

«مقاله پژوهشی»

بررسی اثر محو شدگی پاسخ کالریمتر تداخل سنجی تمام نگاری به روش حل عددی

امیرمحمد بیگزاده*^۱، محمدرضا باسعادت^۲، محمدرضا رشیدیان وزیر^۳

۱. دکتري، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

۲. دکتري، پژوهشکده فیزیک و شتاب گرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۸

Numerical Investigation of the Fading Effect of an Interferometric Holographic Calorimeter Response by Numerical Method

A.M. Beigzadeh*¹, M.R. Basaadat², M.R. Rashidian Vaziri³

1. Ph.D., Radiation Application Research School, NSTRI, AEOI, Tehran, Iran

2. Ph.D., Physics and Accelerators, Research School, NSTRI, AEOI, Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Photonics and Quantum Technologies Research School, NSTRI, AEOI, Tehran, Iran

Received: 2020/01/19

Accepted: 2020/04/06

Original Article

مقاله پژوهشی

Abstract

The operation principle of calorimeters used for dosimetry of ionizing radiations is based on measuring the induced temperature difference in the absorbent due to thermal energy deposition of the ionization radiation. In recent years, one of these methods has been the holographic optical calorimetry by laser beams. One of the issues that affect the response accuracy of the calorimeters is the heat transfer phenomenon in the adsorbent material. This phenomenon affects the measurement accuracy of the absorbed dose. In this work, using numerical coding in the FORTRAN environment, the dose profile change due to heat transfer effects in the PMMA tissue-equivalent material inside a holographic interferometry calorimeter has been investigated and the results have been compared with the finite element method results.

Keywords

Interferometric Calorimetry, Numerical Method, Finite Element, Holography, Ionization Radiation.

چکیده

اصول کار کالریمترهای مورد استفاده برای دزیمتری تابش‌های یون‌ساز، اندازه‌گیری تغییرات دمایی ایجاد شده در ماده جاذب به سبب انرژی گرمایی سپارش انرژی باریکه یون‌ساز در ماده جاذب است. در سال‌های اخیر، یکی از این روش‌های دزیمتری، روش کالریمتری نوری تمام نگاری با استفاده از باریکه‌های لیزر بوده است. یکی از مسائلی که دقت عملکرد کالریمترهای مورد استفاده برای دزیمتری را تحت تاثیر قرار می‌دهد، مسئله انتقال حرارت در قلب ماده جاذب آن است. این پدیده بر روی سنجش درست دز جذبی تاثیرگذار است. در این کار با استفاده از روش حل عددی با کد فرترن به بررسی تغییر نیم‌رخ دز ایجاد شده در ماده معادل بافت پلی‌متیل متآکریلات کالریمتر تداخل‌سنجی تمام‌نگاری در اثر پدیده انتقال حرارت پرداخته شده و نتایج آن با نتایج روش المان محدود مورد مقایسه قرار گرفته است.

واژگان کلیدی

کالریمتری تداخل‌سنجی، حل عددی، المان محدود، تمام‌نگاری، تابش‌های یون‌ساز.

