر $(1 - R_S)I$ (ژول بر واحد سطح در واحد زمان) می‌شود. نمودار ضریب بازتاب R_S برای چهار ماده‌ی مختلف برحسب طول موج لیزر در شکل (۳) آورده شده است. توجه شود که فلزاتی مانند نقره که به رنگ سفید هستند، بازتابنده‌ی خوبی برای لیزر

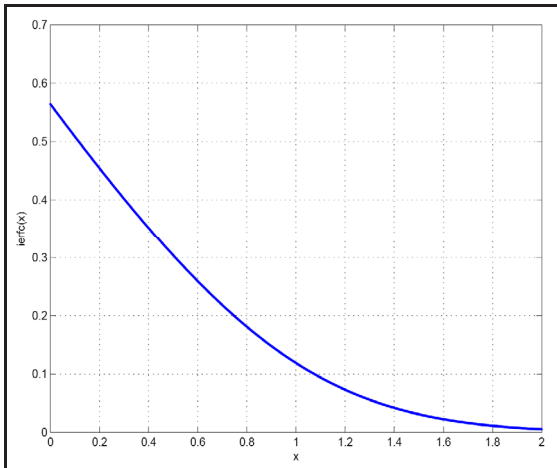
YAG هستند؛ و فلزات خاکستری‌رنگ مانند فولاد، جذب‌های خوبی برای نور لیزری در دمای اتاق هستند. همچنین، از این نمودار مشاهده می‌گردد که در طول موج‌های بزرگ و یا در ناحیه لیزر ND:YAG و بالاتر، اندازه‌ی ضریب بازتاب بزرگ است.



شکل (۳): ضریب بازتاب برحسب طول موج برای سطوح فلزی صیقلی در دمای معمولی اتاق [۵].

شکل (۴) نمودار تغییرات درصد جذب لیزر برحسب دما برای یک سطح فلزی نوعی، به ازای لیزرهای ND:YAG (با طول موج $1.06 \mu\text{m}$) و CO_2 (با طول موج $10.6 \mu\text{m}$) را نشان می‌دهد [۵]. مشاهده می‌گردد تا قبل از نقطه‌ی ذوب، جذب به کندی افزایش می‌یابد ولی پس از ذوب لایه‌ی سطحی فلز، مستقل از طول موج، با افزایش جهشی درصد جذب بیش از ۸۰ درصد می‌شود که انرژی لازم برای تبخیر سطحی را می‌تواند فراهم کند. شکل منحنی جذب برای فلزات گوناگون تفاوت دارد ولی شکل کلی برای همه مشابه است. عمق جذب نوری هم تابع طول موج لیزر است (منظور از عمق جذب نوری اندازه‌ی عمقی است که در آن انرژی لیزر تابشی به سطح به میزان حدود ۳۶ درصد مقدار اولیه خود در سطح کاهش یافته است). همچنین، ضریب جذب از ۳۵ درصد تا ۵۰ درصد برای دمای معمولی اتاق تا قبل از نقطه ذوب تغییر می‌کند. بر این اساس، فرض قابل قبول این است که جذب تابش لیزر خیلی نزدیک به سطح فلز (تا عمق نفوذ میدان الکتریکی) صورت می‌پذیرد.

^۱ انرژی در واحد زمان بر واحد سطح



شکل (۶): نمودار $ierfc(x)$

در حالت خاص، برای سطح فلز ($z = 0$) رابطه‌ی (۱)

به صورت ساده‌تر زیر در می‌آید:

$$\Delta T(0,t) \cong \frac{2H}{k\sqrt{\pi}} \sqrt{\chi t} \quad (2)$$

از رابطه‌ی فوق ملاحظه می‌کنیم که اگر آهنگ انرژی گرمایی به‌طور پیوسته برقرار باشد، دما تا مقدار نامحدودی بالا می‌رود؛ اما در واقعیت، عملاً این انرژی گرمایی (H) برای زمان محدودی تأمین می‌شود و بعد از آن قطع می‌گردد (عرض پالس لیزری محدود است). اگر اندازه‌ی H برای آنکه سطح به دمای تبخیر برسد کافی باشد، پدیده‌ی ذوب سطحی و سپس تبخیر اتفاق می‌افتد که موجب بالا رفتن ضریب جذب انرژی لیزر می‌شود (R_S کم می‌شود). در نتیجه، اندازه‌ی H هم به صورت جهشی زیادتر می‌گردد. بعد از این اتفاق، ادامه‌ی انتقال حرارت از لیزر به فلز به صورت همرفت سیال طبیعی از طریق بخار فلز انجام می‌شود.

