Sadra Medical Sciences Journal

https://smsj.sums.ac.ir/

Review Article

Ionizing Radiations in the Management of COVID-19 Infection: A Narrative Review

Farshid Gheisari[1, 2], MD; Mehdi Shariat[3*], MD; Mohammad Kamali[4], MD; Mohammad Reza Daneshmandi[4], MD; Mohammad Atefi[1], PhD Candidate; Amirsalar Motamedi[4], MD

[1]Ionizing and Non-Ionizing Radiation Protection Research Center (INIRPRC), School of Paramedical Sciences, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran
[2]Department of Nuclear Medicine, School of Medicine, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran
[3]Department of Radiation Oncology, School of Medicine, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran
[4]School of Medicine, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran

Article Information

Article History:
Received: March 27, 2025
Accepted: August 02, 2025

***Corresponding Author:**
Mehdi Shariat, MD;
Department of Radiation Oncology, School of Medicine, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran
Email: mahdyshr@gmail.com

Abstract

The COVID-19 pandemic has underscored the need for advanced diagnostic and therapeutic modalities in the management of this infection. Ionizing radiation has long been leveraged in medicine for essential purposes, including the diagnosis and treatment of malignancies and infections. Nuclear medicine exploits these radiations in imaging techniques such as positron emission tomography (PET) and single-photon emission computed tomography (SPECT), which provide valuable insights for diagnosis, follow-up, and understanding the pathogenesis of COVID-19 infection. Furthermore, computed tomography (CT), which utilizes X-ray radiation, plays an important role in diagnosing COVID-19 respiratory infection. Targeted radionuclide therapies—such as those employing Auger electron emitters and alpha particles—have been investigated as potential therapeutic tools against SARS-CoV-2. Additionally, gamma and X-rays are deployed in the sterilization of medical equipment and the production of SARS-CoV-2 vaccines. This narrative review aimed to briefly examine the applications of ionizing radiations in the management of COVID-19 infection, with an emphasis on recent developments. While further research is required for clinical implementation, ionizing radiation offers considerable current and potential applications in the battle against COVID-19.

Keywords: Radiation, Ionizing; Nuclear Medicine; Positron-Emission Tomography; Tomography, Emission-Computed, Single-Photon; COVID-19

Please cite this article as:
Gheisari F, Shariat M, Kamali M, Daneshmandi MR, Atefi M, Motamedi AS. Ionizing Radiations in the Management of COVID-19 Infection: A Narrative Review. Sadra Med. Sci. J. 2026; 14(2): doi: 10.30476/smsj.2026.106471.1619.

Copyright: ©Sadra Medical Sciences Journal. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International License. This license allows reusers to copy and distribute the material in any medium or format in unadapted form only, and only so long as attribution is given to the creator. The license allows for commercial use.

دوره ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵،

مجله علوم پزشکی صدرا

https://smsj.sums.ac.ir/

مقاله مروری

پرتوهای یونیزان در مدیریت عفونت کووید-۱۹: مطالعه مروری روایتی

فرشید قیصری[۱،۲]، مهدی شریعت[۳*]، محمد کمالی[۴]، محمدرضا دانشمندی[۴]، محمد عاطفی[۱]، امیرسالار معتمدی[۴]

[۱]مرکز تحقیقات حفاظت در برابر پرتوهای یونساز و غیر یونساز، دانشکده پیراپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران
[۲]بخش پزشکی هسته ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران
[۳]بخش رادیوآنکولوژی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران
[۴]دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱

***نویسنده مسئول:**
مهدی شریعت،
بخش رادیوآنکولوژی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران
پست الکترونیکی: mahdyshr@gmail.com

چکیده

پندمی کووید-۱۹ [۱] نیاز به روش‌های پیشرفته تشخیصی و درمانی این عفونت را نمایان ساخته است. پرتوهای یونیزان امروزه کاربردهای تشخیصی و درمانی در دانش پزشکی دارند. پزشکی هسته‌ای با استفاده از این پرتوها در روش‌های تصویربرداری مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون[۲] و مقطع‌نگاری رایانه‌ای تک فوتونی[۳]، اطلاعات مهمی را برای تشخیص و پایش عفونت کووید-۱۹ و همچنین پاتوژنز آن ارائه می‌دهد. همچنین مقطع‌نگاری رایانه‌ای[۴] با استفاده از اشعه یونیزان ایکس[۵]، در تشخیص ابتلا به عفونت تنفسی کووید-۱۹ نقش مهمی دارد. درمان‌های رادیونوکلئیدی هدفمند [۶] مانند ساطع کنندگان الکترون اوژه[۷] و ذرات آلفا[۸] به عنوان ابزارهای بالقوه درمانی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پرتوهای یونیزان مانند اشعه ایکس و گاما [۹] در استریلیزاسیون تجهیزات پزشکی و تولید واکسن‌های کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ [۱۰] با استفاده از پرتوهای یونیزان نقش دارند. این مرور روایتی مختصرا به بررسی کاربرد پرتوهای یونیزان در مدیریت بیماری کووید-۱۹ می‌پردازد. در مجموع، تابش یونیزان در مقابله با کووید-۱۹ دارای کاربردهای بالفعل و بالقوه قابل توجهی است، اما نیاز به تحقیقات بیشتر برای استفاده بالینی از آن‌ها وجود دارد.

کلمات کلیدی: پرتوهای یون‌ساز؛ پزشکی هسته‌ای؛ توموگرافی گسیل پوزیترون؛ توموگرافی گسیل تک‌فوتونی رایانه‌ای؛ کووید-۱۹

1. COVID-19
2. Positron emission tomography (PET)
3. Single-photon emission computed tomography (SPECT)
4. Computed tomography (CT)
5. X
6. Targeted radionuclide therapy (TRT)
7. Auger
8. α
9. γ
10. Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2)

لطفاً این مقاله را به این صورت استناد کنید:
قیصری ف، شریعت م، کمالی م، دانشمندی مر، عاطفی م، معتمدی اس. پرتوهای یونیزان در مدیریت عفونت کووید۱۹-: مطالعه مروری روایتی. مجله علوم پزشکی صدرا. دوره ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵،

Copyright: ©Sadra Medical Sciences Journal. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International License. This license allows reusers to copy and distribute the material in any medium or format in unadapted form only, and only so long as attribution is given to the creator. The license allows for commercial use.

مقدمه

پرتو یونیزان به تابش هسته‌ای (ذرات زیراتمی یا امواج الکترومغناطیسی) اطلاق می‌شود که به دلیل برخورداری از انرژی کافی، می‌توانند اتم‌ها یا مولکول‌ها را یونیزه کنند. یک دسته شامل پرتوهای گاما [1] و ایکس [2] از طیف الکترومغناطیسی است. دسته دیگر، ذرات زیراتمی هستند که باعث یونیزاسیون می‌شوند: ذرات آلفا [3]، بتا [4] و نوترون‌ها. البته، ذرات ثانویه کیهانی مانند میون‌ها [5]، مزون‌ها [6] و پوزیترون‌ها [7]، زمانی تولید می‌شوند که پرتوهای کیهانی به جو زمین برخورد کنند. علاوه بر این، پرتوهای کیهانی می‌توانند روی زمین، رادیوایزوتوپ‌هایی مانند کربن-۱۴ تولید کنند که هنگام واپاشی، تابش یونیزان ساطع می‌کنند (۱).

کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ [8]، عامل بیماری کووید-۱۹ [9] است که سیستم‌های مراقبت بهداشتی سراسر جهان را بیش از آنچه تاکنون دیده یا تجربه شده بود، به چالش کشید. این ویروس برای اولین بار در اواخر سال ۲۰۱۹ در شهر ووهانِ چین شناسایی شد و به سرعت در سراسر جهان گسترش یافت. متاسفانه، این ویروس می‌تواند منجر به نارسایی حاد تنفسی [10] گردد (۲). متخصصان پزشکی، دانشمندان و پژوهشگران با فوریت بی‌سابقه‌ای گرد هم آمدند تا ابزارهای تشخیصی، درمان‌های دارویی و اقدامات پیشگیرانه‌ای را توسعه دهند تا به مهار ویروس و کاهش تاثیر آن بر سلامت عمومی کمک کند (۳).

پزشکی هسته‌ای از چندین روش تصویربرداری (مبتنی بر استفاده از پرتوهای یونیزان) استفاده می‌کند که اطلاعات مهمی را برای تشخیص بیماری، پاتوژنز آن و پاسخ آن به درمان، ارائه می‌دهند. این روش‌ها شامل تکنیک‌های تصویربرداری مولکولی مانند مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون [11] و مقطع‌نگاری رایانه‌ای تک فوتونی [12] می‌شوند (۴, ۵). پزشکی هسته‌ای همچنین با بهره گیری از درمان‌های رادیونوکلئیدی هدفمند [13] می‌تواند به مقابله با این بیماری بپردازد (۶).

این مرور روایتی، به صورت مختصر به بررسی کاربردهای پرتوهای یونیزان در مدیریت بیماری کووید-۱۹ با تمرکز بر روش‌های تصویربرداری، مداخلات درمانی و پیشگیری و همچنین پیشرفت‌های تحقیقاتی می‌پردازد. امید است که این نوشتار، به قرابت بیشتر پزشکان، مهندسان پزشکی، و فیزیکدانان هسته‌ای کمک کند.

مواد و روش‌ها

این مطالعه مروری روایتی، در سال ۱۴۰۳، با مروری بر متون علمی موجود در پایگاه‌های داده PUBMED، Web of Science، Scopus و Google Scholar انجام گردید. کلیدواژه‌های جستجو شده شامل موارد زیر بودند:

"Covid-19", "SARS-CoV-2", "severe acute respiratory syndrome coronavirus 2", "ionizing radiation", "Alpha particle", "Beta particle", "Gamma radiation", "X-ray", "Electron beam", "Nuclear medicine", "Positron emission tomography", "PET", "Single-photon emission computed tomography", "SPECT", "radiopharmaceutical", "molecular imaging", "theranostic"

مجموعا ۷۹ مقاله، در جستجوی اولیه یافته شدند که پس از کنار گذاشتن موارد تکراری و نامربوط، نهایتا ۳۹ مقاله در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند. تلاش بر این بود که از جدیدترین منابع استفاده گردد.

یافته ها

تصویربرداری‌های مبتنی بر پرتو یونیزان در عفونت کووید-۱۹

مقطع‌نگاری رایانه‌ای [14]

مقطع‌نگاری رایانه‌ای اساساً یک مطالعه رادیوگرافی است که در آن تابنده پرتوهای ایکس حول یک بخش مشخص از بدن چرخانده می‌شود و تصاویر مقطعی توسط رایانه ایجاد می‌گردند. تجارب پزشکی در زمان پندمی کووید-۱۹ نشان دادند که امکان تشخیص ذات‌الریه کووید-۱۹ با استفاده از مقطع‌نگاری رایانه‌ای قبل از مثبت شدن تست واکنش زنجیره‌ای پلیمراز

1. γ
2. X
3. α
4. β
5. Muon
6. Meson
7. Positron
8. Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2)
9. COVID-19
10. Acute respiratory failure
11. Positron emission tomography (PET)
12. Single-photon emission computed tomography (SPECT)
13. Targeted radionuclide therapy (TRT)
14. Computed tomography (CT)

رونویسی معکوس [15] وجود دارد. همچنین، در برخی مناطق اپیدمی، مقطع‌نگاری رایانه‌ای قفسه سینه حساسیت قابل مقایسه با تست واکنش زنجیره‌ای پلیمراز رونویسی معکوس در تشخیص کووید-۱۹ داشته است. با این حال، یافته‌های مقطع‌نگاری رایانه‌ای در بیماران مبتلا به کووید-۱۹ غیراختصاصی هستند و می‌توانند مشابه یافته‌های ناشی از بیماری‌های عفونی دیگر از جمله آنفولانزا باشند (۷).

اگر چه در شرایط بالینی روزمره، رادیوگرافی قفسه سینه (با استفاده از اشعه ایکس) ابزاری برای ارزیابی پارانشیم ریه محسوب می‌شود که می‌تواند سریع‌ترین، در دسترس‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین روش تصویربرداری را فراهم آورد، رادیوگرافی قفسه سینه می‌تواند در عفونت خفیف کووید-۱۹ یا در مراحل اولیه آن حساسیت پایینی داشته باشد، در نتیجه منجر به رادیوگرافی‌های منفی کاذب شود. بنابراین، رادیوگرافی قفسه سینه نباید به عنوان روش تصویربرداری خط اول در نظر گرفته شود (۷).

مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون

مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون با استفاده از رادیوداروهایی، مانند فلوئورودئوکسی‌گلوکز [16]، که با هدف قرار دادن سلول‌های التهابی (به دلیل دارا بودن متابولیسم زیاد گلوکز) آنها را نمایان می‌کنند (به واسطه تابش پرتو گاما)، روش حساسی برای تشخیص، پایش و بررسی پاسخ به درمان در کووید-۱۹ محسوب می‌گردد. از آن جا که بافت‌های ملتهبِ آلوده به کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲، محتوی تعداد زیادی سلول التهابی با متابولیسم بالای گلوکز هستند، مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون با فلوئورودئوکسی‌گلوکز در نمایش و کمّی‌سازی فعالیت‌های التهابی این اندام‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (۴, ۸). به صورت اختصاصی، می‌توان به کاربرد روش تلفیقی مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون/مقطع‌نگاری رایانه‌ای در تشخیص و تمایز آسیب حاد و مزمن میوکاردیال ناشی از ابتلا به کووید-۱۹ اشاره کرد. بایستی در نظر داشت که دلیل استفاده از تلفیق دو روش تصویربرداری مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون و مقطع‌نگاری رایانه‌ای ، تفاوت اطلاعاتی است که هر یک به تنهایی می‌توانند ارائه کنند و تلفیق آنها با هم، باعث تکمیل هر یک به وسیله دیگری می‌شود: در حقیقت، مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون از عملکرد متابولیسمی ارگان مربوطه اطلاعات فراهم می‌کند و مقطع‌نگاری رایانه‌ای راجع به آن ارگان اطلاعات آناتومیک به دست می‌دهد. پس تلفیق این دو روش به دریافت اطلاعات عملکردی-آناتومیک کمک می‌کند (۹).

