



انباشت و مشخصه‌یابی لایه جاذب ید-۱۲۵ بر هسته فرومغناطیس مورد استفاده در سیستم ترموبراکی‌تراپی

الهام محقق‌پور^{۱*}، شهاب شبیبانی^۱، لیلا فرزین^۱، رضا صابر^۲

۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران- ایران
۲. مرکز تحقیقات علوم و تکنولوژی در پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، صندوق پستی: ، تهران- ایران

*Email: emohaghegh@aeoi.org.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۲

چکیده

آلیاژ فرومغناطیس نیکل-مس با درصد وزنی (۷۰/۴-۲۹/۶)٪، پوشش داده شده با لایه جاذب ید-۱۲۵ به عنوان هسته مورد استفاده در سیستم ترموبراکی‌تراپی ساخته شد. لایه جاذب با ضخامت حدود $100\ \mu\text{m}$ ، متشکل از کربن فعال با ساختار گرافیت میکروکریستالی، حاوی نقره و پلی‌استایرن با نسبت وزنی ۷۰ به ۳۰ می‌باشد. کربن فعال به دلیل ساختار متخلخل، یکی از جاذب‌های ترجیحی ید است. جذب ید-۱۲۵ به واسطه جذب شیمیایی آن بر نقره دوپ شده در ساختار کربن فعال افزایش می‌یابد. پلی‌استایرن علاوه بر آنکه به عنوان چسب در ساختار لایه جاذب عمل می‌کند، جذب فیزیکی ید را بر روی سطح هسته پوشش داده شده تسهیل می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که راندمان جذب ید-۱۲۵، به صورت محلول یدید سدیم و با اکتیویته میانگین $5\ \text{mCi}$ بر روی هسته نیکل-مس/پلی‌استایرن/کربن فعال دوپ شده با نقره پس از ۲ ساعت غوطه‌وری ۲۰/۳۱٪ بود. در حالی که، پوشش طلا و نقره بر هسته فرومغناطیس نیکل-مس قبل از انباشت لایه جاذب، راندمان جذب ید-۱۲۵ را به ترتیب تا ۳۲/۷۷٪ و ۶۰/۲۳٪ پس از ۲ ساعت غوطه‌وری افزایش داد. یافته‌ها تأثیر قابل توجه پوشش طلا یا نقره بر افزایش راندمان استخراج را نشان می‌دهند. در تحقیق حاضر به منظور افزایش راندمان جذب ید-۱۲۵ از روش استخراج مرحله به مرحله استفاده شده است.

کلیدواژه‌ها: استخراج مرحله به مرحله، هسته فرومغناطیس نیکل-مس، ترموبراکی‌تراپی

Coating and characterization of Iodine-125 absorbent layer on the ferromagnetic core used in the Thermo-Brachytherapy system

E. Mohagheghpour^{*1}, Sh. Sheibani¹, L. Farzin¹, R. Saber²

1. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran – Iran
2. Science and Technology Research Center in Medicine, Tehran University of Medical Sciences, P.O.Box: , Tehran - Iran

Research Article

Received: 26.05.2024, Revised: 24.07.2024, Accepted: 12.08.2024

Abstract

A Ni-Cu (70.4-29.6 wt%) ferromagnetic alloy coated with an absorber layer of iodine-125 was used as the core in the Thermo-Brachytherapy (TB) system. The absorber layer, which was $100\ \mu\text{m}$ thick and had a microcrystalline graphite structure, consisted of silver-doped activated carbon and polystyrene in a 70:30 weight ratio. Activated carbon is a preferred adsorbent for iodine capture due to its porous nature. Silver doping in the carbon enhances the trapping of iodine-125 through chemical adsorption. Polystyrene, acting as a binder in the absorptive layer's structure, facilitates the physical absorption of iodine on the surface of the silver-doped activated carbon-coated core. Results showed that the extraction efficiency of iodine-125 (as sodium iodide solution) with an average activity of $5\ \text{mCi}$ on the nickel-copper core/polystyrene/silver-doped activated carbon was 20.31% after 2 hours. Coating the nickel-copper ferromagnetic core with gold or silver before depositing the silver-doped activated carbon increased the extraction efficiency to 32.77% and 60.23% after 2 hours, respectively. These findings highlight the significant impact of silver or gold coating on enhancing extraction efficiency. Moreover, a multi-step extraction process was employed in this research, where extraction steps were repeated to increase the recovery of iodine-125.

Keywords: Multistage extraction, Ni-Cu ferromagnetic core, Thermo-brachytherapy



۱. مقدمه

ترموبراک‌تراپی یک روش جدید برای درمان تومورهای بدخیم پروستات و مغز می‌باشد که به صورت هم‌زمان از دو مکانیزم گرمادرمانی^۱ و براکی‌تراپی^۲ استفاده می‌کند [۱-۳]. روش مذکور به علت افزایش سرعت از بین بردن سلول‌های معیوب در اثر کاهش توانایی زنده‌مانی سلول‌ها در محدوده °C ۴۱-۴۶ و افزایش حساسیت سلول‌ها به درمان‌های دیگر مانند پرتودرمانی و شیمی‌درمانی [۳-۵]، مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است [۳]. به عنوان مثال تحقیقات ساپوزینک^۳ و همکاران در سال ۱۹۸۳ [۶]، نشان‌دهنده افزایش قابل توجه سرعت درمان در گرمادرمانی ترکیبی و براکی‌تراپی با دز پایین در موش C₃H در مقایسه با گرمادرمانی و براکی‌تراپی به تنهایی می‌باشد. میلر^۴ و همکاران در سال ۱۹۸۹، تأثیر استفاده هم‌زمان گرمادرمانی با هسته فرومغناطیس به همراه براکی‌تراپی با استفاده از ید-۱۲۵ را در درمان ملانوم خرگوش بررسی کردند [۷]. استیوز^۵ و همکاران نیز در سال ۱۹۹۲، به بررسی ترکیب دو روش درمانی براکی‌تراپی و گرمادرمانی جهت درمان سرطان ملانومای کوروییدی خرگوش پرداختند [۸]. نیدبالا^۶ و همکاران در یک گزارش در سال ۲۰۰۶ نشان دادند که گرمادرمانی منجر به افزایش قابل توجه حساسیت بافت در معرض تابش پیوسته با دز پایین و تابش با نرخ دز معادل به صورت پالس می‌شود [۹]. در سال ۲۰۱۱، آدام شیکل^۷ و همکاران، مطالعاتی را بر روی اثرات گرمادرمانی همراه با براکی‌تراپی برای درمان سرطان سینه انجام دادند [۱۰]. علاوه بر آن، مرادی و همکاران در سال ۲۰۲۰ در مطالعاتی که با هدف بررسی میزان اثربخشی براکی‌تراپی به همراه گرمادرمانی اولتراسونیک در حضور نانوذرات طلا^۸ (GNPs) بر روی تومور رتینوبلاستوما چشم در مدل حیوانی خرگوش انجام شد، نشان دادند که درمان ترکیبی براکی‌تراپی همراه با گرمادرمانی باعث افزایش درصد نکروز رتینوبلاستوما و کاهش چشمگیر توده رتینوبلاستوما در چشم خرگوش می‌شود [۱۱]. تحقیقات گایتام^۹، پارسایی^{۱۰} و همکاران در سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶ در مورد اثرات استفاده هم‌زمان از گرما و پرتو بر روی تومورهای جامد توسط سیستم ترموبراک‌تراپی با هسته

