Journal of Iran Futures Studies
Print ISSN: 6365-2423
Online ISSN: 2676-6183

Identifying trends in the use of artificial intelligence in new treatment techniques with linear accelerators and brachytherapy: A case study of the use of U network

Seyed Mohammad Mahdi Abtahi*

Physics Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, sm.abtahi@sci.ikiu.ac.ir

Mohadeseh Zadnorouzi

PhD candidate in Nuclear Physics, University of Guilan, Rasht, Iran, moh.phy73@gmail.com

Abstract

Introduction: Medical physics specialists face problems due to the complexity and time-consuming design of radiation therapy. Various studies have pointed out the importance and role of artificial intelligence in radiation therapy and accelerating and improving its quality. This research examines and analyzes the possibility of using the U network to improve the design of radiation therapy as a technique to modify radiation therapy with a future-oriented approach.

Methods: To achieve this research goal, trend analysis has been used as one of the main methods of future research. The development path of the U network was examined in authoritative articles, and then by extrapolating the future development path, the application of this technique in radiation therapy was investigated. According to Prisma 2020 guidelines, study selection processes, screening, and inclusion and exclusion criteria were defined.

Findings: Among the 28 articles studied, 20 articles were selected for further evaluation. The evaluation of the trend of U network strategies in different fields of radiotherapy showed that the use of U network will lead to better performance than traditional methods and more effectiveness and reduction of human error in radiotherapy treatment design.

Conclusion: Considering the future trends of the use of the U network in different fields of radiotherapy and the growth of the statistics of articles in this field, which shows the increasing interest in the research and development of artificial intelligence technologies, it is expected that in the future, by solving the existing challenges, the development of the application of artificial intelligence technologies in the Radiation therapy centers, reducing treatment costs and improving the treatment process in the field of radiation therapy.

Keywords: Radiation therapy, U network, Trend analysis, Treatment design, Treatment Process

Cite this article: Abtahi , Seyed Mohammad Mahdi. Zadnorouzi, Mohadeseh (2024 Identifying trends in the use of artificial intelligence in new treatment techniques with linear accelerators and brachytherapy: A case study of the use of U network , Vol.9, NO.1 Spring & Summer 2024,163-185
DOI: 10.30479/jfs.2024.3534
Received on: 5 August 2024 **Accepted on**: 27October 2024
Copyright© 2023, The Author(s).
Publisher: Imam Khomeini International University
Corresponding Author/ E-mail: Seyed Mohammad Mahdi Abtahi / sm.abtahi@sci.ikiu.ac.ir

Introduction

Foresight, as a scientific and practical field, examines future trends and predicts possible developments in various areas (Moradi H et al.; 1384). This science helps us to envision a brighter future by better understanding today's changes (Minaei H et al.; 1397). In the medical field, foresight holds special significance as it studies and predicts technological, social, and economic transformations related to health and treatment. This domain enables researchers to make better decisions by accurately identifying existing trends and recognizing future challenges and opportunities, thus facilitating the improvement of medical services. Rapid advancements in information technology and artificial intelligence have created fundamental changes in the diagnosis and treatment of diseases, potentially leading to reduced costs and improved quality of life for patients (Garson and Levin 2001).

Identifying trends is an important tool for forecasting future developments. Researchers collect historical data and identify existing trends, analyzing patterns to recognize influential events in these trends (Gordon 2010). In the context of cancer diagnosis and treatment, there are multiple challenges that artificial intelligence has significantly improved in diagnostic processes.

The use of artificial intelligence and deep learning technology in medicine has brought about notable transformations, particularly in disease diagnosis through precise analysis of medical images (Stahl BC et al., 2023). Deep neural networks like U-Net are designed for processing medical images and are applied in early disease detection (Ozaltin O et al., 2023). Despite these advancements, challenges such as algorithm accuracy and privacy issues persist (Siddique and Chow 2020, Shur, Doran et al. 2021). This research aims to understand the capabilities of artificial intelligence in modern radiotherapy techniques and analyze its evolving trends.

Methodology

The present research is a foresight study aimed at identifying the trends in the application of the U-Net network in various radiotherapy fields. The research method is a case study based on trend identification techniques. Case studies are common in qualitative research, where the researcher gathers firsthand information about the topic and derives analytical, perceptual, and classification descriptions from the collected data. A trend consists of a series of logically related events, allowing the researcher to predict related events, analyze others' actions, and envision future scenarios.

The literature review involved searching for articles in three databases: Google Scholar, PubMed, and ScienceDirect, using various keyword combinations

related to U-Net and radiotherapy. Twenty-three articles meeting the criteria were selected and classified based on the type of radiotherapy for clarity in analysis. Each study's data included authors, publication year, study objectives, methodology, and main findings (advantages and limitations).
This research provides a comprehensive examination of U-Net's use in radiotherapy, following PRISMA guidelines as a minimum evidence-based standard for reporting systematic reviews and meta-analyses. PRISMA focuses on evaluating intervention effects but can also serve as a basis for systematic reporting.

Results

In the article screening process, three articles identified as critiques or letters to the editor were removed initially. Subsequently, three additional articles that did not focus on the research objective and U-Net methodology were excluded after reviewing titles and abstracts. Ultimately, 20 articles were selected for review after a thorough examination of 22 articles, with two being discarded due to the absence of case studies or dataset descriptions.
The number of articles on AI applications in radiotherapy increased significantly from 2019 to 2023, with the highest number of articles (17,600 or 27%) published in 2023. This reflects growing interest in AI's potential to improve treatment accuracy and efficiency. The review also highlights an increase in articles specifically related to U-Net applications in radiotherapy, with the number rising from 648 in 2019 to 2,760 in 2023. The study categorizes six types of radiotherapy: brachytherapy, intensity-modulated radiation therapy (IMRT), volumetric modulated arc therapy (VMAT), stereotactic radiosurgery (SRS), targeted radionuclide therapy (TRT), and proton therapy. The various strategies of the U-Net model for different types of radiotherapy are summarized as follows:

1. Providing a deep learning-based system for high-dose brachytherapy
2. Automatic segmentation and reconstruction of the applicator
3. Reducing treatment planning time
4. Reducing errors
5. Increasing accuracy
6. Creating personalized brachytherapy conditions

U-Net Strategies for Enhancing IMRT Techniques:

1. Dose prediction
2. Dose verification
3. Beam angle optimization
4. Potential for online techniques
5. Accurate predictions

6. High speed
7. Error reduction
8. Creating personalized treatment conditions

U-Net Strategies for Enhancing SRS Techniques:

1. Tumor identification and separation
2. Prediction of dose during the procedure
3. Reducing time requirements
4. Potential for developing high-quality treatment plans

U-Net Strategies for Enhancing VMAT Techniques:

1. Dose distribution prediction
2. Achieving high accuracy
3. Reducing treatment design time
4. Generating pseudo-CT images
5. Predicting dose maps

U-Net Strategies for Enhancing TRT Techniques:

1. Automatic characterization of lesions
2. Excellent potential for use in real-time clinical settings

U-Net Strategies for Enhancing Proton Therapy Techniques:

1. Proton dose calculation
2. Increasing accuracy
3. Reducing treatment planning time
4. Improving image quality
5. Creating suitable treatment plans

For brachytherapy, strategies include deep learning systems for high-dose treatments and automatic segmentation. For IMRT, strategies encompass dose prediction and optimization. SRS strategies focus on tumor identification and treatment planning. VMAT strategies involve dose distribution prediction and accuracy enhancement. TRT emphasizes automatic lesion characterization, while proton therapy strategies include dose calculation and improved treatment planning. Overall, U-Net demonstrates significant potential in advancing radiotherapy techniques across multiple modalities.