15. Reverse transcription-polymerase chain reaction (RT-PCR)
16. ^{18}F-Fluorodeoxyglucose (FDG)

کاربردهای پژوهشی

از جمله موارد استفاده از مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون، پژوهش برای یافتن پاتوژنز کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ می‌باشد. پروتئین ترانس‌لوکیتور [17] یک پروتئین ترانس ممبران [18] است که در غشاء خارجی میتوکندری (عمدتا موجود در سلول‌های گلیال [19] مغزی) قرار دارد (۱۰). این پروتئین به مقدار فراوان در ماکروفاژهای افراد مبتلا به کووید-۱۹ (ابتلا با شدت متوسط) یافت می‌شود (۱۱). به نظر می‌رسد بتوان از مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون با هدف‌گیری پروتئین ترانس‌لوکیتور [20] (با استفاده از رادیوداروی فلوتریسیکلامید [21])، به عنوان یک ابزار ارزشمند در تشخیص و پایش درمان انسفالیت [22] ناشی از کووید-۱۹ استفاده کرد؛ اگرچه هنوز این روش تاییدیه علمی دریافت نکرده است (۱۲).

انجام مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون با فلوئورودئوکسی‌گلوکز بر بیماری که دچار از دست دادن حس بویایی [23] مزمن پس از کووید-۱۹ شده بود، نشان داد که متابولیسم نواحی مغزی شکنج راست/بویایی [24] کاهش یافته است. بیمار دیگری که پس از کووید-۱۹ به سندرومی دردناک مبتلا شده بود، در مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون با فلوئورودئوکسی‌گلوکز، کاهش متابولیسم در نواحی هیپوکمپ، پاراهیپوکمپ، آمیگدال، کورتکس سینگولیت [25]، شکنج‌های پیش و پس مرکزی [26]، تالاموس، هیپوتالاموس، مخچه، پل مغزی و بصل النخاع را نشان می‌داد. مجموع این یافته‌ها مطرح کننده احتمال درگیر شدن مغز به عفونت با کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ از طریق پیاز بویایی بودند. با استفاده از همین روش، سایر اعضای احتمالی هدف ویروس، مانند لوزه‌ها، غدد بزاقی، لوله گوارشی، و رگ‌ها نیز بررسی شدند که شواهد حاکی از درگیری آن‌ها به التهاب بود (۱۳). مطالعه‌ای توسط

17. Translocator protein (TSPO)
18. Transmembrane
19. Glial
20. TSPO-PET
21. Flutriciclamide
22. Encephalitis
23. Anosmia
24. Olfactory/rectus gyrus
25. Cingulate cortex
26. Pre-/post-central gyrus

توپوز[27] و همکاران بر ۶۸ بیمار مبتلا به کووید-۱۹ (در زمان ابتلا و ۱ ماه پس از آن) انجام شد و نشانگر افزایش قابل ملاحظه برداشت فلوئورودئوکسی‌گلوکز توسط ماهیچه سواس[28] در بررسی مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون بود. این یافته از آن جهت حائز اهمیت است که غالب بیماران از خستگی[29] شکایت دارند (۱۴). بنابراین، مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون میتواند کمک شایانی به بررسی تروپیسم کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ کند.

از دیگر کاربردهای مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون، رهگیری زمانی-مکانی انتشار پاسخ ایمنی نسبت به واکسن کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ است. مثلا مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون با فلوئورودئوکسی گلوکز در دریافت کنندگان واکسن نشان داد که برداشت فلوئورودئوکسی‌گلوکز در گره‌های لنفاوی زیربغل طی دو هفته به حداکثر خود می‌رسد و تا شش هفته حالت افزایش یافته خود را حفظ میکند. البته بایستی در نظر داشت که همین پدیده می‌تواند تفسیر مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون در بیمار مبتلا به بدخیمی متاستاز دهنده به گره لنفاوی (مانند سرطان پستان) را پس از دریافت واکسن مختل کند (۱۵). با این حال، استفاده از مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون یا مقطع‌نگاری رایانه‌ای تک فوتونی جهت رهگیری اختصاصی کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ موجود در واکسن، تاکنون انجام نشده است.

مقطع‌نگاری رایانه‌ای تک فوتونی

می توان از اسکن تهویه-خون‌رسانی ریه[30] برای تشخیص آمبولی ریه و عدم تناسب تهویه ریه با خون‌رسانی آن[31] ثانویه به ابتلا به کووید-۱۹ سود برد. بدین منظور، از تصویربرداری تلفیقی مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون / مقطع‌نگاری رایانه‌ای برای بررسی تهویه-خونرسانی ریه استفاده می‌شود: آلبومین ماکرواگریگه‌ی نشاندار شده با تکنسیم-۹۹m[32] وریدی به عنوان تابنده اشعه گاما برای اسکن خونرسانی، و تنفس گاز کریپتون-۸۱m[33] یا تکنسیوم-۹۹m دی‌اتیلن‌تری‌آمین‌پنتااستیک اسید[34] یا تکنسیم-۹۹m کربن[35] به عنوان تابنده گاما برای اسکن تهویه ریه (۵, ۸). برای تشخیص آمبولی ریه، تصویربرداری تلفیقی مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون / مقطع‌نگاری رایانه‌ای برای بررسی تهویه-خونرسانی ریه دارای حساسیت ۹۷-۱۰۰٪، ویژگی ۹۴-۱۰۰٪ و دقت ۹۹٪ است (۱۶, ۱۷). مطالعات نشان داده اند که برای پیگیری عوارض باقی مانده از کووید-۱۹ بر عروق ریه، تصویربرداری تلفیقی مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون / مقطع‌نگاری رایانه‌ای برای بررسی تهویه-خونرسانی ریه ، نسبت به مقطع‌نگاری رایانه‌ای خون‌رسانی ریه به تنهایی ، در صورت دسترسی و وجود دانش کافی، روش معتبر تری است (۱۸). در حقیقت، تصویربرداری تلفیقی مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون / مقطع‌نگاری رایانه‌ای برای بررسی تهویه-خونرسانی ریه نیز با تلفیق اطلاعات عملکردی دریافت شده از مقطع‌نگاری رایانه‌ای تک فوتونی با اطلاعات آناتومیک حاصله از مقطع‌نگاری رایانه‌ای ، به اهداف تشخیصی کمک می‌کند (۱۹).