فرومغناطیس و چشمه پرتوزا ید-۱۲۵ نیز حاکی از افزایش اثربخشی براکی‌تراپی هم‌زمان با گرمادرمانی می‌باشد [۳، ۱۲]. اولین ایزوتوپ معمول در براکی‌تراپی رادیم-۲۲۶ بوده است اما ایزوتوپ‌های ساخت بشر از جمله ید-۱۲۵ سزیم-۱۳۱، سزیم-۱۳۷، پالادیم-۱۰۳، ایریدیم-۱۹۲ و طلا-۱۹۸ مزیت‌های بارزی از لحاظ امنیت در برابر تابش، انرژی، نیمه‌عمر و اندازه چشمه در مقایسه با رادیم دارند و به همین جهت در حال حاضر جایگزین آن شده‌اند [۱۳، ۱۴]. چشمه‌های پرتوزای ید-۱۲۵ اولین بار در سال ۱۹۸۴ به وسیله گوتین^{۱۱} در کشور آمریکا جهت براکی‌تراپی مورد استفاده قرار گرفت [۱۵]. ید-۱۲۵ و پالادیم-۱۰۳ معمول‌ترین ایزوتوپ‌ها در براکی‌تراپی هستند [۱۶]. ید-۱۲۵ انرژی بیشتر و نیمه‌عمر بالاتری نسبت به پالادیم-۱۰۳ دارد بنابراین جهت جذب در ماتریکس لایه جاذب و البته در حالت یدید سدیم که به صورت محلول در آب است، ترجیح داده می‌شود [۱۷]. علاوه بر آن، انرژی کم پرتوایکس ید-۱۲۵ منجر به کاربردهای متعدد در زمینه تصویربرداری پزشکی هسته‌ای، آزمایشات بیولوژیکی و پرتودرمانی شده است [۱۸].

به منظور افزایش دمای بافت در فرایند گرمادرمانی از امواج مختلفی مانند رادیوفرکانس، اولتراسونیک و میکروویو و روش‌های مختلف مانند گرمایش مقاومتی، گرمایش القایی و ... استفاده می‌شود [۱۹]. در شرایطی که فرایند گرمادرمانی توسط القاء مغناطیسی امواج الکترومغناطیس انجام شود، تعدادی دانه^{۱۲} فرومغناطیس بسته به حجم تومور در محل تومور، کاشته شده و دمای آلیاژ تحت تأثیر القاء امواج الکترومغناطیس تا دمای کوری افزایش یافته و تا زمانی که میدان الکتریکی برقرار است، ثابت باقی می‌ماند؛ این امر منجر به افزایش دمای بافت در محل قرارگیری هسته فرومغناطیس می‌شود [۳].

از میان آلیاژهای مورد استفاده به عنوان هسته در سیستم‌های ترموبراک‌تراپی، آلیاژ نیکل-مس با ۷۰/۴٪ نیکل و ۲۹/۶٪ مس، با دمای کوری °C ۴۶-۴۱، دمای مطلوب در فرایند گرمادرمانی را تأمین می‌کند که در تحقیقات زیادی به عنوان هسته سیستم ترموبراک‌تراپی معرفی شده است [۲، ۳، ۱۲]. رادیونوکلئید جذب شده در لایه جاذب و بر سطح هسته فرومغناطیس، فرایند براکی‌تراپی را به صورت هم‌زمان با گرمادرمانی انجام می‌دهد.

1. Hyperthermia
2. Brachytherapy
3. Sapozink
4. Mieler
5. Steeves
6. Niedbala
7. Adam Chichel
8. Gold Nano-Particles
9. Gautam
10. Parsai

11. Gutin

12. Seed



به منظور شکل‌دهی آلیاژ از دستگاه اکسترودر استفاده شده است. به این صورت که شمش حاصل از کوره ذوب مجدد قوسی تحت خلأ^۳ (VAR) در چند مرحله به شکل سیمی با قطر $500 \mu\text{m}$ درآمد و در مرحله بعد سیم حاصل با استفاده از دستگاه کاتر به قطعات مساوی با طول $3/2 \text{ mm}$ تقسیم شد تا برای انجام فرایند لایه‌نشانی آماده شود.

هسته‌های فرومغناطیس به سه صورت بدون انجام فرایند پوشش‌دهی، پوشش‌دهی با استفاده از روش کندوپاش^۴ توسط یک لایه نازک طلا و یا نقره به عنوان بخشی از لایه جاذب روی هسته فرومغناطیس و قبل از انباشت لایه جاذب متخلخل آماده‌سازی شده و در آن، در دمای 80°C به مدت ۳ ساعت خشک شدند. فرایند پوشش‌دهی هسته فرومغناطیس با استفاده از طلا یا نقره با استفاده از دستگاه BALTEC-SCD۰۰۵ با شرایط کاری 6 mA ، در فشار گاز آرگون به اندازه $0/5 \text{ mb}$ و با فاصله کاری 35 mm بین نمونه و صفحه هدف به مدت 600 s انجام شد. براساس برون‌یابی نمودار ضخامت لایه انباشت شده براساس زمان لایه‌نشانی و در جریان‌های متفاوت، ضخامت لایه نقره انباشت شده 14 nm و طلا انباشت شده 22 nm می‌باشد.