*Corresponding Author: beigzadeh_am@yahoo.com

* نویسنده مسئول: امیرمحمد بیگزاده

مقدمه

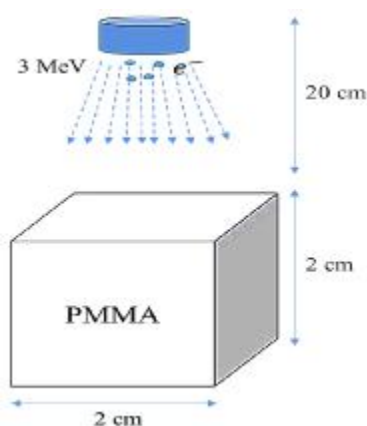
هر سیستم دزیمتری که به روش کالریمتری کار می‌کند، پس از جذب دز، بی‌درنگ تحت تأثیر پدیده‌ای به نام انتقال حرارت با محیط اطراف خود قرار می‌گیرد. این تبادل گرما بین محیط و جسم جاذب مقدار واقعی دز جذب شده در محیط را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. کالریمترهای مرسوم در دزیمتری تابش‌های یون‌ساز کالریمترهای آب و گرافیت هستند. روش دیگری به نام کالریمتری تداخل‌سنجی تمام‌نگاری وجود دارد که روش خواندن میزان دز جذبی در آن با استفاده از باریکه‌های هم‌دوس لیزر است. با وجود اهمیت موضوع انتقال حرارت، با جستجو در منابع علمی موجود، مرجعی که به بررسی اثر انتقال حرارت در کالریمتری به روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری پرداخته باشد، محدود است. مدل‌های ارائه‌شده به وسیلهٔ افراد مختلف برای بررسی اثر پخش حرارتی در کالریمترهای تحت تابش یون‌ساز که به روش‌های دیگری خواندن جذب دز را انجام می‌دهند، نیز دارای جامعیت نیست و اثر این عامل مهم را تنها با ارائهٔ فرض‌ها و تقریب‌های ساده کننده و زیاد بررسی کرده‌اند. هدف از این مدل‌سازی بررسی اثر انتقال حرارت در اجسام جامد شفاف و معادل بافت مرسوم مورد استفاده در کالریمتری به روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری است [۱-۴].

به برخی از منابع انتقال حرارت رسانی در کالریمترها در مرجع در ادامه اشاره شده است. در سال ۱۹۷۴ اسوینی^۱ و همکارانش برای بررسی اثر انتقال حرارت در بالای سطوح گرم از یک تداخل‌سنج مایخ-زندر استفاده کردند [۵]. در سال ۱۹۸۱ نیز فاو^۲ و دالفورس^۳ نیم‌رخ دمای هوای زیر یک ورق مسی گرم شده را با استفاده از تداخل‌سنج مایخ زندر اندازه‌گیری کردند [۶]. در سال ۱۹۸۸ لی^۴ و گلدشتاین^۵ اثر همرفت و نیز توزیع دما را در آبی که به آن ذراتی برای افزایش رسانندگی الکتریکی افزوده شده بود و با یک صفحه برای تأمین انرژی داخلی آن گرم می‌شد، مورد بررسی قرار دادند [۷]. آرمان صرفه‌نیا و همکارانش رسانی حرارتی در کالریمتری باریکه پروتون را به روش عددی تحلیل کرده‌اند

[۸]. مدل‌سازی پدیده انتقال حرارت برای کالریمتر استاندارد گرافیت توسط گوئرا^۶ و همکارانش انجام شد [۹]. مسئلهٔ دیگر در کالریمترها سپارش غیریکنواخت دز در داخل آنها است و این مشکل زمانی که اندازه‌گیری قلهٔ توزیع دز مورد نظر باشد، تشدید می‌شود. به این معنی که این مشکل در گرم‌ترین نقطهٔ کالریمتر که انتقال حرارت در آن نقطه بیشینه است، غیرقابل اجتناب خواهد بود. هدف از این مدل‌سازی بررسی اثر انتقال حرارت در اجسام جامد شفاف و معادل بافت مرسوم مورد استفاده در کالریمتری به روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری است.

شبیه‌سازی

شبیه‌سازی مونت کارلوی جذب دز برای یک مکعب پلیمری با ابعاد $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$ انجام شده است. نتایج از نقطه‌نظر تشکیل و تغییر منحنی‌های هم دز و چگونگی فرآیند انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مدل ارائه شده، ابتدا توزیع دز جذبی داخل محیط پلیمر با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX برای یک چشمهٔ تابش یون‌ساز الکترونی با انرژی ۳ مگاالکترون ولت محاسبه شد [۴ و ۱۰]. (شکل ۱).