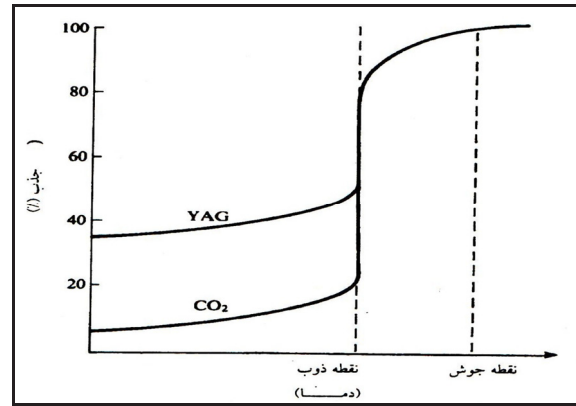
۲-۲-۲ فاز ۲ (فاز ماندگار)

با توجه به نمودار $ierfc(x)$ در شکل (۶)، اگر $x = [z / (2\sqrt{\chi t})] > 1$ اندازه‌ی $ierfc(x)$ حدوداً از مقدار ۰/۱ کمتر می‌شود.

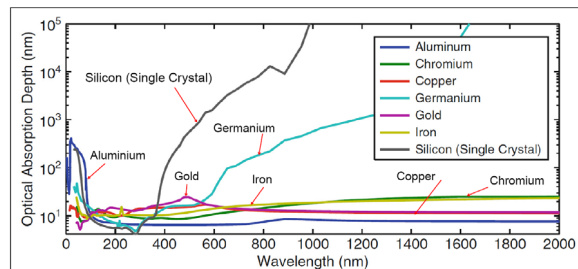
پس برای عمق $z \neq 0$ و زمان‌های $t \leq t_p$ داریم:

$$\Delta T(z,t)_{\max} < \frac{0.2H}{k} \sqrt{\chi t_p}$$

مثلاً، برای آهن با ($k = 82$, $\chi = 23.2 \times 10^{-6}$) از $H = 10 \text{ MW/m}^2$ در عمق $z = 1 \text{ mm}$ داریم:



شکل (۴): نمودار تغییرات درصد جذب لیزر بر حسب دما برای یک سطح فلزی نوعی، به ازای لیزرهای Nd-YAG (با طول موج $1.6 \mu\text{m}$) و CO_2 (با طول موج $10.6 \mu\text{m}$) [۵].



شکل (۵): عمق جذب نوری برای چند ماده بر حسب طول موج [۶].

اگر $H = (1 - R_S)I$ آهنگ انتقال انرژی گرمایی در واحد سطح به داخل فلز باشد، افزایش دما در عمق z از زیر سطح در زمان t ثانیه بعد از شروع جریان گرمایی، با رابطه‌ی زیر داده می‌شود [۷]:

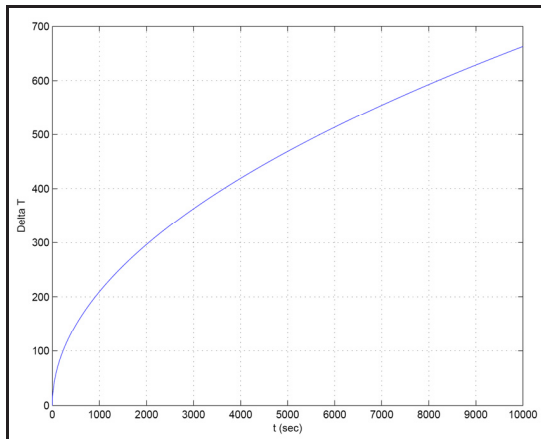
$$\Delta T(z,t) = \frac{2H}{k} \sqrt{\chi t} \cdot ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\chi t}}\right)$$

$$ierfc(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left\{ \exp(-x^2) - x[1 - \text{erf}(x)] \right\}$$

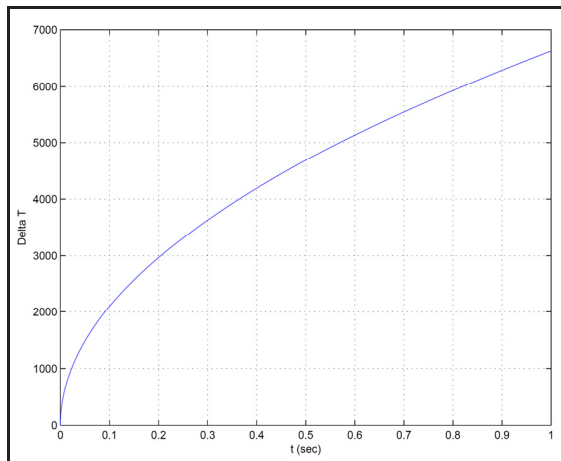
$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$$

(۱)

در این رابطه، k ضریب هدایت گرمایی (فرضاً مستقل از دما) و χ ضریب نفوذپذیری گرمایی (با رابطه‌ی $\chi = k / \rho C$ ، چگالی ماده و C ظرفیت گرمایی ویژه) است.