Future trends in U-Net applications in radiotherapy are anticipated as follows:

Brachytherapy: Increased accuracy in automatic applicator reconstruction and enhanced individualized dosimetry using deep learning will reduce

treatment planning time. Improved digitalization of needles and advancements in MR-IGABT imaging techniques are expected.
IMRT: Deep learning will optimize beam angles, develop online techniques for real-time dose prediction, and integrate physician preferences into dose forecasting. Enhanced accuracy for complex configurations and improved dose verification tools are anticipated.
SRS: Enhanced accuracy in identifying small tumors is expected, along with reduced false-positive rates compared to human assessments. AI decision support systems will be developed, improving dose prediction for gamma knife procedures.
VMAT: Predictive capabilities for various doses will expand, with increased accuracy and comprehensive treatment planning based on predicted dose distributions. Enhanced data diversity and GPU performance will reduce processing times.
TRT: Automatic lesion characterization in PET/CT will improve, with advancements in radionuclide dosimetry. The adoption of deep learning algorithms in clinical practice is expected to accelerate, enhancing detection and segmentation speed and accuracy.

Conclusions

The use of U-Net in radiotherapy presents both advantages and limitations that must be considered for effective implementation. U-Net can enhance various stages of the radiotherapy process:

1. Treatment Planning: By analyzing pre-treatment images, U-Net aids in identifying regions and fine-tuning radiation doses.
2 .Treatment Monitoring: It tracks changes in treatment areas, facilitating dynamic adjustments.
3. Post-Treatment Evaluation: U-Net provides detailed analyses of changes after treatment, aiding decisions for supplementary therapies.
4. Increased Accuracy and Efficiency: Improved precision and reduced errors in dose delivery can lower patient costs.
Despite its benefits, challenges such as data limitations and model generalization hinder the clinical application of deep learning approaches like U-Net. Future research should focus on data acquisition mechanisms in clinical settings. Additionally, the memory-intensive nature of U-Net, especially with 3D models, complicates implementation; thus, most studies have concentrated on 2D structures. However, 3D analysis could significantly enhance understanding, particularly in cancer diagnosis.
Future studies should evaluate the practical reduction of treatment costs using U-Net and report relevant statistics to persuade healthcare facilities to adopt this method. Enhancements to U-Net can further improve diagnostic and

treatment quality. This article assesses various applications of U-Net in radiotherapy, helping specialists focus on existing challenges.
Collaboration between radiation oncologists and AI experts will facilitate better identification of challenges and solutions in radiotherapy. Furthermore, training programs for healthcare professionals on intelligent technologies are essential for raising awareness about AI's potential in clinical settings. This study enables the selection of appropriate solutions for existing challenges and the development of current algorithms in radiotherapy.

References

Moradi H. Future research, concepts and methods *The approach* 2014;36-50:45.

Minaei H, and Hadinejad F, the research process of American threats against the Islamic Republic of Iran *Defence future research*, 2017; 7-28:3(8)

Garson A Jr, Levin SA. 2001 Ten 10-year trends for the future of healthcare: implications for academic health centers *Ochsner J* 3(1):10-5.

Verschuuren, M., H. B. Hilderink and R. A. Vonk 2020 The Dutch Public Health Foresight Study 2018: an example of a comprehensive foresight exercise *European journal of public health* 30(1): 30-35

Gordon A. 2010 A DEFT Approach to Trend-Based Foresight. *Foresight: The International Journal of Applied Forecasting* 13-18.

Stahl BC, Antoniou J, Bhalla N, Brooks L, Jansen P, Lindqvist B, Kirichenko A, Marchal S, Rodrigues R, Santiago N and Warso Z 2023 A systematic review of artificial intelligence impact assessments *Artificial Intelligence Review* 56(11) 12799-12831

Bindra S and Jain R 2024 Artificial intelligence in medical science: a review. *Irish Journal of Medical Science* (1971-) 193(3) 1419-29.

Mäkitie, Antti A et al. 2023 Artificial Intelligence in Head and Neck Cancer: A Systematic Review of Systematic Reviews *Advances in therapy* 40(8) 3360-3380

S. Alshuhri M, Al-Musawi S G, Al-Alwany A A, Uinarni H, Rasulova I, Rodrigues P, Alkhafaji A T, Alshanberi A M, Alawadi A H and Abbas A H 2024 Artificial intelligence in cancer diagnosis: Opportunities and challenges *Pathology - Research and Practice* 253 154996

Li J-w, Sheng D-l, Chen J-g, You C, Liu S, Xu H-x and Chang C 2023a Artificial intelligence in breast imaging: potentials and challenges *Physics in Medicine & Biology* 68 23TR01

Dashtbani Moghari M, Sanaat A, Young N, Moore K, Zaidi H, Evans A, Fulton R R and Kyme A Z 2023 Reduction of scan duration and radiation dose in cerebral CT perfusion imaging of acute stroke using a recurrent neural network *Physics in Medicine & Biology* 68 165005

Ozaltin O, Yeniay O, and Subasi A 2023 Artificial intelligence-based brain hemorrhage detection. *In Accelerating strategic changes for digital transformation in the healthcare industry* 179-199

Mancosu P, Lambri N, Castiglioni I, Dei D, Iori M, Loiacono D, Russo S, Talamonti C, Villaggi E, Scorsetti M and Avanzo M 2022 Applications of artificial intelligence in stereotactic body radiation therapy *Physics in Medicine & Biology* 67

Jamtheim Gustafsson C, Swärd J, Adalbjörnsson S, Jakobsson A and Olsson L 2020 Development and evaluation of a deep learning based artificial intelligence for automatic identification of gold fiducial markers in an MRI-only prostate radiotherapy workflow *Physics in Medicine & Biology* 65

Tanaka H, Chiu S-W, Watanabe T, Kaoku S and Yamaguchi T 2019 Computer-aided diagnosis system for breast ultrasound images using deep learning *Ultrasound in Medicine & Biology* 45 S4