به منظور افزایش تخلخل در ساختار کربن فعال به عنوان جاذب ماده رادیواکتیو، اسیدشویی این ساختار با استفاده از اسیدکلریدریک ۱٪ انجام شد و سپس خروج اسید اضافه از ساختار با چندین بار فرایند شستشو انجام شد.

کربن فعال بعد از اسیدشویی به مدت ۲۴ ساعت در مجاورت محلول نیترات نقره $0/1$ نرمال قرار گرفت و سپس به منظور جداسازی نقره‌های آزاد در ساختار کربن فعال، چندین بار فرایند شستشو انجام شد و در نهایت ترکیب کربن فعال حاوی نقره در دمای 80°C خشک شد. پلی‌استایرن به عنوان چسب در تولوئن در دمای 100°C حل شد و سپس با نسبت وزنی ۳۰ به ۷۰ با کربن فعال مخلوط شد. در شکل ۱ طرح‌واره‌ای از مراحل تولید لایه جاذب و جذب ید-۱۲۵ نمایش داده شده است.

برای بررسی ساختار پوشش کربنی و مطالعه پیوندها و چیدمان اتم‌های کربنی در پوشش‌های ایجاد شده از طیف‌سنجی رامان استفاده شد. برای این منظور از دستگاه رامان با لیزر Nd:YAG، طول‌موج 532 nm و توان 10 mW استفاده شده است.

هر چند تحقیقاتی در استفاده از آلیاژ نیکل-مس به عنوان هسته فرومغناطیس پوشش داده شده با کربن وجود دارد [۲، ۳، ۱۲]، اما در خصوص روش‌های انباشت و پارامترهای مؤثر بر پوشش مذکور جهت استفاده در سیستم ترموبراکی‌تراپی گزارش مشخصی صورت نگرفته است. تنها در تحقیقات انجام شده توسط گایتام و همکاران، جهت ساخت دانه مورد استفاده در فرایند ترموبراکی‌تراپی، لایه پوشش داده شده گرافیت با دانسیته $2/667 \text{ g/cm}^3$ معرفی شده است [۳، ۱۲] و در تحقیقات دیگر به صورت مختصر به ساختار لایه جاذب مورد استفاده در چشمه دانه براکی‌تراپی اشاره شده است. به عنوان مثال، در گزارش میگونی^۱ و همکاران [۱] که از کربن به عنوان بستری برای جذب رادیوایزوتوپ استفاده شده است، لایه کربنی حاوی $85/7\%$ کربن و $14/3\%$ هیدروژن گزارش شده است. همچنین در اختراع ثبت شده در آمریکا به شماره 4994013 که دانه‌های رادیواکتیو بررسی شده است کربن، کربن فعال شده و زغال چوب به عنوان جاذب ماده رادیواکتیو به همراه تعدادی رزین‌های تبادل یونی و چسب جهت اتصال پوشش به سطح هسته و ایجاد گروه‌هایی برای جذب ماده رادیواکتیو در نظر گرفته شده است [۱۷].

در تحقیق حاضر از کربن فعال شده به عنوان بستری برای جذب ید-۱۲۵، از پلی‌استایرن به عنوان چسب و به منظور افزایش ظرفیت لایه جاذب در جذب ید-۱۲۵، از نانوذرات نقره به صورت دوپ شده در لایه جاذب برای اولین بار استفاده شده است. علاوه بر آن تأثیر لایه‌نشانی طلا و نقره به عنوان بخشی از لایه جاذب روی هسته، قبل از انباشت لایه جاذب حاوی کربن فعال، بر بازده رادیونشان‌داری برای اولین بار بررسی شده است. لایه‌نشانی طلا و نقره در ادامه تحقیقاتی که نویسندگان بر لایه‌نشانی با استفاده از روش کندوپاش پرتو یونی (IBSD^۲) بر سطوح مختلف داشتند [۲۰-۲۳]، با استفاده از روش کندوپاش انجام شده است.

۲. روش تحقیق

در تحقیق حاضر از آلیاژ نیکل-مس با ترکیب وزنی $70/4\%$ نیکل و $29/6\%$ مس که مراحل ساخت، همگن‌سازی و مشخصه‌یابی آن در تحقیقات گذشته نویسندگان انجام شده است [۲۴]، استفاده شد.

3. Vacuum Arc Remelting

4. Sputtering

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology

Vol. 46 (2), Serial Number 112, 2025, P 30-38

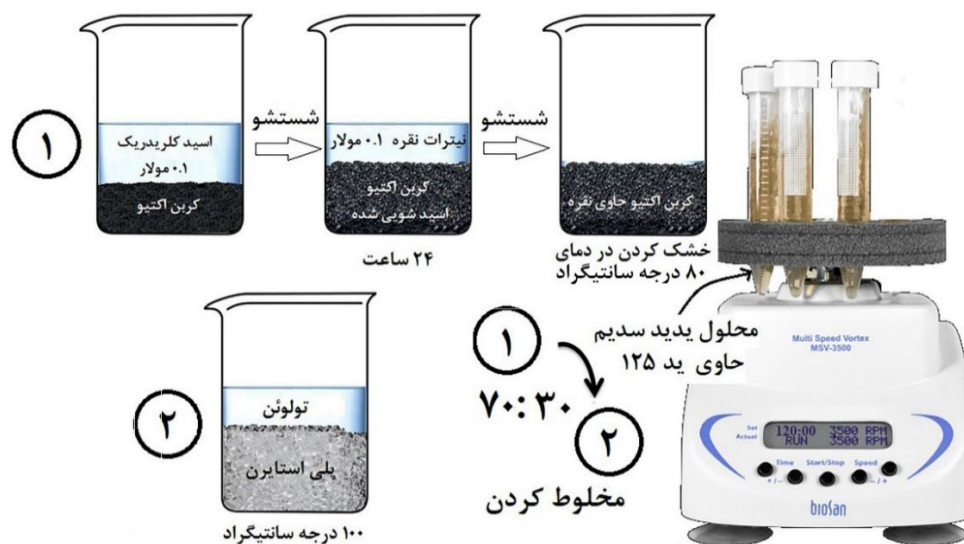
1. Meigooni

2. Ion Beam Sputtering Deposition

مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای

دوره ۴۶، شماره ۲، جلد ۱۱۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۳۰-۳۸