شکل (۷): نمودار $\Delta T(0,t)$ طبق رابطه‌ی (۲) برای فلز آهن با $\chi = 23.2 \times 10^{-6}$ ، $k = 82$ و با فرض $H = 100 \text{ KW/m}^2$



شکل (۸): نمودار $\Delta T(0,t)$ طبق رابطه‌ی (۲) برای فلز آهن با $\chi = 23.2 \times 10^{-6}$ ، $k = 82$ و با فرض $H = 100 \text{ MW/m}^2$

۳- حالت لیزر زمان نامحدود با شعاع پرتو محدود و

توزیع مکانی یکنواخت

اصلاحات بسیار زیادی می‌توان برای مدل ساده‌شده‌ی فوق انجام داد تا نتایج واقعی‌تری به دست آید. مثلاً، برای کاهش اثر باریکه‌ی لیزر متمرکز شده با دقت بیشتر لازم است توزیع غیریکنواخت انرژی گرمایی را بر روی سطح ماده در نظر گرفت. با یک تقریب مرتبه‌ی اول، فرض می‌کنیم انرژی گرمایی به‌طور یکنواخت در یک مساحت دایره‌ای شکل به شعاع a متر توزیع شده باشد. برای مقدار یکسان انرژی گرمایی برخوردارکننده در واحد سطح افزایش دمای کمتری را در مقایسه با مدل گرم کردن

که $\Delta T(1 \text{ mm}, t_p) = 12.32^\circ\text{C}$ و $t_p = 0.011 \text{ s}$ تغییر دمای کمی است. برای $t \rightarrow \infty$ بیشینه اندازه‌ی $ierfc(x)$ تقریباً برابر 0.56 است و

$$\Delta T(z, t \rightarrow \infty)_{\max} \cong \frac{1.12H}{k} \sqrt{\chi t}$$

در همان مثال، اگر بخواهیم تغییر دما 1810 درجه

شود، از رابطه‌ی $t \cong \frac{k^2 \Delta T^2(z, t)_{\max}}{1.2544 H^2 \chi}$ باید $7/57$ ثانیه

بگذرد ($x \cong 0.04$)؛ و با فرض $H = 100 \text{ MW/m}^2$ در این حالت، زمان $t \cong 0.0757 \text{ s}$ به دست می‌آید. $x \cong 0.4$ و $ierfc(0.4) \cong 0.35$ می‌شود.

لذا، $\Delta T(z, t \rightarrow \infty)_{\max}$ کمتر یا مساوی

$$\frac{0.7H}{k} \sqrt{\chi t} \text{ خواهد شد؛ یعنی:}$$

$$\Delta T(z, t \rightarrow \infty)_{\max} \leq \frac{0.7H}{k} \sqrt{\chi t}$$

در این حالت، زمان بیشتری نیاز است تا به 1810

درجه تغییر دما برسد.

در حالت کلی، برای فلز آهن با $\chi = 23.2 \times 10^{-6}$ ،

$k = 82$ و با فرض $H = 100 \text{ KW/m}^2$ نمودار $\Delta T(0,t)$ طبق رابطه‌ی (۲) در شکل (۷) آورده شده

است. دیده می‌شود که افزایش دمای سطح بسیار کند است؛ اما اگر $H = 100 \text{ MW/m}^2$ گردد، نمودار شکل (۸) به دست می‌آید که بسیار تندتر دما بالا می‌رود.