شکل ۱. طرح مورد استفاده برای محاسبه توزیع دز داخل سلول پلی متیل متاآکریلات

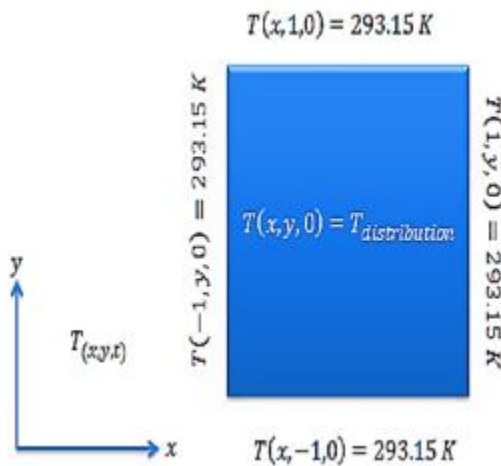
1. Sweeney
2. Faw
3. Dullforce
4. Lee
5. Goldstein

که در آن q نرخ انتقال گرما است. α ضریب پخش حرارتی نامیده و به صورت زیر بیان می شود:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (2)$$

با واحد $\frac{W}{m.K}$ ضریب هدایت گرمایی که در k که ظرفیت گرمایی ویژه با c و چگالی با واحد $\frac{Kg}{m^3}$ ρ است. شرایط اولیه سیستم در $\frac{J}{KgK}$ واحد

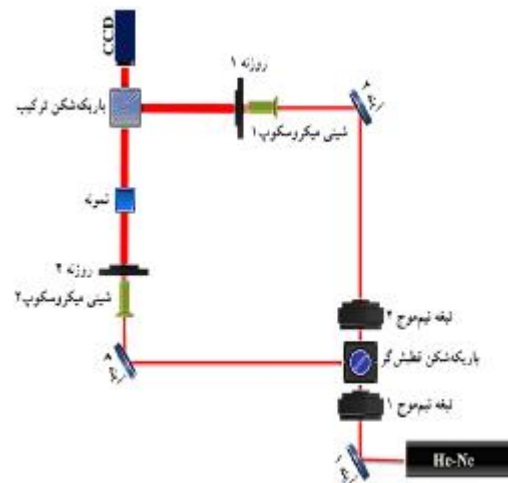
شکل نشان داده شده است.



شکل ۳. شرایط اولیه و مرزی حاکم بر سیستم

روش های عددی برای معادلات دیفرانسیل معمولی روش هایی هستند که برای یافتن تقریب عددی برای حل معادلات دیفرانسیل معمولی استفاده می شوند. در این جا معادله انتقال حرارت در ماده جامد در دو بعد حل می شود. شرایط مرزی حاکم دمای $293.15 K$ محیط در نظر گرفته شده است (شکل ۳). معادله انتقال حرارت رسانشی در ماده پلی متیل متاکریلات برای پروفایل ایجاد شده در داخل ماده حل شده و برای زمان های یک تا شصت ثانیه خروجی کد فرترن به دست آمد و با استفاده از نرم افزار متلب نیم رخ و نیز طرح تداخلی ترسیم شد. روش المان محدود پرکاربردترین روش برای حل مشکلات مدل های مهندسی و ریاضی است. برای حل مسئله به روش المان محدود از