Tien H-J, Yang H-C, Shueng P-W and Chen J-C 2021 Cone-beam CT image quality improvement using Cycle-Deblur consistent adversarial networks (Cycle-Deblur GAN) for chest CT imaging in breast cancer patients *Scientific reports* 11 1133

Götz T I, Schmidkonz C, Chen S, Al-Baddai S, Kuwert T and Lang E W 2020 A deep learning approach to radiation dose estimation *Physics in Medicine & Biology* 65 035007

Niecikowski A, Gupta S, Suarez G, Kim J, Chen H, Guo F, Long W and Deng J 2022 A Multi-Modal Deep Learning-Based Decision Support System for Individualized Radiotherapy of Non-Small Cell Lung Cancer *International Journal of Radiation Oncology*Biology*Physics* 114 e100-e1

Shur J D, Doran S J, Kumar S, Ap Dafydd D, Downey K, O'Connor J P B, Papanikolaou N, Messiou C, Koh D M and Orton M R 2021 Radiomics in Oncology: A Practical Guide *Radiographics* 41 1717-32

Siddique S and Chow J C L 2020 Artificial intelligence in radiotherapy *Rep Pract Oncol Radiother* 25 656-66

Lee MC, Wang SY, Pan CT, Chien MY, Li WM, Xu JH, Luo CH, Shiue YL 2023 Development of Deep Learning with RDA U-Net Network for Bladder Cancer Segmentation *Cancers (Basel)* 15(4):1343

Wang B and Yang C 2024 Liver tumor segmentation method based on U-Net architecture: a review *EAI Endorsed Transactions on e-Learning* 10

Kihira S, Mei X, Mahmoudi K, Liu Z, Dogra S, Belani P, Tsankova N, Hormigo A, Fayad ZA, Doshi A and Nael K 2022 U-Net Based Segmentation and Characterization of Gliomas *Cancers (Basel)* 14(18)

Boulanger M, Nunes JC, Chourak H, Largent A, Tahri S, Acosta O, De Crevoisier R, Lafond C, Barateau A 2021 Deep learning methods to

generate synthetic CT from MRI in radiotherapy: A literature review *Physica Medica* 89:265-81

Yan C, Guo B, Keller LM, Suh JH, Xia P 2023 Dosimetric Quality of Artificial Intelligence Based Organ at Risk Segmentation *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics* 117(2) 493

Hu H, Yang Q, Li J, Wang P, Tang B, Wang X and Lang J 2021 Deep learning applications in automatic segmentation and reconstruction in CT-based cervix brachytherapy *Journal of contemporary brachytherapy* 13 325-30

Mao X, Pineau J, Keyes R and Enger S A 2020 RapidBrachyDL: rapid radiation dose calculations in brachytherapy via deep learning *International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics* 108 802-12

Jung H, Shen C, Gonzalez Y, Albuquerque K and Jia X 2019 Deep-learning assisted automatic digitization of interstitial needles in 3D CT image based high dose-rate brachytherapy of gynecological cancer *Physics in Medicine & Biology* 64 215003

Ecker S, Zimmermann L, Heilemann G, Niatsetski Y, Schmid M, Sturdza A E, Knoth J, Kirisits C and Nesvacil N 2022 Neural network-assisted automated image registration for MRI-guided adaptive brachytherapy in cervical cancer *Zeitschrift für Medizinische Physik* 32 488-99

Barragán-Montero A M, Nguyen D, Lu W, Lin M-H, Norouzi-Kandalan R, Geets X, Sterpin E and Jiang S 2019 Three-dimensional dose prediction for lung IMRT patients with deep neural networks: robust learning from heterogeneous beam configurations *Medical physics* 46 3679-91

Nguyen D, Long T, Jia X, Lu W, Gu X, Iqbal Z and Jiang S 2019 A feasibility study for predicting optimal radiation therapy dose distributions of prostate cancer patients from patient anatomy using deep learning *Scientific reports* 9 1076

Xing Y, Nguyen D, Lu W, Yang M and Jiang S 2020 A feasibility study on deep learning-based radiotherapy dose calculation *Medical physics* 47 753-8

Bohara G, Sadeghnejad Barkousaraie A, Jiang S and Nguyen D 2020 Using deep learning to predict beam-tunable Pareto optimal dose distribution for intensity-modulated radiation therapy *Medical physics* 47 3898-912

Oh K, Gronberg M P, Netherton T J, Sengupta B, Cardenas C E, Court L E and Ford E C 2023 A deep-learning-based dose verification tool utilizing fluence maps for a cobalt-60 compensator-based intensity-modulated radiation therapy system *Physics and Imaging in Radiation Oncology* 26 100440

Lu S L, Xiao F R, Cheng J C, Yang W C, Cheng Y H, Chang Y C, Lin J Y, Liang C H, Lu J T, Chen Y F and Hsu F M 2021 Randomized multi-reader evaluation of automated detection and segmentation of brain tumors in stereotactic radiosurgery with deep neural networks *Neuro Oncol* 23 1560-8

Zhang B, Babier A, Chan T C Y and Ruschin M 2023 3D dose prediction for Gamma Knife radiosurgery using deep learning and data modification *Physica Medica* 106 102533

Ahn S H, Kim E, Kim C, Cheon W, Kim M, Lee S B, Lim Y K, Kim H, Shin D, Kim D Y and Jeong J H 2021 Deep learning method for prediction of patient-specific dose distribution in breast cancer *Radiat Oncol* 16 154

Ma M, Kovalchuk N, Buyyounouski M K, Xing L and Yang Y 2019 Incorporating dosimetric features into the prediction of 3D VMAT dose distributions using deep convolutional neural network *Physics in Medicine & Biology* 64 125017

Largent A, Barateau A, Nunes J C, Mylona E, Castelli J, Lafond C, Greer P B, Dowling J A, Baxter J, Saint-Jalmes H, Acosta O and de Crevoisier R 2019 Comparison of Deep Learning-Based and Patch-Based Methods for Pseudo-CT Generation in MRI-Based Prostate Dose Planning *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 105 1137-50

Ma L, Chen M, Gu X and Lu W 2020 Deep learning-based inverse mapping for fluence map prediction *Phys Med Biol* 65

Zhao Y, Gafita A, Vollnberg B, Tetteh G, Haupt F, Afshar-Oromieh A, Menze B, Eiber M, Rominger A and Shi K 2020 Deep neural network for automatic characterization of lesions on (68)Ga-PSMA-11 PET/CT *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 47 603-13

Li Z, Fessler J A, Mikell J K, Wilderman S J and Dewaraja Y K 2022 DblurDoseNet: A deep residual learning network for voxel radionuclide dosimetry compensating for single-photon emission computerized tomography imaging resolution *Med Phys* 49 1216-30