در عمل، به علت محدود بودن باریکه‌ی پرتو لیزری

(مثلاً به قطر 0.1 متر)، اگر سطح هدف واقعی با سرعت

مناسبی (حدوداً بیش از $4/8273$ کیلومتر بر ساعت) در

مدت کمتر از 0.1 ثانیه از زیر پرتو لیزر خارج شود، دمای

سطح به نقطه‌ی ذوب نمی‌رسد؛ به عبارت دیگر، برای آنکه

لیزر مؤثر عمل کند باید هدف ثابت باشد یا اینکه ردگیری

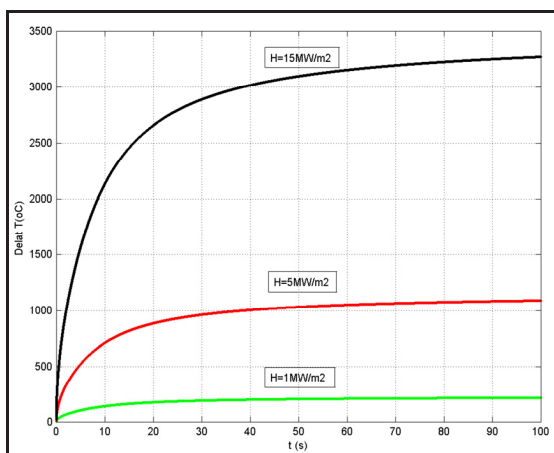
گردد و پرتو لیزری به مدت زیادی روی آن قفل شود.

فایبرگلاس) دارد، دارای $\chi = 0.11 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ است. با فرض همان $a = 10 \text{ cm}$ به دست می‌آید:

$$t \cong 2272 \text{ s} = 38 \text{ min}$$

یعنی، عملاً برای این ماده‌ی خاص جمله‌ی انتشار حرارت وجود ندارد و اتلاف حرارت را نداریم. در نتیجه کل انرژی صرف ذوب ماده می‌گردد. با توجه به اینکه، دمای ذوب پرس پکس در مقایسه با فلزات (آلومینیم، مس و آهن) خیلی کمتر است (۳۵۰ درجه سانتی‌گراد) و همچنین اشتعال‌زا می‌باشد، بدنه‌ی کامپوزیتی شناورها در برابر تهدید سلاح لیزری آسیب‌پذیرتر است.

مثال: برای آلومینیم با $\chi = 97.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^{-1}$ و $k = 238 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ و $a = 10 \text{ cm}$ نمودار تغییرات دمای سطح برحسب t به ازای سه مقدار $H = 1 \text{ MW}/\text{m}^2$ ، $H = 5 \text{ MW}/\text{m}^2$ و $H = 15 \text{ MW}/\text{m}^2$ در شکل (۹) نشان داده شده است. با توجه به اینکه دمای ذوب آلومینیم ۹۳۲ درجه کلونین (۶۵۹ درجه سانتی‌گراد) است، مشاهده می‌شود که نیاز است H حدوداً از $5 \text{ MW}/\text{m}^2$ بیشتر باشد تا آلومینیم به صورت سطحی ذوب شود. همچنین، چون دمای تبخیر آلومینیم ۲۷۲۰ درجه کلونین است، گزینه‌ی $H = 15 \text{ MW}/\text{m}^2$ مناسب است.



شکل (۹): نمودار تغییرات دمای سطح برحسب H برای فلز آلومینیم.

مطلب دیگر در این رابطه، حرکت سطح ماده در مدت‌زمان تابش لیزر است. توضیح بیشتر اینکه، در حرکت سریع، جریان هوای مجاور سطح باعث می‌گردد

سطح نامحدود قبلی انتظار داریم؛ زیرا در این مدل جدید، علاوه بر عمق ماده، انرژی به اطراف سطح تابشی هم انتشار می‌یابد. افزایش دما در عمق z زیر ناحیه‌ی تابش پس از گذشت t ثانیه از شروع تابش لیزر با رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$\Delta T(z,t) = \frac{2H}{k} \sqrt{\chi t} \left[\text{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\chi t}}\right) - \text{ierfc}\left(\frac{\sqrt{z^2 + a^2}}{2\sqrt{\chi t}}\right) \right] \quad (3)$$

توضیح آنکه جمله‌ی دوم داخل کروشه، به گرمای نفوذیافته به عمق ماده مرتبط است. در حالت خاص، دمای مرکز سطح تابشی به ازای $z = 0$ از رابطه‌ی فوق به صورت زیر است:

$$\Delta T(0,t) = \frac{2H}{k} \sqrt{\chi t} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc}\left(\frac{a}{2\sqrt{\chi t}}\right) \right] \quad (4)$$

قسمت اول این عبارت کاملاً برابر رابطه‌ی (۲) شده است. در صورت برقراری شرط زیر، جمله‌ی دوم رابطه‌ی (۴) قابل صرف‌نظر است و می‌توان فرض نمود که کل انرژی گرمایی لیزر صرف بالا رفتن دمای سطح می‌شود.