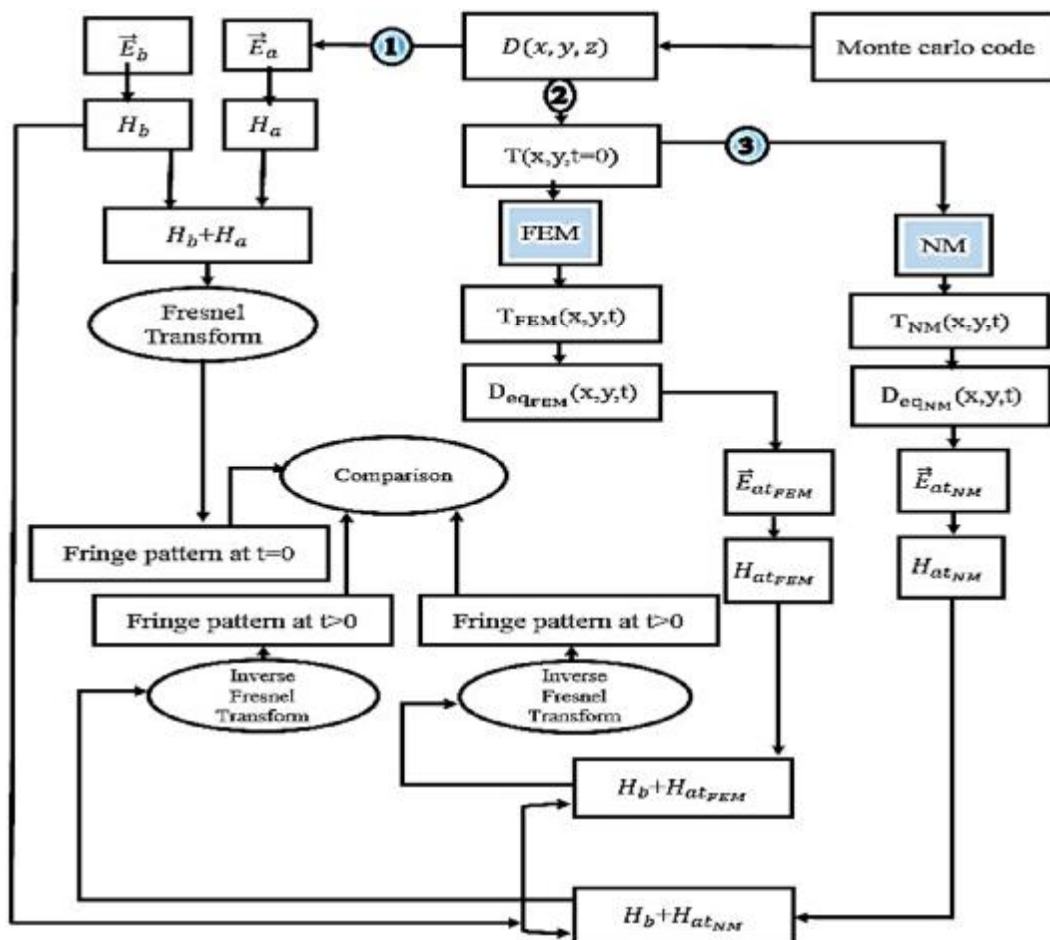
پس از شبیه سازی جذب دز در PMMA با استفاده از کد مونت کارلوی MCNP، در ادامه، چیدمان تداخل سنجی ماخ-زندر که اغلب در کالریمتری به روش تداخل سنجی تمام نگراری مورد استفاده قرار می گیرد (شکل ۲) مدل سازی شده است. تمام روابط ریاضی مربوط به انتشار نور و تغییر فاز به علت جذب دز در جسم در داخل ماده جاذب با استفاده از برنامه های نوشته شده در محیط متلب پیاده سازی شده است. روش کامل مدل سازی این بخش را می توان در مرجع [۳] مشاهده کرد.



شکل ۲. چیدمانی مورد استفاده برای مدل سازی کالریمتر تداخل سنجی تمام نگراری

برای بررسی اثر انتقال حرارت در این ماده جاذب که به عنوان قلب اصلی کالریمتر در نظر گرفته شده بود، از کد نوشته شده به زبان برنامه نویسی فرترن استفاده شده است. نتایج با روش اندازه گیری المان محدود در محیط کامسول نیز مقایسه شده است. با توجه به جامد بودن ماده جاذب، باید معادلات انتقال حرارت در محیط جامد برای آن حل شود. رابطه (۱) معادله گرمایی توصیف کننده رسانش با نام معادله انتقال حرارت رسانش گذرا است [۱۱]:

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{e}_{gen}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$



شکل ۴. طرحواره مقایسه روش المان محدود و روش حل عددی، مسیر ۱ نحوه مدل سازی طرح های تداخلی ناشی از جذب دز در ماده، مسیر ۲ حل وابسته به زمان مسئله انتقال حرارت دستگاه کالریمتر تداخل سنجی به روش المان محدود، مسیر ۳ حل وابسته به زمان مسئله انتقال حرارت دستگاه کالریمتر تداخل سنجی به روش عددی (محاسبات فرتن)