Thummerer A, Zaffino P, Meijers A, Marmitt G G, Seco J, Steenbakkers R, Langendijk J A, Both S, Spadea M F and Knopf A C 2020 Comparison of CBCT based synthetic CT methods suitable for proton dose calculations in adaptive proton therapy *Phys Med Biol* 65 095002

Zimmermann L, Knäusl B, Stock M, Lütgendorf-Caucig C, Georg D and Kuess P 2022 An MRI sequence independent convolutional neural network for synthetic head CT generation in proton therapy *Zeitschrift für Medizinische Physik* 32 218-27

Lalonde A, Winey B, Verburg J, Paganetti H and Sharp G C 2020 Evaluation of CBCT scatter correction using deep convolutional neural networks for head and neck adaptive proton therapy *Phys Med Biol* 65

فصلنامه آینده پژوهی ایران

شاپای چاپی :۶۳۶۳-۲۴۲۳

شاپای الکترونیکی : ۷۶۲۶-۶۱۸۳

شناسایی روندهای کاربرد هوش مصنوعی در تکنیک‌های نوین درمان با شتاب‌دهنده‌های خطی و براکی تراپی: مطالعه موردی کاربرد شبکه یو

سید محمد مهدی ابطحی

دانشیار گروه فیزیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران (نویسنده مسئول) sm.abtahi@sci.ikiu.ac.ir

محدثه زادنوروزی

دانشجوی دکتری فیزیک هسته ای، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. moh.phy73@gmail.com

چکیده

هدف: متخصصان فیزیک پزشکی به دلیل پیچیدگی و وقت‌گیر بودن طراحی درمان پرتودرمانی با مشکلاتی روبارو هستند. مطالعات مختلف به اهمیت و نقش هوش مصنوعی در پرتودرمانی و تسریع و بهبود کیفیت آن اشاره کرده‌اند. این تحقیق امکان استفاده از شبکه یو در بهبود طراحی درمان پرتودرمانی را به‌عنوان تکنیکی برای اصلاح پرتودرمانی با رویکرد آینده‌پژوهانه مورد بررسی و تحلیل قرار می‌دهد.

روش‌ها: برای نیل به هدف این پژوهش از روش تحلیل روند به‌عنوان یکی از روش‌های اصلی آینده‌پژوهی استفاده شده است. مسیر تحول شبکه یو در مقالات معتبر مورد بررسی قرار گرفت و سپس با برون‌یابی مسیر تحول آینده کاربرد این تکنیک در پرتودرمانی بررسی شد. طبق دستورالعمل‌های پریزما ۲۰۲۰، فرایندهای انتخاب مطالعه، غربالگری و معیارهای ورود و خروج تعریف شدند.

یافته‌ها: از بین ۲۸ مقاله، ۲۰ مقاله برای ارزیابی بیشتر انتخاب شد. ارزیابی روند راهبردهای شبکه یو در حوزه‌های مختلف رادیوتراپی نشان داد به کارگیری شبکه یو منجر به عملکرد بهتر نسبت به روش‌های سنتی و اثربخشی بیشتر و کاهش خطای انسانی در طراحی درمان پرتودرمانی خواهد شد.

نتیجه‌گیری: با توجه به روندهای آتی کاربرد شبکه یو در حوزه‌های مختلف رادیوتراپی و رشد آمار مقالات در این حوزه، که نشان‌دهنده افزایش علاقه در تحقیق و توسعه فناوری‌های هوش مصنوعی است، انتظار می‌رود در آینده با رفع چالش‌ها به توسعه کاربرد تکنولوژی‌های هوش مصنوعی در مراکز پرتودرمانی، کاهش هزینه‌های درمان و بهبود فرایند درمان در حوزه پرتودرمانی دست یابیم.

واژگان کلیدی: پرتودرمانی، شبکه یو، تحلیل روند، طراحی درمان.

استناد: سید محمد مهدی ، ابطحی. محدثه، زاد نوروزی.(۱۴۰۳) شناسایی روندهای کاربرد هوش مصنوعی در تکنیک‌های نوین درمان با شتاب‌دهنده‌های خطی و براکی تراپی: مطالعه موردی کاربرد شبکه یو دو، فصلنامه علمی آینده پژوهی ایران، مقاله پژوهشی، دوره ۹، شماره ۱، بهار وتابستان ۱۴۰۳، ۱۶۳-۱۸۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۵/۱۵ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۸/۶

ناشر: دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

مقدمه

آینده‌پژوهی به‌عنوان یک حوزه علمی و کاربردی به بررسی روندهای آینده و پیش‌بینی تحولات ممکن در زمینه‌های مختلف می‌پردازد (مرادی ح و همکاران، ۱۳۸۴). این علم به ما کمک می‌کند تا با درک بهتر از تغییرات امروز، آینده‌ای روشن‌تر و مطلوب‌تر را برای خود ترسیم کنیم (مینایی ح و همکاران، ۱۳۹۷). در این راستا، آینده‌پژوهی در حوزه پزشکی و درمان اهمیت ویژه‌ای دارد. آینده‌پژوهی در پزشکی به مطالعه و پیش‌بینی تحولات تکنولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی مرتبط با سلامت و درمان می‌پردازد. آینده‌پژوهی در حوزه سلامت و درمان پزشکی به محققان این امکان را می‌دهد که با شناسایی دقیق روندها و شناسایی چالش‌ها و فرصت‌های آتی، تصمیم‌گیری‌های بهتری داشته باشند. این حوزه به ما امکان می‌دهد تا با شناسایی روندهای نوظهور، بهبود کیفیت خدمات پزشکی و درمان را تسهیل کنیم. پیشرفت‌های سریع در فناوری اطلاعات، هوش مصنوعی و بیوتکنولوژی، تغییرات بنیادی در نحوه تشخیص و درمان بیماری‌ها ایجاد کرده است. این فناوری‌ها می‌توانند به شخصی‌سازی درمان‌ها و بهبود دسترسی به خدمات پزشکی کمک کنند. این تغییرات می‌توانند منجر به کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت زندگی بیماران شوند (Garson and Levin 2001). همچنین رویکرد آینده‌پژوهانه می‌تواند به کاهش خطر ناشی از تصمیم‌گیری‌های غیرمستند کمک کند (Verschuuren, Hilderink et al. 2020).