$$\text{ierfc}\left(\frac{a}{2\sqrt{\chi t}}\right) \ll 1, \text{ for } t \ll \frac{a^2}{4\chi} \quad (5)$$

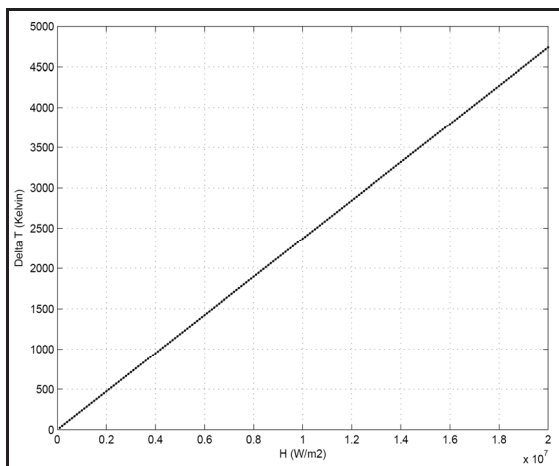
به عبارت دقیق‌تر، عبارت $t \cong a^2/(40\chi)$ مدت‌زمان تقریبی تأخیر تا لحظه‌ی شروع انتشار مؤثر شعاعی انرژی گرمایی را نشان می‌دهد.

به‌عنوان یک مثال، برای فلز مس (با $\chi = 116.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) به ازای $a = 10 \text{ cm}$ این تأخیر برابر ۲/۱۴۹۶ ثانیه می‌شود؛ یعنی تا ۲/۱۴۹۶ ثانیه عمده‌ی انرژی گرمایی باریکه‌ی لیزر، صرف بالا رفتن دمای سطح فلز می‌گردد و پس از گذشت این زمان، انتشار قابل‌ملاحظه‌ی انرژی حرارتی به اطراف و عمق ناحیه‌ی تابش لیزر را داریم. پس برای $t \leq 2.2 \text{ s}$ داریم: $\Delta T(0,t) \cong \frac{2H}{k\sqrt{\pi}} \sqrt{\chi t}$ مثلاً با فرض

$H = 10 \text{ MW}/\text{m}^2$ به دست می‌آید: $\Delta T \cong 481^\circ\text{C}$. در این مثال، با محاسبه‌ی ساده‌ای مشاهده می‌کنیم که باید $H > 25 \text{ MW}/\text{m}^2$ باشد تا دمای ذوب مس به دست آید (یعنی $\Delta T > 1356^\circ\text{C}$).

تأثیر χ در زمان تأخیر قابل‌توجه است. مثلاً ماده پرس‌پکس که خواص مشابهی با مواد کامپوزیتی (مانند

مثال: برای آلومینیم با $\chi = 97.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و $k = 238 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ و لیزری با شعاع پرتو $a = 10 \text{ cm}$ ، نمودار تغییرات دمای سطح برحسب H با رابطه‌ی $\Delta T(0, \infty) = \frac{Ha}{k\sqrt{\pi}}$ در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): نمودار تغییرات دمای سطح برحسب H برای فلز آلومینیم در زمان بسیار طولانی بزرگ‌تر از 10 ثانیه.

از روی نمودار شکل (۱۰) مشاهده می‌کنیم که برای رسیدن دمای سطح به حداقل 932 درجه (نقطه ذوب) باید $H \cong 4 \text{ MW/m}^2$ باشد. با استفاده از نمودارهای شکل (۳) و شکل (۴)، برای فلز آلومینیم و لیزرهای CO_2 و ND-YAG به ترتیب داریم: $R_s \cong 0.9$ و $R_s \cong 0.8$ ؛ بنابراین، با توجه به رابطه‌های $I = H/(1-R_s) \text{ W/m}^2$ (شدت لیزر تابشی) و $P = \pi a^2 H/(1-R_s) \text{ W}$ (توان لیزر تابشی) باید توان لیزر تابشی به ترتیب 1256 کیلووات و 628 کیلووات باشد. دیده می‌شود که این میزان توان در مقایسه با بیشینه توان سلاح‌های لیزری موجود (100 کیلووات) خیلی بالاتر است.