یافته ها

در ادامه نتایج به دست آمده با استفاده از روش المان محدود و روش حل عددی برای بررسی اثر انتقال حرارت بر روی پاسخ کالریمترهای تداخل سنجی که به صورت نوارهای تداخلی است، در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج به صورت نیمرخ دمایی، معادل با نیمرخ دز جذب شده در کالریمتر و نیز طرح های تداخلی که نماینده منحنی های هم دز ایجاد شده در ماده در زمان های مختلف پس از پرتو دهی هستند. نتایج هر دو روش نشان می دهد که با گذشت زمان و با توجه به شرایط مرزی موجود انتقال حرارت باعث می شود که با گذشت زمان از تعداد طرح های تداخلی کاسته شود و پس از شصت ثانیه به صورت یک ناحیه دایره ای تیره در مرکز ماده

بسته نرم افزاری کامسول بهره برده شد. در این مدل سازی از ماژول انتقال حرارت در جامدات برای بررسی پدیده انتقال حرارت استفاده شد.

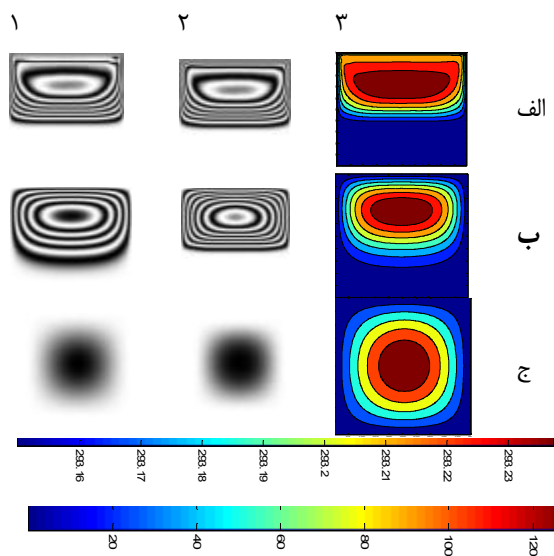
در طرحواره بالا که برای مقایسه نتایج روش های حل عددی معادله انتقال حرارت استفاده شده است، FEM و NM به ترتیب بیانگر روش های المان محدود و روش حل عددی هستند [۱۲-۱۴]. \vec{E}_a و \vec{E}_b به ترتیب میدان الکتریکی جبهه موج مرجع و شیئی ثبت شده بر روی دوربین \vec{H}_a و \vec{H}_b تمام نگار اولیه و ثانویه قبل و پس از پرتو دهی به ماده هستند. پارامتر D نیز بیانگر دز جذبی در ماده است [۴].

هر چه این مشتق‌ها ریزتر در نظر گرفته شوند، درستی مشتق‌ها دقیق‌تر و نتایج دقیق‌تری به دست می‌آیند. در انتخاب این گام‌های زمانی و مکانی به هزینه محاسباتی نیز باید دقت کرد که به گونه‌ای انتخاب نشود که هزینه محاسباتی بسیار بالایی وجود داشته باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی اثر انتقال حرارت بر روی قلب کالریمتر تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال پرداخته شد. برای این منظور از دو روش حل مسئله المان محدود و روش حل عددی با استفاده از کد نوشته شده به زبان فرترن بهره برده شد. اختلافاتی بین نتایج به دست آمده با استفاده از دو روش مشاهده می‌شود. در کارهای قبلی انجام شده به وسیله همین گروه درستی روش حل مسئله به روش المان محدود برای چیدمان‌های تجربی اعتبارسنجی شده است [۴]. نتایج نشان داد که روش المان محدود در برآورد میزان تغییرات نوارهای تداخلی در اثر پدیده انتقال حرارت نسبت به روش حل عددی از دقت بیشتری برخوردار است و می‌توان برای حل مسائل پیچیده‌تر انتقال حرارت در کالریمترهای تمام‌نگاری تداخل‌سنجی از آن بهره برد. گرچه برای حل مسئله می‌توان از روش حل عددی استفاده کرد ولی برای داشتن دقت بالاتر در حل مسائل وابسته به زمان مستلزم استفاده از سیستم‌های رایانه‌ای با قدرت پردازش بالا و نیز کوچک کردن گام‌های زمانی مسئله به سبب روشی است که حل عددی از آن در حل مسئله استفاده می‌کند.