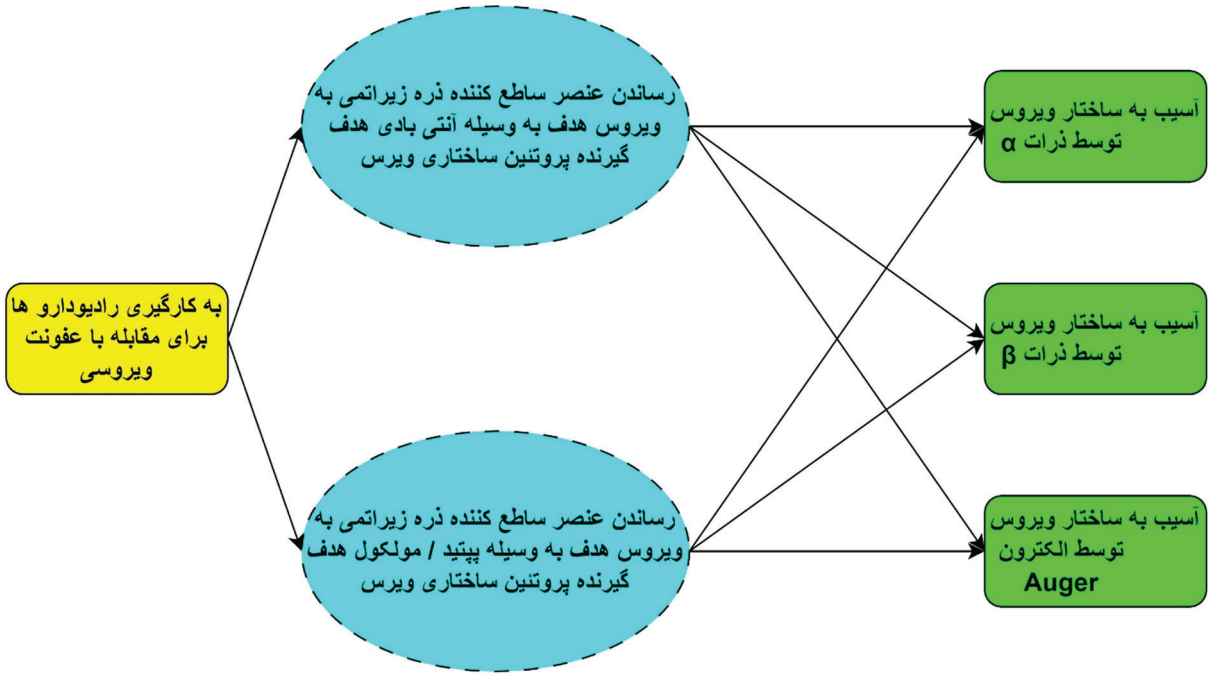
کاربردهای پژوهشی

در مواردی از بیماران مشکوک به پارکینسونیسم متعاقب کووید-۱۹، با انجام مقطع‌نگاری رایانه‌ای تک فوتونی به وسیله یوفلوپان ید-۱۲۳[36] (برای بررسی انتقال دهنده دوپامین) و مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون با دوپا فلوئور-۱۸[37] (برای بررسی تولید و ذخیره دوپامین)، نقص در سیستم دوپامینرژیک نیگروستریاتال[38] مشاهده گردید که با علائم بیماران مطابقت داشت. همچنین برخی از بیماران این مطالعه تحت مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون با فلوئورودئوکسی‌گلوکز قرار گرفتند که یافته‌های آن با انسفالیت خودایمنی متعاقب عفونت[39] همخوانی داشت. استفاده از مقطع‌نگاری رایانه‌ای تک فوتونی و مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون جهت بررسی آسیب مغز متعاقب کووید-۱۹ توسط این مطالعات پیشنهاد گردیده‌اند (۲۰).

پیشگیری و درمان کووید-۱۹ با استفاده از پرتوهای یونیزان

شاید بتوان مکانیسم‌های مقابله با عفونت‌های ویروسی توسط رادیوداروها را به صورت کلی در گروه‌های زیر تقسیم‌بندی کرد (شکل ۱) (۸):

27. Topuz
28. Psoas
29. Fatigue
30. Ventilation-perfusion (VQ) scintigraphy
31. Ventilation-perfusion mismatch
32. (Technetium) Tc-99m-labeled Macroaggregated Albumin
33. Krypton-81m
34. Technetium-99m-diethylene triamine penta-acetic acid
35. Tc-99m-Carbon
36. Ioflupane Iodine-123
37. ^{18}F-FDOPA
38. Nigrostriatal
39. Postinfectious immune-mediated encephalitis



شکل ۱. طرق مقابله با عفونت ویروسی با به کارگیری رادیوداروها

ساطع کننده‌های الکترون اوژه

ساطع کننده‌های الکترون اوژه [۴۰] ابزارهایی در رادیونوکلئید درمانی هدفمند هستند که می‌توانند بدون آسیب به بافت‌های سالم، به طور ویژه سلول‌های هدف را پرتودهی کنند. با این حال، به دلیل برد کوتاه آنها، این مواد باید به اهداف حساس، به ویژه دی‌اِن‌ای [۴۱] هسته‌ای و تا حد کمتری غشای سلولی، نزدیک شوند (۲۱). با توجه به اندازه کوچک ویریون‌های کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ و در نظر گرفتن هدفِ به حداقل رساندن آسیب به سلول‌های میزبان، مناسب ترین تابنده‌های رادیواکتیو برای مقابله با این ویروس، ساطع کننده‌های الکترون اوژه هستند. در یک مطالعه، آنتی‌بادی مونوکلونال غیرخنثی‌کننده‌ی CR3022، که به پروتئین S کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ متصل می‌شود (اما با چندین ویروس کرونا واکنش متقاطع دارد)، با ید-۱۳۱ (ساطع کننده الکترون اوژه) نشان‌دار شد. اما برای تایید این دارو جهت استفاده درمانی، به تحقیقات بیشتر نیاز است؛ در حقیقت، در این پژوهش صرفا ساخت آنتی‌بادی متصل به عنصر ساطع کننده الکترون اوژه و توانایی آن در اتصال به پروتئین S بررسی گردید، اما توانایی آن در از بین بردن کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ بررسی نشد. البته این روش می‌تواند به چالش افزایش عفونت‌زایی ویروس به واسطه آنتی‌بادی [۴۲] منجر گردد (۸). این پدیده باعث افزایش عفونت‌زایی ویروس می‌گردد و تا حدی به آنتی‌بادی‌های غیرخنثی‌کننده یا آنتی‌بادی‌ها در سطوح زیر خنثی کننده نسبت داده می‌شود. این آنتی‌بادی‌ها به رسوب کمپلکس‌های آنتی‌ژن-آنتی‌بادی و انتشار یک فرآیند التهابی مزمن منجر می‌شوند که بافت‌های آسیب‌دیده را تخریب می‌کند. علاوه بر این، کمپلکس‌های آنتی‌ژن-آنتی‌بادی ممکن است از طریق گیرنده Fcγ [۴۳] باعث افزایش ورود ویروس به داخل سلول‌ها شوند و منجر به تکثیر بیشتر ویروس گردند (۲۲).