در عمل روی سطح فلز دارای پوشش رنگ است و ضریب انعکاس متفاوتی با حالت صیقلی دارد (کمتر می‌شود). همچنین، شعاع پرتو لیزر می‌تواند کمتر از 10 سانتی‌متر باشد. در این صورت، میزان توان موردنیاز لیزر تابشی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

که بخار به وجود آمده در اثر تبخیر سطحی ماده با سرعت خیلی بیشتری به اطراف پراکنده شود و مانع جدی برای رسیدن پرتو لیزر به سطح ماده نباشد. لذا، پدیده ذوب و تبخیر ادامه می‌یابد؛ اما در غیر این صورت، محیط سیال به وجود آمده از گاز، دارای ضریب جذب بالایی بوده و با جذب انرژی لیزر هم مانع رسیدن آن به سطح ماده می‌شود و هم با بالا رفتن دمای سیال گاز فشار آن بالا می‌رود و به‌صورت انفجاری انرژی گرمایی را به اطراف می‌پراکند؛ یعنی، تأخیر بیشتری در ذوب پیوسته‌ی ماده به وجود می‌آید.

بر اساس مطالب گفته‌شده، عملاً فقط می‌توان با کنترل پارامتر H فرایند ذوب ماده را کنترل کرد. اگر I (و به تبع آن H) خیلی پایین باشد، اصلاً به دمای ذوب نمی‌رسیم و انرژی فقط به‌صورت انتشار حرارت صرف بالا رفتن دمای عمق ماده می‌گردد.

در ادامه برای توضیح بیشتر، با فرض اینکه در مدت $t \cong \frac{a^2}{40\chi}$ به دمای ذوب نرسیده باشیم، حالت $t \rightarrow \infty$ را در نظر می‌گیریم. در این حال، معادله‌ی (۴) به‌صورت زیر در می‌آید (اثبات در پیوست آورده شده است):

$$\Delta T(z, \infty) = \frac{H}{k\sqrt{\pi}} [\sqrt{z^2 + a^2} - z] \quad (6)$$

بنابراین، برای سطح ماده رابطه‌ی حدی $\Delta T(0, \infty) = \frac{Ha}{k\sqrt{\pi}}$ را خواهیم داشت؛ یعنی، برای مقادیر $H < \frac{k\sqrt{\pi}\Delta T(\text{melting})}{a}$ هرگز به دمای ذوب نمی‌رسیم.

از سوی دیگر، اگر اندازه‌ی I (و به تبع آن H) خیلی بالا باشد، لایه‌ی ذوب‌شده‌ی اولیه تبخیر می‌شود و بعد از آن انرژی لیزر صرف بالا رفتن دمای سیال گاز ماده شده و انرژی حرارتی آن به‌صورت انفجاری به اطراف پراکنده می‌شود. در نتیجه، در این حالت سرعت ادامه‌ی ذوب سطح ماده بسیار کاهش می‌یابد. با تقریب قابل‌قبول

$$H = \frac{k\sqrt{\pi}\Delta T(\text{Vapouring})}{a} \quad \text{مقدار}$$

و $I = H/(1-R_s)$ را می‌توان به‌عنوان یک کران پایین برای تبخیر ماده در نظر گرفت. در اینجا مقدار R_s بعد از دمای ذوب را به کار می‌بریم.

بر این اساس، به منظور تحقق ذوب کامل ماده و پیشگیری از بروز حالت دوم در بالا، می‌توان مبتنی بر اطلاعات پارامترهای ترمودینامیکی ماده‌ی خاص، اندازه (I) و نرخ تکرار پالس لیزر پالسی تابشی را به نحو مناسب و مؤثر انتخاب نمود. مثلاً در بحث سلاح لیزری، بسته به جنس بدنه و سرعت حرکت هدف، می‌توان سناریوهای مختلفی برای شلیک لیزر طراحی و مورداستفاده قرار داد که به بحث این مقاله ارتباط ندارد. مسئله‌ی دیگر که در عمل از معایب سلاح لیزری محسوب می‌گردد، توزیع مکانی گوسی لیزر زمان محدود با شعاع پرتو محدود است؛ یعنی، توزیع دما در مقطع دایره‌ای پرتو لیزری غیریکنواخت بوده و عمده‌ی انرژی در مرکز پرتو متمرکز می‌باشد. در نتیجه، توزیع حرارت روی سطح ناحیه‌ی مورد اصابت لیزر هم غیریکنواخت می‌شود و عمدتاً بخش مرکزی با فشار زیاد تبخیر شده و دمای گاز تبخیر را بالا می‌برد. در واقع، این پدیده موجب اتلاف انرژی لیزر و کاهش میزان ذوب عمقی سطح هدف می‌گردد؛ به عبارت دیگر، کارایی یک سلاح لیزری با توزیع مکانی غیریکنواخت گوسی از کارایی حالت توزیع یکنواخت هم کمتر می‌باشد.