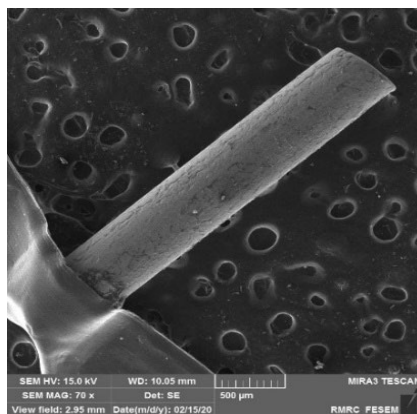


شکل ۱. طرح‌واره‌ای از مراحل تولید لایه جاذب و جذب‌ید-۱۲۵.

در شکل ۴ نمونه‌ای از هسته فرومغناطیس پوشش داده شده و طرح‌واره ساختار لایه جاذب انباشت شده بر هسته فرومغناطیس نمایش داده شده است.

به منظور انباشت لایه جاذب با حداکثر جذب‌ید-۱۲۵ بر هسته فرومغناطیس نیکل-مس، جذب به دو صورت فیزیکی و شیمیایی در لایه کربنی با کنترل تخلخل و دوپ کردن عناصر با تمایل به واکنش بالا با ید مورد بررسی قرار گرفت.

بدین منظور کربن فعال ریزدانه به عنوان جاذب ماده رادیواکتیو مورد استفاده قرار گرفت و استحکام لایه جاذب با استفاده از چسب پلی‌استایرن که در آب غیرقابل حل می‌باشد و بدون تجزیه یا خرد شدن روی سطح هسته فرومغناطیس تثبیت می‌شود، تأمین شد. البته پلی‌استایرن علاوه بر آن که به عنوان چسب در لایه جاذب عمل می‌کند، منجر به افزایش جذب فیزیکی ید در سطح هسته می‌شود [۱۷].



شکل ۲. تصویر SEM سیم حاصل از فرایند اکسترودر پس از برش و قبل از پوشش‌دهی.

جهت بررسی هسته فرومغناطیس از نظر ساختاری و یکنواختی بعد از ۴ بار ذوب مجدد و انجام فرایند شکل‌دهی، از آنالیزهای طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (FEI/SEM QUANTA ۲۰۰-EDS EDAX Silicon Drift ۲۰۱۷, USA, ۲۵kV) استفاده شد. علاوه بر آن به منظور سنجش میزان جذب‌ید-۱۲۵ در لایه جاذب بعد از لایه‌نشانی از کوریومتر استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری از کانال سزیم استفاده شد و ضریب تصحیح اعمال شد.

۳. نتایج و بحث

در شکل ۲ محصول سیستم اکسترودر به صورت سیم پس از برش و قبل از پوشش‌دهی نمایش داده شده است. تصویر SEM حاکی از آن است که با استفاده از فرایند اکسترودر، قطر سیم حاصل منطبق با ابعاد مورد نیاز در ساخت هسته فرومغناطیس (۰/۵ mm) حاصل شده است.

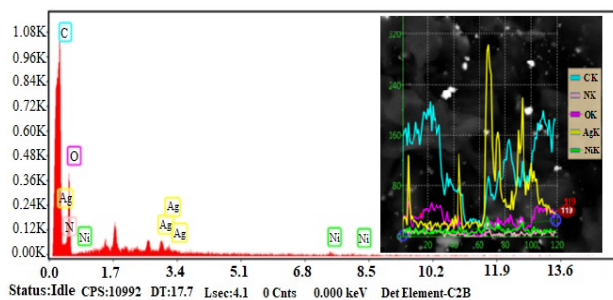
در شکل ۳ سطح مقطع مورد بررسی از هسته فرومغناطیس با استفاده از تصویر SEM به همراه نتیجه آنالیز EDS گزارش شده است. همان‌طور که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، ساختار هسته حاوی ۷۰/۱۱٪ نیکل و ۲۹/۸۹٪ مس می‌باشد. با توجه به این‌که آنالیز مذکور نیمه‌کمی است، غلظت‌های گزارش شده از نظر انطباق با ترکیب مورد نظر (۷۰/۴٪ نیکل و ۲۹/۶٪ مس [۱۲، ۳]) قابل قبول است.

1. Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy



هسته فرومغناطیس پوشش داده شده با استفاده از لایه جاذب، بعد از جذب ماده رادیواکتیو در کپسول تیتانیومی قرار می‌گیرد و دو سر کپسول با استفاده از لیزر جوش داده می‌شود. بنابراین، لایه جاذب حاوی ید-۱۲۵ در تماس مستقیم با بافت قرار نمی‌گیرند و در نتیجه، استحکام لایه‌های انباشت شده به اندازه‌ای که در طول فرایند جذب ید در محیط آبی و قرارگیری در کپسول تیتانیومی از هسته جدا نشود، کافی می‌باشد. بنابراین بررسی میزان چسبندگی لایه‌ها با استفاده از روش ساده قرار دادن چسب بر روی هسته لایه‌نشانی شده و برداشتن آن انجام شد. نتایج حاکی از استحکام مطلوب لایه جاذب می‌باشد.