شناسایی روند در آینده‌پژوهی، ابزار مهمی برای شناسایی و پیش‌بینی تحولات آتی است. این روش به محققان کمک می‌کند تا با بررسی روندهای گذشته و حال، تغییرات آینده را پیش‌بینی کنند. در ادامه، مراحل و ویژگی‌های این روش به تفصیل توضیح داده می‌شود. در ابتدا محققان به جمع‌آوری داده‌های تاریخی و شناسایی روندهای موجود می‌پردازند. این روندها می‌توانند شامل تغییرات جمعیتی، اقتصادی، اجتماعی یا تکنولوژیکی باشد (Gordon 2010). پس از شناسایی روندها، داده‌ها مورد تحلیل قرار می‌گیرد تا الگوها مشخص شود. در مرحله نهایی، محققان رویدادهای تأثیرگذار بر روندها را شناسایی می‌کنند. این رویدادها ممکن است به تقویت یا تضعیف روندهای موجود منجر شوند. براساس تحلیل‌ها، روندهای مختلفی برای آینده ایجاد می‌شود که شامل آینده‌های محتمل و مطلوب است و تأثیرات مختلف بر موضوع مورد بررسی را نشان می‌دهد. براساس نتایج

شناسایی روند، محققان می‌توانند استراتژی‌های مناسبی برای مقابله با چالش‌ها و بهره‌برداری از فرصت‌ها تدوین کنند.

تشخیص و درمان سرطان با چالش‌های متعددی روبه‌رو است که به پیچیدگی‌های بیولوژیکی، نیاز به تشخیص زودهنگام و دقت در درمان مربوط می‌شود. در این راستا، تحقیقات در حوزه کاربرد هوش مصنوعی (AI) به‌عنوان ابزاری نوین، بهبودهای شایسته توجهی را در فرایندهای تشخیصی و درمانی به همراه داشته است. سرطان‌ها به دلیل تنوع ژنتیکی و بیولوژیکی خود، رفتارهای متفاوتی دارند که این امر تشخیص و درمان آن‌ها را دشوار می‌کند. هر نوع سرطان ممکن است نیاز به رویکردهای متفاوتی برای درمان داشته باشد. شناسایی سرطان در مراحل اولیه بسیار حیاتی است؛ اما بسیاری از انواع سرطان در مراحل ابتدایی علائم خاصی ندارند. این تأخیر در تشخیص می‌تواند بر نتایج درمان تأثیر منفی بگذارد. روش‌های سنتی مانند نمونه‌برداری ممکن است دقت کافی را نداشته باشد؛ برای مثال، دقت در تشخیص تهاجمی‌بودن برخی از سرطان‌ها با روش‌های سنتی حدود ۴۴ درصد است در حالی که نیاز به دقت بالاتری وجود دارد (Ujvari, Klaassen et al. 2018).

در دهه‌های اخیر، استفاده از هوش مصنوعی و به‌ویژه فناوری یادگیری عمیق به‌عنوان یکی از پیشرفت‌های برجسته علوم کامپیوتر و فناوری اطلاعات، به‌طور چشمگیری در حوزه‌های مختلف به کار گرفته شده است (Stahl BC et al., 2023). یکی از حوزه‌هایی که این فناوری‌ها تحولات شایسته توجهی در آن به وجود آورده است، حوزه پزشکی و پرتودرمانی است (Bindra S et al., 2024). یکی از کاربردهای اصلی هوش مصنوعی در پزشکی، تشخیص بیماری‌ها از طریق تجزیه و تحلیل دقیق و سریع تصاویر پزشکی مانند اسکن‌های تصویربرداری تشدید مغناطیسی (ام آر آی)، تصویربرداری مقطع نگاری کامپیوتری (سی تی) و رادیولوژی است. سیستم‌های یادگیری عمیق با استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق، قادرند الگوهای پیچیده‌تری را که ممکن است به چشم غیرقابل تشخیص باشند، تشخیص دهند؛ به‌عنوان مثال، تشخیص سرطان در مراحل زودرس با استفاده از تصاویر ام آر آی یا تشخیص آسیب‌های مغزی در CT از جمله کاربردهای این فناوری است (Ozaltin O et al., 2023).

یکی از چالش‌های مهم در پرتودرمانی، هدایت دقیق پرتو به ناحیه هدف است. شبکه‌های عصبی عمیق می‌توانند با تحلیل دقیق تصاویر و فرایندهای بدنی بیمار، بهبود شایسته توجهی در دقت هدایت پرتودرمانی داشته باشند و در نتیجه کاهش آسیب به بافت‌های سالم را ارائه کنند (Tanaka, Chiu et al. 2019, Götz, Schmidkonz et al. 2020, Jamtheim Gustafsson, Swärd et al. 2020, Chen, Liang et al. 2021, Mancosu, Lambri et al. 2022). هرچند که استفاده از هوش مصنوعی در پزشکی با پیشرفت‌های شایسته توجهی همراه بوده است، هنوز چالش‌هایی نیز وجود دارد؛ از جمله اطمینان از دقت و توانایی تعمیم الگوریتم‌های یادگیری عمیق در رویارویی با تغییرات واقعی در بدن انسان. همچنین، مسائل حریم خصوصی و امنیت داده‌های پزشکی نیز از جمله چالش‌های شایسته توجه هستند که با توجه به حساسیت بالای اطلاعات پزشکی، باید به دقت مدیریت شوند(Siddique and Chow 2020, Shur, Doran et al. 2021).

شبکه یو یکی از شبکه‌های عصبی عمیق معروف و مؤثر در حوزه تشخیص پزشکی به‌ویژه در زمینه پردازش تصاویر است. این شبکه ابتدا در ۲۰۱۵ برای تشخیص تومورها در تصویربرداری از مغز معرفی شد و به دلیل ساختار خاص و توانایی‌های منحصر به فردش به‌سرعت در دیگر حوزه‌های تصویربرداری پزشکی مورد استفاده قرار گرفته است.

روند کاربری شبکه یو به شرح ذیل است:

۱. آماده‌سازی داده‌ها: شامل جمع‌آوری و پیش‌پردازش تصاویر پزشکی و ماسک‌های ground truth برای تعیین مناطق مورد نظر.

۲. تعریف معماری شبکه: U-Net شامل بخش‌های کانولوشنی برای استخراج ویژگی‌ها و بخش‌های آپ‌سمپلینگ برای بازسازی دقیق‌تر تصاویر است.

۳. آموزش شبکه: شبکه با داده‌های آموزشی آموزش داده می‌شود تا الگوهای مرتبط با تصاویر را شناسایی، و ماسک‌های مناسب برای مناطق مورد نظر تولید کند.