ساطع کننده‌های آلفا

ذره آلفا، یک هسته اتم هلیوم است: متشکل از ۲ پروتون و ۲ نوترون. این ذره می‌تواند مسیری کوتاه، معمولاً کمتر از ۱۰۰ میکرومتر، را بپیماید. مطالعات نشان داده‌اند که عبور چند ذره آلفا از هسته سلول برای مرگ آن کافی است، در حالی که بیش از ۱۰۰۰۰ ذره بتا برای دستیابی به همان اثر بیولوژیکی مورد نیاز است. برد کوتاه و توانایی سیتوتوکسیک بالا به ذره آلفا این توانایی را می‌دهند که ضمن آسیب‌زایی جانبی کم، سلول هدف را از بین ببرد (۲۳). درمان هدفمند با ذرات آلفا [۴۴] به روشی اطلاق می‌شود که طی آن رادیونوکلئیدهای ساطع کننده‌ی ذرات آلفا به سلول هدف رسانده میشوند، و با اعمال آسیب خود بر آن سلول به وسیله ساطع کردن ذرات آلفا، باعث مرگ آن می‌شوند. در یک مورد، پژوهشگران یک

40. Auger electron emitters (AEE)
41. Deoxyribonucleic acid (DNA)
42. Antibody dependent enhancement (ADE)
43. Fcγ receptor
44. Targeted alpha therapy (TAT)

رادیوایمونوکانژوگه [45] جدید را برای درمان هدفمند با ذرات آلفا علیه عفونت کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ ساخته اند. این رادیوایمونوکانژوگه بر پایه یک آنتی‌بادی است که به دامنه اتصال به گیرنده [46] موجود در پروتئین اسپایک کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ متصل می‌شود. خود آنتی‌بادی از اتصال ناحیه مذکور به گیرنده آنزیم مبدل آنژیوتانسین ۲ [47] سلول هدف جلوگیری می‌کند. همچنین، این آنتی‌بادی با اَکتینیوم-۲۲۵ [48] (ساطع کننده ذرات آلفا)، نشان‌دار شده است. مطالعات برون‌تنی [49] نشان داد که این رادیودارو باعث سمیت سلولی در سلول‌های شبیه سازی کننده عفونت کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ می‌شود (این سلول‌ها به عنوان مخازن ویروسی عمل می‌کنند). با در نظر گرفتن توانایی ذرات آلفا در غیرفعال‌سازی کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲، مجموعاً این نتایج نشان می‌دهد که ساختار رادیوایمونوکانژوگه پیشنهادی می‌تواند یک عامل درمانی بالقوه برای درمان هدفمند با ذرات آلفا علیه عفونت کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ باشد (۲۴, ۲۵). البته، استفاده بالینی از این دارو نیازمند تحقیقات بیشتر است. اَکتینیوم-۲۲۵ یک ساطع کننده آلفا است که نیمه عمر آن حدودا ۱۰ روز است و ضمن فروپاشی هسته‌ای، ۴ ذره آلفا با انرژی 5.83-8.38 مگا الکترون ولت و ۲ ذره بتا از خود ساطع می‌کند (۲۳).

ساطع کننده‌های نوترون

تابش نوترون نیز در ظاهر می‌تواند کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ را غیرفعال کند، چنان که برای غیرفعال کردن ویروس‌ها، تابش نوترون ده برابر موثرتر از تابش گاما است; هر چند تاکنون، اثر غیرفعال کنندگی آن بر کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲، به صورت مستقیم بررسی نشده است (فقط شبیه سازی شده است) (۲۶).

ساطع کننده‌های الکترون

ساطع کردن ذرات الکترونی[50]، یک روش استریلیزاسیون است که از الکترون‌های پرانرژی برای استریل کردن یک جسم استفاده می‌کند. از منظر استریلیزاسیون، این یک روش پرتودهی است و گاهی

45. Radioimmunoconjugate
46. Receptor binding domain 2 (RBD2)
47. Angiotensin-converting enzyme 2
48. ^{225}Actinium
49 In-vitro
50. Electron beam

اوقات به عنوان تابش الکترونی [51] توصیف می‌شود. بنابراین، این فرآیند مشابه استریلیزاسیون با اشعه ایکس و پرتو گاما است، با توجه به این که هردو، ماده‌ای را که به آن برخورد می‌کنند (به وسیله جدا کردن الکترون‌ها از اتم‌های سطح جسم) یونیزه می‌کنند. این روش به طور کلی برای تجهیزات پزشکی و مواد مصرفی مورد استفاده در فرآیندهای استریل به کار می‌رود. تجهیزاتی مانند پانسمان‌های جراحی، محصولات مراقبت از زخم، دستگاه‌های الکتروکوتر، کیت‌های تزریق داخل وریدی، دیالیزرها، حلقه‌های اندوسکوپی، کاتترهای قلبی و استنت‌ها به طور معمول توسط الکترون‌ها استریل می‌شوند. این روش همچنین توسط صنایع غذایی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۷). خوشبختانه کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ نسبت به تابش الکترونی حساس است و میتوان از آن در استریل کردن تجهیزات آلوده به کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ سود برد (۲۸).

پرتوهای ایکس و گاما

اشعه‌های گاما و ایکس، تابش‌های الکترومغناطیسی هستند. تفاوت آن ها، به منشأ آنها بستگی دارد و نه به انرژی آنها. هر تابش الکترومغناطیسی که از هسته اتم ساطع می‌شود، اشعه گاما نامیده می‌شود. اما، اگر تابش از مدارهای الکترونی اتم منشأ بگیرد، اشعه ایکس نامیده می‌شود (۲۹). اگرچه تابش اشعه گاما با دوز مناسب، یک عامل قدرتمند در غیر فعالسازی ویروس هاست (۳۰)، اما با احتساب ویژگی‌های مناسب یک رادیونوکلئید، مانند نیمه‌عمر مناسب (بین ۶ ساعت تا ۱۰ روز) و نرخ بالای آزادسازی انرژی در واحد فاصله پیموده شده [52]، پرتوهای گاما برای رادیونوکلئید درمانی هدفمند مناسب نیستند (۳۱) و تا کنون برای درمان عفونت کووید-۱۹، چه از طریق تابش از منبع خارجی و چه از طریق رادیونوکلئید درمانی هدفمند، استفاده نشده‌اند .خوشبختانه، اشعه ایکس از جمله عواملی است که برای استریلیزاسیون تجهیزات استفاده می‌گردد و توانایی غیرفعال کردن ویروس‌های ریبونوکلئیک اسید [53]، مانند کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲، را دارد. استریلیزاسیون با اشعه ایکس، در دقت و ایمنی، از روش‌های اشعه گاما پیشی می‌گیرد، در حالی که اثربخشی غیرفعال‌سازی میکروبی را نیز برآورده می‌سازد. برخلاف منابع گاما، اشعه ایکس پرتوهای جهت‌دار و قابل کنترل را فراهم می‌کند،

51. Electron irradiation
52. Linear energy transfer
53. Ribonucleic acid

که آسیب به مواد را به حداقل می‌رساند. استفاده از اشعه ایکس خطرات امنیتی استفاده از گاما، مانند ذخیره‌سازی و حمل و نقل مواد رادیواکتیو، را ندارد و فقط در طول عملیات تابش اشعه ایکس، به محافظت نیاز است. این روش، دوزهای استریلیزاسیون را سریع‌تر و با نفوذپذیری قابل توجه در مواد متراکم (ایده آل برای محصولات حساس به حرارت) ارائه می‌کند. اگرچه گاما برای استریلیزاسیون حجیم همچنان قابل استفاده است، اشعه ایکس در کاربردهایی که دقت زیاد، زمان‌های تابش کوتاه و نظارتی ساده را در اولویت قرار می‌دهند، برتری دارد و جایگزینی ایمن‌تر و سازگارتر، بدون بار مدیریتی رادیواکتیو ارائه می‌دهد (۳۲, ۳۳).