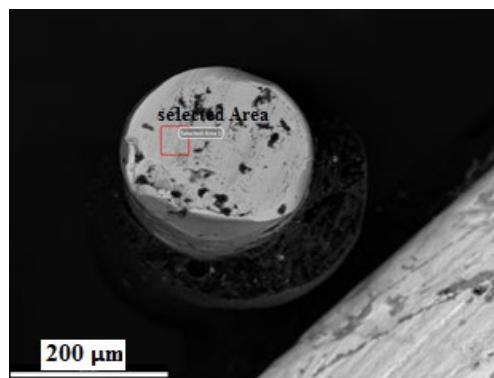
به منظور ایجاد پیوند شیمیایی لایه جاذب با ید-۱۲۵ از فرایند دوپ کردن نقره به دلیل برهم‌کنش بالایی که میان نقره و ید وجود دارد، استفاده شد [۲۵]. نتایج به‌دست آمده با استفاده از آنالیز EDS حضور نقره علاوه بر کربن و اکسیژن را در لایه انباشت شده تأیید می‌کند (شکل ۵ و جدول ۲). همان‌طور که در پروفایل ترسیم شده بر سطح نمونه با استفاده از آنالیز مذکور ملاحظه می‌شود، در محلی که پروفایل از نقاط درخشان می‌گذرد، شدت طیف زرد رنگ که نشان‌دهنده حضور نقره در ساختار است، افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان ادعا کرد که وجود نقاط درخشان در تصویر SEM لایه انباشت شده بر هسته فرومغناطیس حاکی از حضور و احتمالاً دوپ شدن نقره در ساختار لایه می‌باشد (شکل ۶).



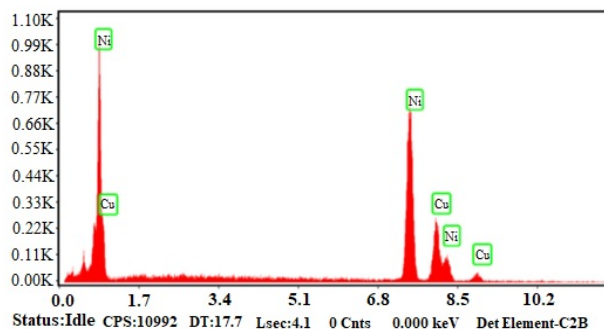
شکل ۵. نتیجه آنالیز EDS لایه انباشت شده بر سطح آلیاژ نیکل-مس.

جدول ۲. نتیجه آنالیز EDS لایه انباشت شده بر هسته فرومغناطیس آلیاژ نیکل-مس

عنصر	درصد وزنی (%)	درصد اتمی (%)	شدت خالص
کربن	۵۴/۳۳	۶۱/۳۵	۸۴۷/۰۵
نیتروژن	۱۱/۳۹	۱۱/۰۳	۳۰/۲۱
اکسیژن	۳۲/۲۰	۲۷/۳۰	۱۷۹/۴۳
نقره	۱/۵۲	۰/۱۹	۳۹/۴۱
نیکل	۰/۵۶	۰/۱۳	۱۱/۱۸



(الف)

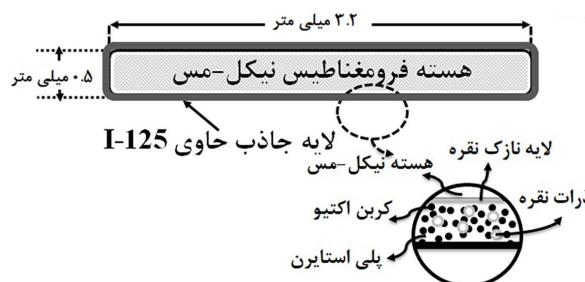
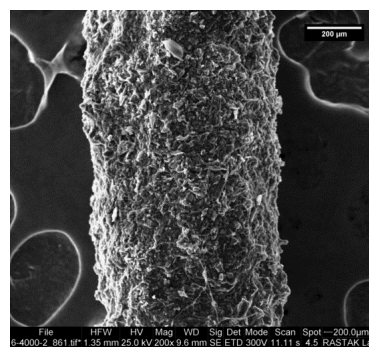


(ب)

شکل ۳. الف) مقطع هسته فرومغناطیس آلیاژ نیکل-مس (ب) نتیجه آنالیز EDS برای آلیاژ نیکل-مس پس از ۴ بار ذوب مجدد و شکل‌دهی به صورت سیم.

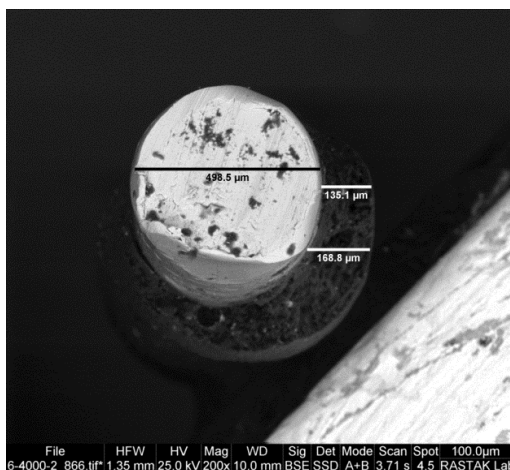
جدول ۱. نتایج آنالیز EDS برای هسته فرومغناطیس آلیاژ نیکل-مس

شدت خالص	درصد اتمی (%)	درصد وزنی (%)	عنصر
۲۷۶۷	۷۱/۷۴	۷۰/۱۱	نیکل
۹۶۳	۲۸/۲۶	۲۹/۸۹	مس

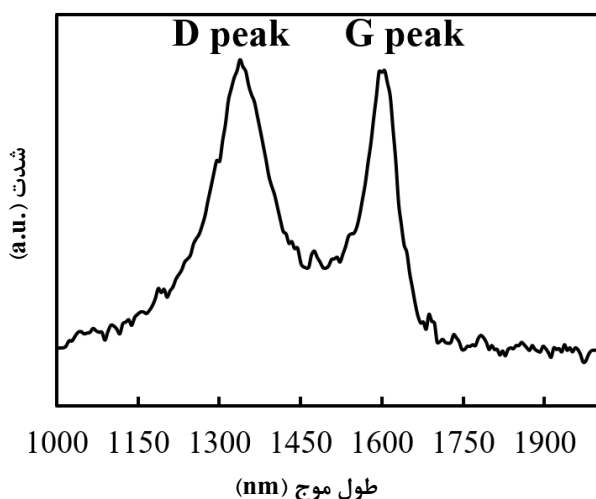


شکل ۴. تصویر و طرح‌واره هسته پوشش داده شده با استفاده از کربن فعال حاوی نقره بر آلیاژ پوشش داده شده با استفاده از نقره کندوپاش شده.