شبکه یو یک روش نوین در کاربرد هوش مصنوعی در حوزه‌های پزشکی شناخته می‌شود. از طرفی پرتودرمانی با تکنیک‌های نوین بر پایه شتاب‌دهنده‌های درمانی و همچنین روش‌های جدید براکی‌تراپی، موضوعات نوظهوری هستند که با چالش‌های جدی در حوزه‌های طراحی درمان، تعیین

توزیع سه‌بعدی دوز پرتو و محاسبات زمان‌بر و پیچیده روبه‌رو هستند. شبکه یو در جهت حل مسائل مرتبط با پرتودرمانی مورد توجه پژوهشگران این حوزه قرار گرفته است. بنابراین توجه به تکنیک شبکه یو در پرتودرمانی‌های نوین با وجود نوظهوربودن هر دو شاخه بسیار رو به گسترش است. بااین‌حال هنوز پژوهشی به روند کاربرد شبکه یو در حوزه‌های پرتودرمانی نپرداخته است. آینده‌پژوهی می‌تواند به محققان و پزشکان کمک کند تا با تحلیل داده‌ها و روندهای موجود، فرصت‌ها و تهدیدهای مرتبط با این تکنیک نوین در حوزه پرتودرمانی را شناسایی کنند. همچنین به محققان کمک می‌کند تا برای چالش‌هایی که ممکن است در آینده بروز کند، برنامه‌ریزی، و راهکارهای مؤثری ارائه کنند. هدف این پژوهش این است که شناخت کافی از توانایی‌های هوش مصنوعی در تکنیک‌های نوین پرتودرمانی و روند تحولات آن به دست آید. برای نیل به این هدف، توانایی‌های هوش مصنوعی در تکنیکهای نوین پرتودرمانی و ابعاد مختلف آن بررسی و تحلیل شد. همچنین با تکنیک شناسایی روند که یکی از روش‌های آینده‌پژوهی است، روندهای آتی نقش هوش مصنوعی در پرتودرمانی مورد ارزیابی قرار گرفت.

پیشینه پژوهش

در سالهای اخیر، حوزه هوش مصنوعی در درمان مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار گرفته است. در ادامه به تعدادی از مطالعات در این حوزه اشاره می کنیم. در ۲۰۲۳ مینگ-چان لی و همکارانش مدل Residual-Dense-Attention (RDA) U-Net را معرفی کردند که برای بخش‌بندی خودکار اندام‌ها و ضایعات در تصاویر CT برای سرطان مثانه طراحی شده است. این مدل با استفاده از دروازه‌های توجه برای سرکوب مناطق نامربوط در تصاویر به دقت ۹۶٪ برای بخش‌بندی مثانه دست یافت و منجر به کاهش ۴۴٪ در زمان آموزش در مقایسه با CNN های سنتی شد (Lee, Wang et al. 2023). بیائو وانگ و همکارانش در ۲۰۲۴ بررسی جامعی از معماری‌های مختلف U-Netو بهبودهای آنها برای بخش‌بندی تومورهای کبد در تصاویر CT ارائه کردند. این مقاله بر اثربخشی روش‌های یادگیری عمیق در افزایش دقت و کارایی بخش‌بندی تأکید می‌کند (Wang and Yang 2024). در مطالعه‌ای دیگر، شینگو کیهیرا و همکارانش در ۲۰۲۲ مطالعه‌ای با هدف

ایجاد چهارچوبی با استفاده از U-Net برای بخش‌بندی خودکار گلیوماها و پیش‌بینی بیومارکرهای مرتبط با پیش‌آگهی انجام دادند. این رویکرد تکنیک‌های یادگیری عمیق را برای بهبود توانایی‌های تشخیصی ادغام می‌کند (Kihira, Mei et al. 2022).

در یک پژوهش دیگر، باراگان و همکارانش از چهارچوب U-Net برای پیش‌بینی دوز در پرتودرمانی سرطان ژنیکولوژیک استفاده کردند. این مدل نسبت به روش‌های قبلی عملکرد بهتری داشت و پتانسیل خود را برای استفاده در تکنیک‌های آنلاین نشان داد (Barragán-Montero, Nguyen et al. 2019). بولانگر و همکارانش یک روش بخش‌بندی با استفاده از U-Net برای تولید شبه سی تی برای مکان‌یابی چندین سوزن در رادیوتراپی IMRT برای پروستات توسعه دادند. این مدل به نرخ عدم قطعیت پایین و زمان محاسبه کم دست یافت (Boulanger, Nunes et al. 2021).

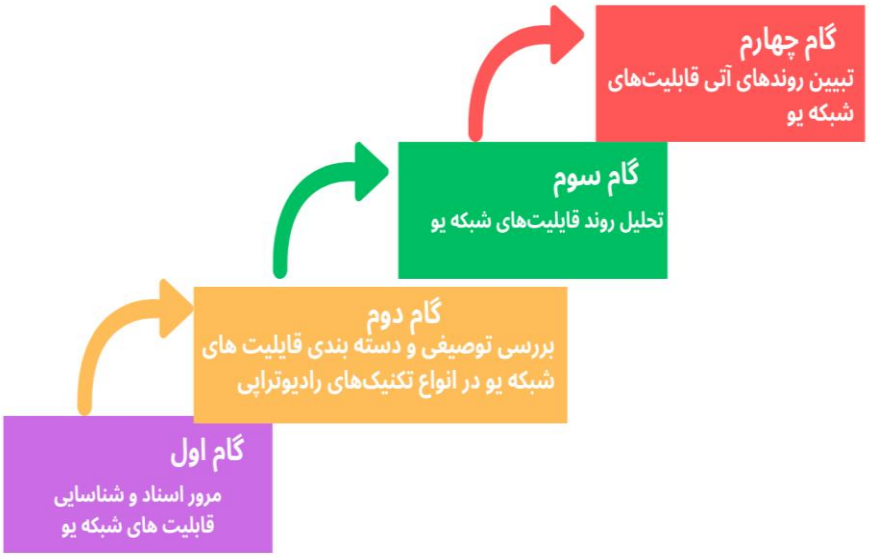
مقالات این دو پاراگراف به‌طورکلی پیشرفت‌هایی را که از طریق معماری‌های U-Net در براکی‌تراپی و SRS حاصل شده است، نشان می‌دهند و بهبود دقت بخش‌بندی، کارایی و توانایی کاربرد بالینی را در انواع مختلف پرتودرمانی به نمایش می‌گذارند. مطالعه ما به بررسی استفاده از شبکه یو در انواع مختلف پرتودرمانی می‌پردازد. بهبود تحویل دوز به ناحیه تومورال در پرتودرمانی به‌طور رایج با استفاده از پیشرفته‌سازی سیستم‌های پرتودرمانی صورت می‌پذیرد که با توجه به هزینه بالای تجهیزات مربوط، هزینه درمان به‌شدت افزایش می‌یابد. علاوه براین با وجود پیشرفته‌سازی هنوز خطاهای مختلفی در طراحی درمان می‌تواند نه تنها باعث عدم تحویل دوز مناسب به ناحیه تومورال شود، بلکه دوز نابودکننده‌ای که باید به تومور تحویل می‌شد به بافت سالم مجاور تحویل شود که مشکلی مضاعف برای بیمار ایجاد می‌کند. قضیه جایی حادتر می‌شود که بافت مجاور یک ارگان حیاتی مانند قلب، ریه و نخاع باشد (Yan C et al.,2023).