پرتو درمانی با دوز پایین [54] که به توانایی در القای پاسخ‌های ضد التهابی معروف است، از لحاظ تاریخی برای درمان بیماری‌های عفونی مانند ذات‌الریه (کاهش نرخ مرگ و میر در مبتلایان به ذات‌الریه ویروسی و باکتریال) استفاده شده است و در زمان شیوع کووید-۱۹ در سراسر جهان توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرد. در عفونت کووید-۱۹، این روش درمانی با هدف کاهش التهاب، تعدیل پاسخ ایمنی و کنترل طوفان سیتوکینی استفاده می‌شود. پرتو درمانی با دوز پایین با تأثیر بر لکوسیت‌ها، سلول‌های اندوتلیال و فیبروبلاست‌ها، و همچنین تولید سیتوکین‌ها و کموکین‌ها، التهاب را تنظیم می‌کند. پرتو درمانی با دوز پایین ممکن است پاسخ‌های ایمنی ضد ویروسی را با افزایش فعالیت وابسته به سلول‌های کشنده طبیعی [55] و لنفوسیت‌های $CD8^+$ T و همچنین تولید اینترفرون گاما تقویت کند (۳۴, ۳۵). پرتو درمانی با دوز پایین برای کووید-۱۹ یک رویکرد درمانی تجربی است که شامل اعمال یک دوز منفرد از پرتوهای یونیزان با دوز پایین – معمولاً بین ۰.۵ تا ۱.۵ گری [56] – به ریه‌های بیماران مبتلا به ذات‌الریه کووید-۱۹ می‌شود (به ویژه بیماران نیازمند به اکسیژن حمایتی). اثر ضدالتهابی پرتو درمانی با دوز پایین وابسته به دوز است؛ دوزهای بالاتر از ۱ گری ممکن است پاسخ‌های التهابی را تحریک کنند، در حالی که دوزهای حدود ۰.۵ تا ۱ گری تمایل به تعدیل پاسخ ایمنی دارند که در بیماری‌های التهابی ریه مفید است. در حقیقت، پرتو درمانی با دوز پایین در دوزهای پایین، مولکول‌های ضدالتهابی مانند فاکتور رشد تغییردهنده بتا ۱ [57] و اینترلوکین-۱۰ را فعال می‌کند، سیتوکین‌های پیش‌التهابی مانند اینترلوکین-۶ و اینترفرون گاما را کاهش می‌دهد، و ممکن است استرس اکسیداتیو را که به ترومبوز در کووید-۱۹ منجر می‌شود، کاهش دهد (۳۶). از دیگر مزایای این روش درمانی، پیشگیری از ایجاد ترومبوز، تسریع جذب موکوس در آلوئول‌های ریه و سرکوب تکثیر ویروس‌ها در بافت ریه میباشد (۳۷). البته، استفاده بالینی از این روش، نیازمند پژوهش‌های بیشتر برای تایید اثربخشی این روش، یافتن دوز مناسب اشعه و همچنین تعیین مشخصات دقیق برای انتخاب بیماران هدف است (۳۶).

54. Low dose radiation therapy (LDRT)
55. Natural killer cell
56. Gray (Gy)
57. Transforming growth factor beta 1 (TGF-β1)

تهیه واکسن

استفاده از اشعه یونیزان به عنوان روشی برای تضعیف یا غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها برای استفاده در واکسن‌ها، روشی نوین محسوب نمی‌شود. در حقیقت، تحقیقات تولید واکسن‌های غیرفعال شده با پرتوهای گاما و ایکس به اواسط قرن بیستم بازمی‌گردد. مزیت واکسن‌های مبتنی بر پرتوهای یونیزان، یا رادیو-واکسن، این است که به دلیل غیرفعال‌سازی، توانایی ایمنی‌زایی خود را حتی در شرایط نگهداری غیرسردخانه‌ای حفظ می‌کنند و به طور بالقوه نیاز به زنجیره سرد را برای حفظ قدرت واکسن از بین می‌برند. توانایی نگهداری واکسن‌ها در شرایط محیطی یا سردخانه‌ای (در مقایسه با نگهداری منجمد) می‌تواند به کاهش قابل توجه هزینه‌های کلی حمل و نقل و توزیع واکسن منجر شود. در حداقل دو مورد مطالعه پیش بالینی، از اشعه گاما برای تولید رادیو-واکسن از کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲ استفاده شده است. در یکی از پژوهش‌ها، رادیو-واکسن توانست پاسخ ایمنی سلول‌های B و T در موش را برانگیزد. در پژوهش دیگر رادیو-واکسن منجر به برانگیختن پاسخ ایمنی سلولی و هومورال و تولید آنتی‌بادی‌های خنثی کننده در موش گردید (۳۸).

پرتودهی با یون سنگین [58] به عنوان یک روش نوین برای غیرفعال‌سازی ویروس جهت تولید واکسن آنفولانزا، امید بخش بوده است. اسچالز[59] و همکاران نشان داده‌اند که پرتودهی ویروس‌های آنفولانزا با ۵۰ کیلوگری یون‌های سنگین (آهن-۵۶) ، ویروس را به طور کامل غیرفعال کرد، درحالی که یکپارچگی ساختاری پروتئین‌های سطحی مانند هماگلوتینین [60] حفظ

58. Heavy ion beam
59. Schulze
60. Hemagglutinin

شد. ایمنی‌زایی داخل بینی [61] موش‌ها با ویریون‌های پرتودیده، پاسخ‌های قوی ایمنی هومورال و سلولی و اختصاصی آنتی‌ژن را برانگیخت (۳۹). با توجه به شباهت ژنتیکی بین ویروس آنفولانزا و کروناویروس سندرم حاد تنفسی ۲، و همچنین مزایای این روش تولید واکسن، به نظر می‌رسد استفاده از آن برای تولید واکسن کرونا ویروس سندرم حاد تنفسی ۲ مناسب باشد. اما، به دلیل احتمال به وجود آمدن ویروس‌های مقاوم به اشعه پس از استفاده دراز مدت از اشعه، و نشت این ویروس‌ها به محیط خارج از آزمایشگاه، احتمال تخریب پروتئین‌های اسپایک ویروس به دلیل برخورد با ذرات ثانویه تولید شده از پرتوهای اولیه، و همچنین تولید رادیکال‌های آزاد ثانویه به رادیولیز آب (اثر غیر مستقیم تابش یون‌های سنگین بر آب)، استفاده از این روش واجد چالش‌های جدی احتمالی است که بایستی در پژوهش‌های آینده به دقت مورد بررسی قرار گیرند (۲۵).