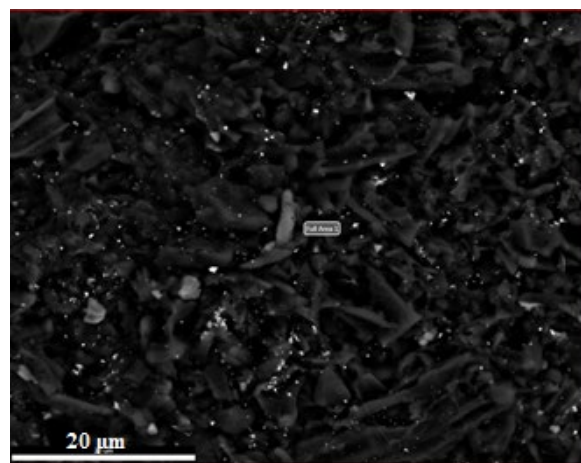


شکل ۷. مقطع هسته فرومغناطیس نیکل- مس پوشش داده شده با کربن فعال حاوی نقره.



شکل ۸. طیف رامان لایه انباشت شده بر آلیاژ نیکل- مس.

به منظور به دام انداختن یید-۱۲۵، هسته پوشش داده شده وارد محلول یدید سدیم حاوی یید-۱۲۵ با اکتیویته مشخص می شود و از مقداری یدید سدیم غیراکتیو به عنوان حامل استفاده می شود. برای این منظور هسته پوشش داده شده با لایه جاذب به مدت ۲ ساعت در محلول اکتیو قرار داده می شود. نتایج به دست آمده نشان داد که در شرایطی که لایه جاذب حاوی نقره بدون لایه جاذب کندوپاش شده بر روی سطح هسته فرومغناطیس نیکل- مس پوشش داده می شود، راندمان جذب یید-۱۲۵ با اکتیویته میانگین ۵ mCi پس از ۲ ساعت غوطه وری ۳۱٪ بود. در حالی که، پوشش طلا و یا نقره بر هسته فرومغناطیس نیکل- مس قبل از انباشت لایه جاذب، راندمان جذب یید-۱۲۵ را افزایش می دهد. به این صورت که انباشت لایه نازک طلا بر هسته فرومغناطیس قبل از انباشت لایه جاذب راندمان جذب را تا ۳۲٪ افزایش می دهد و در شرایطی که از



شکل ۹. تصویر SEM لایه انباشت شده بر هسته فرومغناطیس نیکل- مس.

گزارش مقدار ناچیز نیکل در لایه انباشت شده مربوط به هسته فرومغناطیس می باشد که احتمالاً به دلیل تداخل لایه جاذب سنجش شده است.

همان طور که در شکل ۷ ملاحظه می شود، ضخامت لایه کربن حدود ۱۳۵ μm است. البته با توجه به این که مقطع ایجاد شده به صورت کاملاً صاف نبوده، می توان ادعا کرد که ضخامت لایه کمتر از مقدار گزارش شده و منطبق با مقدار گزارش شده در مراجع [۲۶، ۳] یعنی در حد ۱۰۰ μm می باشد.

بررسی خواص ساختاری لایه انباشت شده با استفاده از طیف رامان، بعد از اطمینان از عدم وجود قله در طیف مربوط به آلیاژ نیکل- مس به عنوان زیرلایه در محدوده مورد بررسی [۲۷]، انجام شد (شکل ۸).

از مقایسه شکل طیف رامان حاصل با طبقه بندی ساختاری صورت گرفته توسط فراری و روبرتسون^۸ (شکل ۸) [۲۸، ۲۹] و همچنین مقادیر عدد موج پیک G که مربوط به پیوندهای sp^2 در ساختار گرافیت می باشد و نسبت شدت باند D (مربوط به عیوب بین صفحه های در ساختار گرافیت و حضور حلقه های شش ضلعی در فازهای گرافیتی بی نظم) به باند G (I_D/I_G) در لایه انباشت شده، به نظر می رسد که ساختار انباشت شده بسته به اندازه صفحات گرافیتی در ساختار، گرافیت میکروکریستالی می باشد. همان طور که در شکل ۸ ملاحظه می شود پیک G لایه انباشت شده در عدد موج 1595 cm^{-1} دارای یک قله است که در مرحله اول تحول ساختاری کربن از گرافیت به گرافیت نانوکریستالی قابل رؤیت می باشد [۲۹]. همچنین نسبت I_D/I_G لایه انباشت شده با استفاده از تفکیک دو قله به روش گوسین و با استفاده از نرم افزار origin، ۱/۵ می باشد که تأییدکننده انباشت بستر گرافیتی حاوی صفحات گرافیت میکرو و نانوکریستالی می باشد [۲۹].



استخراج‌کننده به اندازه‌ای باشد که نتوان آن را در یک مرحله انجام داد لازم است از فرایندی متشکل از چند مرحله استفاده نمود [۳۰]. در حقیقت، استخراج جامد-مایع چندمرحله‌ای فرایندی است که در آن مراحل استخراج به منظور افزایش راندمان استخراج تکرار می‌شود. به عبارت دیگر، استخراج مایع-جامد چندمرحله‌ای به افزایش غلظت‌گونه جذب‌شونده در فاز جامد منتهی می‌شود [۳۰].