در عمل، تحقق یک پرتو لیزری با توزیع یکنواخت از توزیع گوسی مشکل‌تر است. از این رو، ابتدائاً پرتو لیزر دارای توزیع گوسی می‌باشد که علاوه بر محدودیت مذکور در قبل، به دلیل اینکه در مسیر حرکت خود در هوا واگرایی بیشتری پیدا می‌کند، بُرد مؤثر آن هم کمتر از حالت توزیع یکنواخت (با جبهه‌ی موج تخت) خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به ابداع سلاح‌های لیزری، توسعه و تکامل آنها در آینده و بکارگیری علیه شناورهای تندرو و پهپادها در نبردهای آینده، در این مقاله بر آن شدیم تا اساساً قابلیت و کارایی این سلاح‌ها را به‌عنوان یک تهدید جدی موردبررسی دقیق و علمی قرار بدهیم. در متن مقاله، به تفصیل فرایند برهم‌کنش پرتو لیزر با سطح هدف را بر اساس پارامترهای مختلف (جنس بدنه، مدت‌زمان تابش لیزر، توزیع مکانی پرتو و قطر آن، سرعت و جهت حرکت هدف، ...) دقیقاً موردبررسی و تجزیه و تحلیل قرار دادیم. طبق نمودارهای شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از آن، نشان دادیم که:

۱. به علت توان محدود لیزر و واگرایی پرتو طی مسیر تا هدف، یک سلاح لیزری در بُرد و انهدام مؤثر هدف با محدودیت جدی مواجه است؛ یعنی، آنچه درباره‌ی قابلیت بالای این سلاح‌ها علیه شناورهای تندرو ادعا گردیده، دور از واقعیت به نظر می‌رسد.

۲. برای آنکه عملاً پرتو لیزر بتواند به‌طورجدی به هدف آسیب برساند، لازم است که تابش لیزر در مدت‌زمان قابل‌ملاحظه‌ای (نسبتاً طولانی) روی بدنه‌ی هدف متمرکز بماند. با توجه به قدرت مانور شناورهای تندرو و نوسانات شدید بدنه در حین حرکت (به علت دینامیک حرکت و امواج دریا) به نظر می‌رسد با هوشمندی ناوبر و تنظیم زاویه‌ی حرکت به‌راحتی می‌توان تهدید لیزر را خنثی نمود یا به حداقل ممکن رساند.

۳. از آنجایی که سلاح لیزری باید در حین شلیک روی یک هدف خاص و به مدت کافی با دقت زیادی متمرکز بماند، در یک تهاجم گروهی با تعداد زیادی شناور که هر یک مستقلاً با مسیرهای مختلف حمله‌ور می‌شوند، از کارایی آن به‌شدت کاسته شده و نمی‌تواند نقش مؤثری داشته باشد.

۴. با توجه به اینکه جنس و ضخامت بدنه‌ی شناورها مختلف است، برای آنکه پرتو لیزر روی هر شناوری مؤثر عمل کند، باید توان متوسط، نرخ پالس لیزر، قطر پرتو و توزیع مکانی انرژی و طول موج لیزر بسته به شناور خاص قابل تنظیم باشد. سختی ساخت و تحقق این الزامات در یک سلاح لیزری، در حال حاضر قابلیت عملیاتی سلاح‌های لیزری را محدود ساخته است.

بر اساس بررسی‌های متن، توصیه می‌گردد:

۱. در ساخت بدنه‌ی شناورهای تهاجمی از آلیاژهای آلومینیم به‌جای مواد کامپوزیتی استفاده شود؛ زیرا برای آسیب رساندن به آن نیاز به لیزر پُر قدرت‌تری است.

۲. برای کاهش آسیب‌پذیری شناورهای خودی در برابر تهدید سلاح لیزری، لازم است در پوشش رنگ آنها از لحاظ نوع و ضخامت، علاوه بر ویژگی ضد خوردگی، ویژگی جذب و انعکاس آن در طول موج لیزرهای CO₂ و ND-YAG هم حتماً مدنظر قرار بگیرد تا عملاً از انعکاس بیشتر و جذب کمتری برخوردار باشد.