بحث

از پرتوهای یونیزان در مدیریت کووید-۱۹، به صورت چندجانبه استفاده می‌شود. تصویربرداری مقطع‌نگاری رایانه‌ای با حساسیت بالا توانایی شناسایی زود هنگام ذات‌الریه کووید-۱۹ را دارد، اما یافته‌های مقطع‌نگاری رایانه‌ای اختصاصی نیست و می‌تواند با سایر ذات‌الریه‌ها مشابه باشد. روش تلفیقی مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون/مقطع‌نگاری رایانه‌ای با فلوئورودئوکسی گلوکز التهاب ناشی از کووید-۱۹ را نمایان می‌کند و اطلاعات متابولیک-آناتومیک مفیدی ارائه می‌دهد. همچنین، تصویربرداری تلفیقی مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون/ مقطع‌نگاری رایانه‌ای و اسکن تهویه-خون‌رسانی ریه در تشخیص آمبولی‌های ریه و عوارض خون‌رسانی کووید-۱۹ مورد استفاده قرار گرفته است. در حوزه درمان، درمان رادیونوکلئیدی هدفمند مورد توجه قرار گرفته‌اند. استفاده از رادیونوکلئیدهای ساطع‌کننده الکترون اوژه یا ذرات آلفا به همراه آنتی‌بادی‌های هدف‌گیری‌کننده ویروس را نشان داده است که چنین ترکیب‌هایی توانایی اتصال و ایجاد سمیت موضعی بر ساختار ویروس را دارند. اگرچه این رویکرد پتانسیل تخریب انتخابی ویروس را دارد، داده‌های بالینی محدود است و خطر تداخل ایمنی مانند چالش افزایش عفونت‌زایی ویروس به واسطه آنتی‌بادی باید مدنظر باشد. از سوی دیگر، پرتوهای الکترونی و اشعه ایکس و گاما به‌طور مؤثری برای استریلیزاسیون تجهیزات پزشکی آلوده و غیرفعال‌سازی ویروس کرونا استفاده می‌شوند. کاربرد آن‌ها در تولید رادیو-واکسن نیز مزیت‌های بالقوه‌ای دارد؛ به عنوان مثال، واکسن‌های تولیدشده با اشعه یونیزان نسبت به شرایط نگهداری در دمای اتاق مقاوم‌تر هستند. پرتودرمانی با دوز پایین برای کاهش التهاب و طوفان سیتوکینی ریوی در کووید-۱۹ پیشنهاد شده است. دوزهای پایین (حدود ۰/۵ تا ۱/۰ گری) می‌توانند پاسخ ایمنی ضدویروسی و ضدالتهابی را تقویت کنند. نتایج بالینی اولیه امیدوارکننده‌اند، اما مطالعات کنترل‌شده بزرگ‌تر برای تعیین اثربخشی، ایمنی و دوز بهینه لازم است.

خوشبختانه، فناوری‌های تصویربرداری با پرتو یونیزان تشخیص سریع و پایش دقیق کووید-۱۹ را ممکن کرده‌اند، و روش‌های استریلیزاسیون پرتویی استاندارد و کارآمد هستند، که هر دو از نقاط قوت استفاده از پرتوهای یونیزان هستند.

اما متاسفانه، بسیاری از شواهد از مطالعات پیش‌بالینی یا نمونه‌های محدود حاصل شده‌اند و داده‌های کلینیکی گسترده در خصوص اثربخشی و ایمنی، هنوز در دسترس نیست. همچنین، برخی روش‌ها همچون مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون ممکن است تحت تأثیر واکسیناسیون یا التهاب‌های غیرعفونی قرار گیرند و تفسیر نتایج را دشوار کنند.

مطالعات آینده باید اثربخشی پرتو درمانی با دوز پایین و درمان‌های رادیونوکلئیدی را در کارآزمایی‌های بالینی وسیع بررسی کنند، دوزها و زمان‌بندی بهینه را تعیین نمایند و معیارهای دقیق انتخاب بیمار را مشخص کنند.

این مرور روایتی با وجود ارائه تصویری کلی از کاربردهای پرتوهای یونیزان در مدیریت کووید-۱۹، با محدودیت‌هایی نیز روبرو بود که باید در نظر گرفته شوند. در حقیقت، ماهیت روایتی مطالعه باعث شده است که انتخاب مقالات به صورت نظام‌مند نباشد و احتمال سوگیری در انتخاب منابع وجود دارد. همچنین، بسیاری از یافته‌ها بر اساس مطالعات پیش‌بالینی، آزمایشگاهی یا برون‌تنی هستند و داده‌های بالینی و کارآزمایی‌های بالینی گسترده برای تایید اثربخشی و ایمنی کاربردهای درمانی پرتوهای یونیزان در کووید-۱۹ هنوز ناکافی است.

نتیجه‌گیری

در نتیجه، اگرچه استفاده از پرتوهای یونیزان در

61. Intranasal immunization

مدیریت کووید-۱۹ نویدبخش است، بهره‌برداری بالینی گسترده از این فناوری‌ها مستلزم کارآزمایی‌های تصادفی، تعیین استانداردهای دوز و ایمنی، و تبیین دقیق اندیکاسیون‌های بالینی است و به نظر می‌رسد از لوازم این امر، توسعه ارتباطات بین‌رشته‌ای میان پزشکان، مهندسان پزشکی و فیزیکدانان هسته‌ای است.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تضاد منافعی وجود ندارد.