۴. نتیجه‌گیری

ساخت هسته فرومغناطیس نیکل-مس با ترکیب وزنی ۷۰/۴٪ نیکل و ۲۹/۶٪ مس، قطر $500 \mu\text{m}$ و طول $3/2 \text{ mm}$ انجام شد. لایه جاذب از نظر ساختاری گرافیت میکروکریستالی، متشکل از کربن فعال حاوی نقره و پلی‌استایرن به عنوان چسب با نسبت وزنی ۷۰ به ۳۰ می‌باشد. در شرایطی که لایه جاذب بر هسته فرومغناطیس پوشش داده شده با لایه نازک نقره کندوپاش شده انباشت می‌شود، شرایط برای برهم‌کنش بالاتر ۱۲۵- و لایه جاذب فراهم می‌شود. به این صورت که، لایه جاذب کربن فعال حاوی نقره به عنوان یک عامل پیش‌تغلیظ‌کننده ۱۲۵- در مجاورت لایه نقره کندوپاش شده عمل می‌کند. با توجه به جذب ۱۲۵- در لایه جاذب به صورت فیزیکی و شیمیایی به ترتیب به واسطه تخلخل کربن فعال و حضور نقره در ساختار، غلظت رادیونوکلوئید ۱۲۵- در مجاورت لایه جاذب نقره کندوپاش شده افزایش می‌یابد و بدین ترتیب امکان برهم‌کنش ید با نقره به دلیل افزایش سطح تماس برهم‌کنش، افزایش می‌یابد و همین امر منجر به افزایش راندمان جذب می‌شود.

به منظور افزایش اکتیویته هسته مورد استفاده در چشمه ترمویراکی‌تراپی از روش استخراج مرحله به مرحله استفاده می‌شود.

لایه نازک نقره کندوپاش شده قبل از انباشت لایه جاذب کربن فعال حاوی نقره استفاده می‌شود، راندمان جذب تا ۶۰/۲۳٪ پس از ۲ ساعت غوطه‌وری افزایش می‌یابد. به طور کلی جذب فیزیکی ۱۲۵- به دلیل تخلخل بالای کربن فعال انجام می‌شود [۱۷]، حال با توجه به برهم‌کنش شیمیایی بالای ید با نقره و حضور در لایه جاذب به صورت دوپ شده، شرایط برای برهم‌کنش شیمیایی ید با نقره دوپ شده فراهم می‌شود و بازده جذب افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، لایه جاذب به عنوان یک عامل پیش‌تغلیظ‌کننده ۱۲۵- در مجاورت لایه نقره و یا طلا کندوپاش شده عمل می‌کند. به این صورت که با توجه به جذب ۱۲۵- در لایه جاذب به صورت فیزیکی و شیمیایی به ترتیب به واسطه تخلخل کربن فعال و حضور نقره در ساختار، غلظت رادیونوکلوئید ۱۲۵- در مجاورت لایه جاذب نقره و یا طلا کندوپاش شده افزایش می‌یابد و بدین ترتیب امکان برهم‌کنش ید با نقره و طلا به دلیل افزایش سطح تماس برهم‌کنش، افزایش می‌یابد و همین امر منجر به افزایش راندمان جذب می‌شود. حال با توجه به این که برهم‌کنش نقره و ید در مقایسه با طلا به عنوان یک فلز نجیب با ید بیشتر است، راندمان بالاتر جذب ید در شرایطی که از پوشش نقره کندوپاش شده بر هسته فرومغناطیس استفاده شده است نسبت به پوشش طلا کندوپاش شده، حاصل می‌شود.

بسته به میزان اکتیویته مورد نیاز در هر دانه ترمویراکی‌تراپی، میزان جذب ۱۲۵- با استفاده از فرایند استخراج چندمرحله‌ای^۱ افزایش می‌یابد. به این صورت که هسته فرومغناطیس پوشش داده شده با لایه جاذب بعد از هر بار انجام فرایند استخراج ۱۲۵- از محلول به هسته، تحت تابش لامپ IR خشک می‌شود و فرایند استخراج (جذب ۱۲۵- توسط هسته پوشش داده شده) با قرارگیری مجدد هسته رادیواکتیو در محلول ۱۲۵- با اکتیویته ویژه بالا دوباره انجام می‌شود. بعد از اطمینان از جذب اکتیویته مورد نظر در لایه جاذب، نمونه‌ها در کپسول تیتانیومی کپسوله می‌شوند.

به‌طور کلی، استخراج مایع-جامد به عنوان فرایندی که در آن دو فاز در مجاورت یکدیگر قرار گرفته و در اثر انتقال جرم به سمت حالت تعادل با هم پیش می‌رود، تعریف می‌شود. در فرایند تک مرحله‌ای در صورتی که تماس بین دو فاز به اندازه‌ای زیاد باشد که هنگام خروج از مرحله، حالت تعادل بین دو فاز برقرار گردد مرحله ایدئال نامیده می‌شود. چنانچه در فرایند استخراج میزان تغییر غلظت جزء موردنظر در فاز