چهارچوب نظری

روش‌شناسی پژوهش

این تحقیق از نوع آینده‌پژوهی، و فرآورده آن دستیابی به روندهای کاربرد شبکه U در حوزه‌های مختلف رادیوتراپی است. روش این تحقیق موردکاوی و متکی بر تکنیک شناسایی روند است.

موردکاوی یکی از روش‌های معمول در پژوهش‌های کیفی است که محقق تلاش می‌کند با این روش اطلاعات دست اول درباره موضوع تحقیق گردآوری کند و از این اطلاعات، توصیف‌های تحلیلی، ادراکی و طبقه‌بندی کسب کند. روند دربردارنده سلسله رویدادهایی است که باهم به‌طور منطقی رابطه دارند. پس محقق با شناخت روندها در تلاش است رویدادهای مرتبط با آن را پیش‌بینی، اقدام‌های دیگران را تحلیل، و تصاویر آینده را ترسیم کند. شکل شماره (۱) گام‌های انجام تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱- گام‌های انجام تحقیق

مرور اسناد و شناسایی توانایی‌های شبکه یو

جست‌وجوی مقالات در سه پایگاه داده گوگل اسکولار، پابمد و ساینس دایرکت با استفاده از ترکیبات مختلف کلمات کلیدی متناسب با هر پایگاه داده انجام شد. این کلمات کلیدی شامل عباراتی مانند شبکه یو و رادیوتراپی یا پرتودرمانی و برنامه‌ریزی درمان، پیش‌بینی دوز، پیش‌بینی نقشه شار،

تضمین کیفیت، براکی‌تراپی[۳۷]، پرتودرمانی با شدت تعدیل‌یافته[۳۸]، رادیوسرجری استریوتاکتیک [۳۹]، پروتون‌تراپی[۴۰]، قوس درمانی تعدیل‌شده حجمی[۴۱] و رادیونوکلئیددرمانی هدفمند[۴۲] بود.

معیارهای ورود و خروج در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱. معیارهای شمول و حذف مقالات.

معیار شمول	معیار حذف
۱. مقالات انگلیسی ۲. مقاله منتشرشده بین ۱ ژانویه ۲۰۱۹ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۲۳ ۳. مقالات باید شامل روش U-Net باشد ۴. هر مقاله نیاز به ارائه حداقل یک مطالعه موردی دارد ۵. مقالات باید در زمینه رادیوتراپی متمرکز باشد	۱. پایان نامه، بخش کتاب، بررسی ۲. نامه به سردبیران ۳. مطالعات متمرکز بر AI/ML برای تشخیص، درجه‌بندی و طبقه‌بندی سرطان

بیست و سه مقاله انتخاب‌شده که دارای معیارهای لازم بودند براساس نوع پرتودرمانی برای وضوح در تجزیه و تحلیل طبقه‌بندی شدند. داده‌های هر مطالعه شامل نویسنده(ها)، سال انتشار، هدف مطالعه، روش‌شناسی و یافته‌های اصلی (مزایا و محدودیت‌ها) بود.

این پژوهش به بررسی کامل استفاده از شبکه یو در پرتودرمانی پرداخته و جنبه‌های مختلف آن را بررسی می‌کند. تجزیه و تحلیل مقالات از دستورالعمل‌های پریزما پیروی می‌کند که به‌عنوان حداقل استاندارد مبتنی بر شواهد برای گزارش در بررسی‌های سیستماتیک و متاآنالیزها عمل می‌کند. پریزما به‌ویژه بر بررسی گزارش‌هایی متمرکز است که اثر مداخله را ارزیابی می‌کند؛ اما همچنین می‌تواند پایه‌ای برای گزارش‌دهی سیستماتیک باشد.

37. Brachytherapy
38.Intensity-modulated radiation therapy (IMRT)
39. stereotactic radiosurgery(SRS)
40.Proton Therapy
41.Volumetric Modulated Arc Therapy(VMAT)
42. Targeted Radionuclide Therapy(TRT)

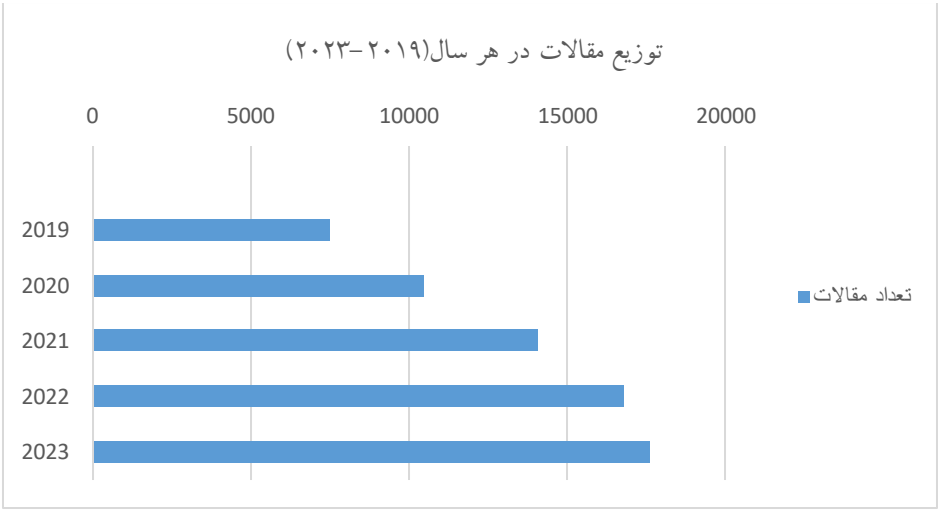
نتایج

غربالگری مقالات مطالعه‌شده

در مرحله اول، قبل از غربالگری، مقالاتی که نقد و یا نامه‌ای به سردبیر بودند حذف شدند (۳ مورد). در مرحله دوم با بررسی عناوین و چکیده مقالات، مقالاتی که بر هدف این تحقیق و روش شبکه یو تمرکز نداشتند، کنار گذاشته شدند (۳ مورد). پس از مطالعه کامل ۲۲ مقاله، ۲ مورد به دلیل نداشتن مطالعه موردی یا توصیف مجموعه داده حذف شد. در نهایت ۲۰ مقاله برای بررسی درج شد.

بررسی توصیفی کاربردهای هوش مصنوعی در رادیوتراپی

بررسی توصیفی کاربرد هوش مصنوعی در رادیوتراپی طی سال‌های ۲۰۱۹ – ۲۰۲۳ در شکل ۲ ارائه شده است. شکل ۲ نشان می‌دهد که چگونه تعداد مقالات تحقیقاتی منتشرشده سالانه بین تاریخ‌های ۱ ژانویه ۲۰۱۹ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۲۳ تغییر کرده است. طبق مطالعات بررسی‌شده بین سال‌های ۲۰۱۹ – ۲۰۲۳ در این مطالعه، بیشترین تعداد مقالات مربوط به ۲۰۲۳ است که برابر با ۱۷۶۰۰ مورد (۲۷ درصد) است. تا ۲۰۲۳ تعداد مقالات منتشرشده در زمینه هوش مصنوعی در رادیوتراپی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. افزایش مداوم در تعداد مقالات نشان‌دهنده توجه روزافزون محققان و پزشکان به کاربردهای هوش مصنوعی در رادیوتراپی است. این رشد می‌تواند به دلیل پیشرفت‌های تکنولوژیکی و نیاز به بهبود دقت و کارایی درمان باشد.