ثابت باقی بماند. با توجه به مطالعات پیشین این پدیده حاکی از این است که ماده موردنظر از تمام مرزهای خود به صورت یکسان تحت تأثیر انتقال حرارت قرار می‌گیرد و در نهایت تمام طرح‌های تداخلی محو می‌شوند. رفته رفته این ناحیه تیره نیز در زمان‌های بعد به طور کامل از بین می‌رود که نشان می‌دهد ماده به تعادل دمایی کامل با محیط می‌رسد. نتیجه شکل نشان می‌دهد زمانی که اختلاف بین بالاترین و پایین‌ترین دما حدود 0.1038 سلسیوس باشد نوار تداخلی ایجاد نمی‌شود. علت اختلاف موجود بین نتایج محاسبات عددی و روش المان محدود دقت در گام‌های محاسبه مشتق‌گیری‌های زمانی و مکانی است.



شکل ۵. طرح تداخلی و نیم رخ دز محاسبه شده از طریق روش حل عددی (ستون ۲) و محاسبات المان محدود (ستون ۱) (در زمان‌های الف) ۱، ب) ۱۰ و ج) ۶۰ ثانیه)

منابع

[۲] محمدرضا رشیدیان وزیری، امیرمحمد بیگزاده و فرهود ضیائی. «اندازه‌گیری دز جذبی الکترون در فانتوم آب به روش تمام‌نگاری دیجیتال با باریکه لیزر»، مجله علمی پژوهشی «علوم و فناوری‌های پدافند نوین»، جلد ۹، شماره ۴، ۱۳۹۷.

[۱] امیرمحمد بیگزاده، محمدرضا رشیدیان وزیری و فرهود ضیائی. «به کارگیری روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال با نوردهی دوگانه برای محاسبه میزان دز جذبی در پلیمر پلی‌متیل متاکریلات»، مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۵، شماره ۴، ۱۳۹۶.

[3] A. M. Beigzadeh, MR Rashidian Vaziri, and F. Ziaie. "Modelling of a holographic interferometry based calorimeter for

radiation dosimetry." *NIM A*: pp. 40-49, 2017.

- [4] D.B. Pelowitz, MCNPX User's Manual Version 2.5.0, 76, *Los Alamos National Laboratory*, 2005.
- [5] Sweeney, D. W., and C. M. Vest. "Measurement of three-dimensional temperature fields above heated surfaces by holographic interferometry." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 17.12 (1974) : 1443-1454.
- [6] Faw, R. E., and T. A. Dullforce. "Holographic interferometry measurement of convective heat transport beneath a heated horizontal plate in air." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 24.5 (1981) : 859-869.
- [7] Lee, Jae-Heon, and R. J. Goldstein. "An experimental study on natural convection heat transfer in an inclined square enclosure containing internal energy sources." *Journal of heat transfer* 110.2 (1988) : 345-349.
- [8] Sarfehnia, A., et al. Primary water calorimetry for clinical electron beams, scanned proton beams and 192 Ir brachytherapy. No. *IAEA-CN-182*. 2010.
- [9] Guerra, A. S., et al. "A standard graphite calorimeter for dosimetry in brachytherapy with high dose rate 192Ir sources." *Metrologia* 49.5 (2012): S179.
- [10] A. Miller, W.L. McLaughlin. "Holographic measurements of electron-beam dose distributions around inhomogeneities in water". *Phys Med Biol*. pp 285 1976.
- [11] Bergman, Theodore L., et al. *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons, 2011.
- [12] Pryor, Roger W. Multiphysics modeling using COMSOL®: a first principles approach. *Jones & Bartlett Publishers*, 2009.
- [13] Minkowycz, W. J., et al. "Handbook of numerical heat transfer." *New York* (1988).
- [14] Reddy, Junuthula Narasimha. *Introduction to the finite element method*. McGraw-Hill Education, 2019.

COPYRIGHTS



© 2022 by the authors. Licensee PNU, Tehran, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY4.0) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)