1. Multistage Extraction



مراجع

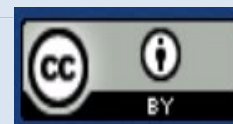
- Meigooni A.S, Yoe-Sein M.M, Al-Otoom A.Y, Sowards K.T. Determination of the dosimetric characteristics of InterSource¹²⁵ iodine brachytherapy source. *Applied Radiation and Isotopes*. 2002;56(4):589-99.
- Parsai E, Gautam B, Shvydka D. Evaluation of a novel thermobrachytherapy seed for concurrent administration of brachytherapy and magnetically mediated hyperthermia in treatment of solid tumors. *Journal of Biomedical Physics and Engineering*. 2011;1(1).
- Warrell G, Shvydka D, Parsai E.I. Use of novel thermobrachytherapy seeds for realistic prostate seed implant treatments. *Medical physics*. 2016;43(11):6033-48.
- Shvydka D, Gautam B, Parsai E, Feldmeier J.J.M.P. SU-FF-T-39: Investigating thermal properties of a thermobrachytherapy radioactive seed for concurrent brachytherapy and hyperthermia treatments: design considerations. *Medical Physics*. 2009;36(6Part9):2528.
- Kuznetsov A.A, Shlyakhtin O.A, Brusentsov N.A, Kuznetsov O.A. Smart mediators for self-controlled inductive heating. *Eur. Cells Mater*. 2002;3(2):75-77.
- Sapozink M.D, Palos B, Goffinet D.R, Hahn G.M. Combined continuous ultra low dose rate irradiation and radiofrequency hyperthermia in the C3H mouse. *International Journal of Radiation*. 1983;9(9):1357-65.
- Mieler W.F, Jaffe G.J, Steeves R.A. Ferromagnetic hyperthermia and iodine 125 brachytherapy in the treatment of choroidal melanoma in a rabbit model. *Archives of Ophthalmology*. 1989;107(10):1524-8.
- Steeves R, Murray T, Moros E, Boldt H, Mieler W, Paliwal B. Concurrent ferromagnetic hyperthermia and 125I brachytherapy in a rabbit choroidal melanoma model. *International journal of hyperthermia*. 1992;8(4):443-9.
- Niedbala M, McNamee J.P, Raaphorst G.P. Response to pulsed dose rate and low dose rate irradiation with and without mild hyperthermia using human breast carcinoma cell lines. *International journal of hyperthermia*. 2006;22(1):61-75.
- Chicheł A, Skowronek J, Kanikowski M. Thermal boost combined with interstitial brachytherapy in breast conserving therapy—Assessment of early toxicity. *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy*. 2011;16(3):87-94.
- Moradi S, Mokhtari-Dizaji M, Ghassemi F, Sheibani S, Asadi Amoli F. Increasing the efficiency of the retinoblastoma brachytherapy protocol with ultrasonic hyperthermia and gold nanoparticles: a rabbit model. *International Journal of Radiation Biology*. 2020;96(12):1614-27.
- Gautam B, Parsai E.I, Shvydka D, Feldmeier J, Subramanian M. Dosimetric and thermal properties of a newly developed thermobrachytherapy seed with ferromagnetic core for treatment of solid tumors. *Medical physics*. 2012;39(4):1980-90.
- Stathakis S. The physics of radiation therapy. *Medical Physics*. 2010;37(3):1374-5.
- Solimanian A, Alipoor A, Ghafoori M. Standard Calibration of ¹³⁷Cs Sources Used in Brachytherapy. *Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology*. 2005;25(2):53-56 [In Persian].
- Liu B-L, Cheng J-X, Zhang X, Zhang W. Controversies concerning the application of brachytherapy in central nervous system tumors. *Journal of cancer research and clinical oncology*. 2010;136:173-85.
- Vahabi S.M, Shamsaie Zafarghandi M. Dose estimation of prostate and near organs during brachytherapy and the effect of scattering on it using MCNP4C. *Journal of Radiation Safety and Measurement*. 2015;4(4):1-8 [In Persian].
- Suthanthiran K, Lakshman R. Pellet for a radioactive seed. *Google Patents*. 1992.
- Biganeh A, Kakuee O, Akbari Z, Azizi M, Elahi M, Sheibani S, Vosoughi Y. Absolute Activity Measurement of ¹²⁵I Seed Brachytherapy by Two-dimensional Photon-photon Coincidence Spectroscopy. *Journal of Nuclear Research and Applications*. 2024;4(2):34-44.
- Gautam B.R. Study of dosimetric and thermal properties of a newly developed thermo-brachytherapy seed for treatment of solid tumors. *The University of Toledo*. 2013.
- Farzin L, Sadjadi S, Sheini A, Mohaghehpour E. A nanoscale genosensor for early detection of COVID-19 by voltammetric determination of RNA-dependent RNA polymerase (RdRP) sequence of SARS-CoV-2 virus. *Microchimica Acta*. 2021;188:1-12.
- Mohaghehpour E, Rajabi M, Gholamipour R, Larijani M, Sheibani S. Correlation study of structural, optical and electrical properties of amorphous carbon thin films prepared by ion beam sputtering deposition technique. *Applied Surface Science*. 2016;360:52-8.
- Mohaghehpour E, Larijani M, Rajabi M, Gholamipour R. Effect of Silver Clusters Deposition on Wettability and Optical Properties of Diamond-like Carbon Films. *International Journal of Engineering, Transactions C: Aspects*. 2021;34(3):706-13.
- Mohaghehpour E, Rajabi M, Gholamipour R, Larijani M.M, Sheibani S. Ion beam energy dependence of surface and structural properties of amorphous carbon films deposited by IBSD method on Ni-Cu alloy. *Journal of Materials Research*. 2017;32(7):1258-66.
- Mohaghehpour E, Gholamipour R, Rajabi M, Sheibani S, Mojtahedzadeh Larijani M. Effect of thermal treatment on structure and Curie temperature of Ni-Cu (70.4-29.6; W/W) ferromagnetic alloy. *Metallurgical Engineering*. 2018;21(2):88-94.



25. Shaghaghi B, Shirvani-Arani S, Dehghan I, Miremad S.M, Motmaen Esfahani Sh, Tabasi M, Bahrami-Samani A, Ghannadi Maragheh M. Synthesis of iodine-sorbent with applicability in decontamination of the gaseous phase of the dissolution stage of Fission-Molly production. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2023;44(3):78-85 [In Persian].
26. Sowards K.T, Meigooni A.S. A Monte Carlo evaluation of the dosimetric characteristics of the EchoSeed™ Model 6733 125I brachytherapy source. *Brachytherapy*. 2002;1(4):227-32.
27. Mohagheghpour E, Gholamipour R, Rajabi M, Mojtahedzadeh Larijani M. Study of Structural Evolution of Amorphous Carbon Films on Ni-Cu Alloy and its Correlation With Deposition Temperature and Ion Beam Energy. *Journal of a Advanced Materials in Engineering*. 2021;40(3):29-42.
28. Ferrari A.C, Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical review B*. 2000;61(20):14095.
29. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon. *Materials science and engineering: R: Reports*. 2002;37(4-6):129-281.
30. Tahara K, Abe Y, Sugata S, Nishizawa H, Nishikawa T, Suzuki H, Takeuchi M. Improved apparatus for solid-liquid multi-stage counter-current extraction. *Journal of Chromatography A*. 2003;1017(1-2):63-9.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

**استناد به این مقاله**

محقق‌پور، الهام، شیبانی، شهاب، فرزین، لیلا، صابر، رضا. (۱۴۰۴)، انباشت و مشخصه‌یابی لایه جاذب ید-۱۲۵ بر هسته فرومغناطیس مورد استفاده در سیستم ترموبراکی‌تراپی. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۱۲(۲)، ۳۰-۳۸. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1584.2025> .Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1668.html