منابع

1. Talapko J, Talapko D, Katalinić D, Kotris I, Erić I, Belić D, et al. Health effects of ionizing radiation on the human body. Medicina (Kaunas). 2024;60(4):653.
2. Wu D, Wu T, Liu Q, Yang Z. The SARS-CoV-2 outbreak: what we know. Int J Infect Dis. 2020;94:44-8.
3. McCabe R, Schmit N, Christen P, D'Aeth JC, Løchen A, Rizmie D, et al. Adapting hospital capacity to meet changing demands during the COVID-19 pandemic. BMC Med. 2020;18(1):329.
4. Griffin MT, Werner TJ, Alavi A, Revheim ME. The value of FDG-PET/CT imaging in the assessment, monitoring, and management of COVID-19. Eur Phys J Plus. 2023;138(3):283.
5. Tipre DN, Cidon M, Moats RA. Imaging pulmonary blood vessels and ventilation-perfusion mismatch in COVID-19. Mol Imaging Biol. 2022;24(4):526-36.
6. Pallares RM, Abergel RJ. Diagnostic, prognostic, and therapeutic use of radiopharmaceuticals in the context of SARS-CoV-2. ACS Pharmacol Transl Sci. 2021;4(1):1-7.
7. Chalkia M, Arkoudis NA, Maragkoudakis E, Rallis S, Tremi I, Georgakilas AG, et al. The role of ionizing radiation for diagnosis and treatment against COVID-19: evidence and considerations. Cells. 2022;11(3):432.
8. Neumaier F, Zlatopolskiy BD, Neumaier B. Nuclear medicine in times of COVID-19: how radiopharmaceuticals could help to fight the current and future pandemics. Pharmaceutics. 2020;12(12):1284.
9. Eibschutz LS, Rabiee B, Asadollahi S, Gupta A, Assadi M, Alavi A, et al. FDG-PET/CT of COVID-19 and other lung infections. Semin Nucl Med. 2022;52(1):61-70.
10. Lee Y, Park Y, Nam H, Lee JW, Yu SW. Translocator protein (TSPO): the new story of the old protein in neuroinflammation. BMB Rep. 2020;53(1):20-7.
11. Lee H, Park J, Im HJ, Na KJ, Choi H. Discovery of potential imaging and therapeutic targets for severe inflammation in COVID-19 patients. Sci Rep. 2021;11(1):14151.
12. Wischmann J, Bartos LM, Brendel M, Albert NL, Forbrig R, Straube A, et al. Translocator protein (TSPO)-PET as diagnostic and monitoring tool in COVID-19 related MRI-negative brainstem encephalitis: a case report. J Neurol. 2023;270(6):2853-6.
13. Jin C, Luo X, Qian S, Zhang K, Gao Y, Zhou R, et al. Positron emission tomography in the COVID-19 pandemic era. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2021;48(12):3903-17.
14. Topuz OV, Aksu A, Yilmaz B. Is there any change in the muscle uptake pattern of FDG during or after COVID-19 infection in oncological FDG PET-CT patients? J Nucl Med. 2021;62(Suppl 1):1234.
15. Minamimoto R. Oncology and cardiology positron emission tomography/computed tomography faced with COVID-19: a review of available literature data. Front Med (Lausanne). 2022;9:1052921.
16. Mortensen J, Gutte H. SPECT/CT and pulmonary embolism. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2014;41(1):81-90.
17. Bhatia KD, Ambati C, Dhaliwal R, Paschkewitz R, Hsu E, Ho B, et al. SPECT-CT/VQ versus CTPA for diagnosing pulmonary embolus and other lung pathology: pre-existing lung disease should not be a contraindication. J Med Imaging Radiat Oncol. 2016;60(4):492-7.
18. Dhawan RT, Gopalan D, Howard L, Vicente A, Park M, Manalan K, et al. Beyond the clot: perfusion imaging of the pulmonary vasculature after COVID-19. Lancet Respir Med. 2021;9(1):107-16.
19. Buck AK, Nekolla S, Ziegler S, Beer A,

Krause BJ, Herrmann K, et al. SPECT/CT. J Nucl Med. 2008;49(8):1305-19.
20. Meyer PT, Hellwig S, Blazhenets G, Hosp JA. Molecular imaging findings on acute and long-term effects of COVID-19 on the brain: a systematic review. J Nucl Med. 2022;63(7):971-80.
21. Idrissou MB, Pichard A, Tee B, Kibedi T, Poty S, Pouget JP. Targeted radionuclide therapy using Auger electron emitters: the quest for the right vector and the right radionuclide. Pharmaceutics. 2021;13(7):1022.
22. Thomas S, Smatti MK, Ouhtit A, Cyprian FS, Almaslamani MA, Thani AA, et al. Antibody-dependent enhancement (ADE) and the role of complement system in disease pathogenesis. Mol Immunol. 2022;152:172-82.
23. Guerra Liberal FD, O'Sullivan JM, McMahon SJ, Prise KM. Targeted alpha therapy: current clinical applications. Cancer Biother Radiopharm. 2020;35(6):404-17.
24. Pallares RM, Flick M, Shield KM, Bailey TA, Velappan N, Lillo AM, et al. Development of an actinium-225 radioimmunoconjugate for targeted alpha therapy against SARS-CoV-2. New J Chem. 2022;46(33):15795-8.
25. Rafiepour P, Sina S, Mortazavi SMJ. Inactivation of SARS-CoV-2 by charged particles for future vaccine production applications: a Monte Carlo study. Radiat Phys Chem. 2022;198:110265.
26. Liu F, Zhong Z, Liu B, Jiang T, Zhou H, Li G, et al. SARS-CoV-2 inactivation simulation using 14 MeV neutron irradiation. Life (Basel). 2021;11(12):1345.
27. Sandle T. Electron beam processing. In: Sandle T, editor. Sterility, sterilisation and sterility assurance for pharmaceuticals. Cambridge: Woodhead Publishing; 2013. p. 69-81.
28. Wang Z, Liang Z, Wei R, Wang H, Cheng F, Liu Y, et al. Quantitative determination of the electron beam radiation dose for SARS-CoV-2 inactivation to decontaminate frozen food packaging. Virol Sin. 2022;37(6):823-30.
29. Marion JB. Radiation—effects and uses. In: Marion JB, editor. Physics in the modern world. 2nd ed. New York: Academic Press; 1981. p. 603-31.
30. Feldmann F, Shupert WL, Haddock E, Twardoski B, Feldmann H. Gamma irradiation as an effective method for inactivation of emerging viral pathogens. Am J Trop Med Hyg. 2019;100(5):1275-7.
31. Zhang S, Wang X, Gao X, Chen X, Li L, Li G, et al. Radiopharmaceuticals and their applications in medicine. Signal Transduct Target Ther. 2025;10(1):1.
32. Afrough B, Eakins J, Durley-White S, Dowall S, Findlay-Wilson S, Graham V, et al. X-ray inactivation of RNA viruses without loss of biological characteristics. Sci Rep. 2020;10(1):21431.
33. Malinowski M. Using X-ray technology to sterilize medical devices. Am J Biomed Sci Res. 2021;12(3):272-6.
34. Mortazavi SMJ, Kefayat A, Cai J. Point/counterpoint. Low-dose radiation as a treatment for COVID-19 pneumonia: a threat or real opportunity? Med Phys. 2020;47(9):3773-6.
35. Mortazavi SAR, Jafarzadeh A, Ghadimi-Moghadam A, Mortazavi SMJ, Haghani M, Ghadimi-Moghadam A, et al. Breakthrough infection and death after COVID-19 vaccination: a physics perspective. J Biomed Phys Eng. 2023;13(4):301-6.
36. Mortazavi SMJ, Shams SF, Mohammadi S, Mortazavi SAR, Sihver L. Low-dose radiation therapy for COVID-19: a systematic review. Radiation. 2021;1(3):234-49.
37. Reza Mortazavi A, Ghadimi-Moghadam A, Jafarzadeh A, Welsh JS, Mashhadi MHP, Haghani M, et al. Co-infection of COVID-19, influenza and RSV: how non-pharmaceutical therapeutic approaches such as low dose radiation therapy can be a game changing strategy. Dis Res. 2024;4(2):108-12.
38. Bhatia SS, Pillai SD. Ionizing radiation technologies for vaccine development—a mini review. Front Immunol. 2022;13:845514.
39. Schulze K, Weber U, Schuy C, Durante M, Guzmán CA. Influenza virus inactivated by heavy ion beam irradiation stimulates antigen-specific immune responses. Pharmaceutics. 2024;16(4):512.