۳. همچنین، برای آنکه ضریب انعکاس پرتو لیزر بیشتر افزایش یابد، می‌توان سطوح بدنه و تجهیزات روی شناورها را زاویه‌دار طراحی نمود. این کار ضریب حفاظت

شناورها را در هر زاویه دیدی نسبت به پرتو لیزر افزایش می‌دهد.

بر اساس نتایج این پژوهش که در این مقاله و مقاله مرجع [۲] ارائه شده است، لازم به نظر می‌رسد که مراکز تحقیقاتی دفاعی کشور به‌طور جد و همه‌جانبه برای پیاده‌سازی راهکارهای پیشنهاد شده و تست میدانی آنها اقدامی جهادی و عملی نمایند. بدیهی است که ظرفیت علمی و فنی موردنیاز آن در داخل کشور بین مراکز پژوهشی و دانشگاهی وجود دارد.

مرجع:

[1] Martinez, L., "Navy's new laser weapon blasts bad guys from air, sea," ABC, April 2013.

[۲] رضایور کورنده، ابوالحسن، محمدبیگی، مهدی، بحرینی، مجتبی، راهکارهای مقابله با سلاح‌های انرژی هدایت‌شونده لیزری علیه شناورهای تندرو، فصلنامه مهندسی شناورهای تندرو، دانشکده حضرت جوادالائمه (ع) ندسا، شماره ۴۶، سال ۱۳۹۴.

[۳] سیف، محمدسعید، توکلی دخرآبادی، محمد، اصول طراحی شناورهای مدرن، مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه شریف، ۱۳۹۲.

[۴] بهجت، عباس، لیزر «اصول و کاربردها»، ترجمه، دانشگاه یزد، ۱۳۸۵ (Laser Principles and Applications, Jhon Wilsona

[5] Kelkar, G., "Pulsed Laser welding," WJM Technologies, Cerritos, CA 90703, USA, girish@welding-consultant.com

[6] Lide, D. R., *CRC Handbook of chemistry and physics*, 82nd edn., RC, Boca Raton, 2001.

[7] Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C., *Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press, 2nd Ed., 1959.

پیوست: اثبات رابطه‌ی (۶)

$$\Delta T(z,t) = \frac{2H}{k} \sqrt{\chi t} \left[\operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\chi t}}\right) - \operatorname{ierfc}\left(\frac{\sqrt{z^2 + a^2}}{2\sqrt{\chi t}}\right) \right]$$

$$\operatorname{ierfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left\{ \exp(-x^2) - x[1 - \operatorname{erf}(x)] \right\}$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$$

برای وقتی که اندازه‌ی x بسیار کوچک می‌باشد از بسط تیلور (مکلورن) داریم:

$$\exp(-x^2) \cong 1 - x^2$$

با قرار دادن این تقریب در رابطه‌ی $\operatorname{erf}(x)$ به دست می‌آوریم:

$$\begin{aligned} \operatorname{erf}(x) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x (1 - y^2) dy \\ &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(x - \frac{1}{3} x^3 \right) \cong \frac{2}{\sqrt{\pi}} x \end{aligned}$$

حال هر دو نتیجه به دست آمده را برای به دست آوردن $\operatorname{ierfc}(x)$ به کار می‌بریم:

$$\begin{aligned} \operatorname{ierfc}(x) &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left\{ 1 - x^2 - x \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} x \right) \right\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} x - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \right) x^2 \end{aligned}$$

با استفاده از این نتیجه، و به ازای $x = \frac{z}{2\sqrt{\chi t}}$ و

$$x = \frac{\sqrt{z^2 + a^2}}{2\sqrt{\chi t}} \text{ می‌توان نوشت:}$$

$$\begin{aligned} \Delta T(z,t \rightarrow \infty) &= \frac{2H}{k} \sqrt{\chi t} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \frac{z}{2\sqrt{\pi}\sqrt{\chi t}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \right) \frac{z^2}{4\chi t} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} + \frac{\sqrt{z^2 + a^2}}{2\sqrt{\pi}\sqrt{\chi t}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \right) \frac{z^2 + a^2}{4\chi t} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T(z,t \rightarrow \infty) &\cong \frac{2H}{k} \left[-\frac{z}{2\sqrt{\pi}} + \frac{\sqrt{z^2 + a^2}}{2\sqrt{\pi}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \right) \frac{a^2}{4\sqrt{\chi t}} \right] \cong \frac{H}{k\sqrt{\pi}} (\sqrt{z^2 + a^2} - z) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \Delta T(z,t \rightarrow \infty) \cong \frac{H}{k\sqrt{\pi}} (\sqrt{z^2 + a^2} - z)$$