شکل۲- توزیع مقالات مربوط به کاربرد هوش مصنوعی در رادیوتراپی بین سال‌های ۲۰۱۹ – ۲۰۲۳ در پایگاه داده گوگل اسکولار

همچنین بررسی مقالات منتشرشده در حوزه کاربرد شبکه یو در رادیوتراپی نیز نشان‌دهنده افزایش تعداد آنها است. بررسی‌ها نشان‌دهنده آمار ۶۴۸ مقاله در ۲۰۱۹ و افزایش تعداد مقالات در هر سال تا ۲۰۲۳ است؛ به‌طوری که در ۲۰۲۳ تعداد مقالات به ۲۷۶۰ مورد رسیده است.

روند راهبردهای شبکه یو در رادیوتراپی

به‌طورکلی شش نوع رادیوتراپی شامل براکی‌تراپی، پرتودرمانی تعدیل‌شده با شدت (IMRT)، آرک‌تراپی با حجم تعدیل‌شده (VMAT)، جراحی رادیوتاکتیک استریوتاکتیک (SRS)، درمان رادیونوکلئید هدفمند (TRT) و پروتون‌درمانی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است و تمامی مطالعات براساس نوع رادیوتراپی مورد مطالعه طبقه‌بندی شده‌اند. روند راهبردهای شبکه یو در رادیوتراپی در قالب جدول‌های ۲ تا ۷ ارائه شده است.

روند راهبردهای براکی‌تراپی

جدول ۲ روند راهبردهای احصاءشده برای براکی‌تراپی را نشان می‌دهد.

جدول۲- روند راهبردهای شبکه یو در بهبود تکنیک پرتودرمانی براکی‌تراپی

نوع تکنیک رادیوتراپی		راهبردهای شبکه یو
براکی‌تراپی	۱	ارائه سیستمی مبتنی بر یادگیری عمیق برای براکی‌تراپی با دوز بالا
	۲	بخش‌بندی و بازسازی خودکار اپلیکاتور
	۳	کاهش زمان برنامه‌ریزی درمان
	۴	کاهش خطا
	۵	افزایش دقت
	۶	ایجاد شرایط براکی‌تراپی فردی

روند راهبردهای IMRT

روند راهبردهای تصریح‌شده شبکه یو برای IMRT در اسناد مطالعه‌شده در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول۳- روند راهبردهای شبکه یو در بهبود تکنیک پرتودرمانی **IMRT**

نوع تکنیک رادیوتراپی		راهبردهای شبکه یو
IMRT	۱	پیش‌بینی دوز
	۲	تأیید دوز
	۳	بهینه‌سازی زاویه پرتو
	۴	پتانسیل تکنیک‌های آنلاین
	۵	پیش‌بینی دقیق
	۶	سرعت بالا
	۷	کاهش خطا
	۸	ایجاد شرایط براکی تراپی فردی

روند راهبردهای SRS

روند راهبردهای تصریح‌شده شبکه یو در اسناد مطالعه‌شده برای SRS در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول۴- روند راهبردهای شبکه یو در بهبود تکنیک پرتودرمانی **SRS**

نوع تکنیک رادیوتراپی		راهبردهای شبکه یو
SRS	۱	شناسایی و جداسازی تومور
	۲	پیش‌بینی دوز حین عمل
	۳	کاهش زمان
	۴	پتانسیل توسعه طرح‌های درمانی با کیفیت بالا

روند راهبردهای VMAT

درجدول ۵ روند راهبردهای شبکه یو برای VMAT ارائه شده است.

جدول۵- روند راهبردهای شبکه یو در بهبود تکنیک پرتودرمانی **VMAT**

نوع تکنیک رادیوتراپی		راهبردهای شبکه یو
VMAT	۱	پیش‌بینی توزیع دوز
	۲	دستیابی به دقت بالا
	۳	کاهش زمان طراحی درمان
	۴	تولید شبه سی تی
	۵	پیش‌بینی نقشه شار

روند راهبردهای TRT

درجدول زیر روند راهبردهای شبکه یو برای TRT ارائه شده است.

جدول۶- روند راهبردهای شبکه یو در بهبود تکنیک پرتودرمانی **TRT**

نوع تکنیک رادیوتراپی	راهبردهای شبکه یو	
TRT	۱	مشخصه‌یابی خودکار ضایعات
	۲	پتانسیل عالی برای استفاده در تنظیمات بالینی بلادرنگ

روند راهبردهای پروتون تراپی

درجدول شماره ۷ روند راهبردهای شبکه یو برای پروتون‌تراپی ارائه شده است.

جدول۷- روند راهبردهای شبکه یو در بهبود تکنیک پرتودرمانی پروتون تراپی

نوع تکنیک رادیوتراپی	راهبردهای شبکه یو	
پروتون‌تراپی	۱	محاسبه دوز پروتون
	۲	افزایش دقت
	۳	کاهش زمان برنامه‌ریزی درمان
	۴	بهبود کیفیت تصویر
	۵	ایجاد طرح درمان مناسب

بحث

هوش مصنوعی در حوزه پرتودرمانی نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند و به‌طور گسترده در تحلیل، برنامه‌ریزی و اجرای درمان‌های رادیوتراپی به کار می‌رود. این فناوری نه تنها بهبودهای چشمگیری در دقت و اثبات درمانی ارائه داده است بلکه رویکردهای جدیدی برای بهینه‌سازی فرایندهای درمانی فراهم کرده است. در این تحقیق، مقالات مختلف در بازه زمانی ۲۰۱۹ – ۲۰۲۳ در حوزه کاربرد شبکه یو در حوزه‌های مختلف پرتودرمانی مورد بررسی قرار گرفتند. جنبه‌های مختلف هر مقاله از جمله روش پیشنهادی، مزایا و معایب هر روش به‌طور کامل مورد ارزیابی قرار گرفت.

مطالعاتی که تاکنون درباره کاربرد هوش مصنوعی و به‌ویژه شبکه یو در حوزه پرتودرمانی صورت گرفته است، نشان‌دهنده محدودیت‌های این شبکه در بعضی از جنبه‌ها است؛ به‌طور مثال در مطالعه Ahn S et al.(2021) (Ahn, Kim et al. 2021) علیرغم پیش‌بینی توزیع دوز، امکان ایجاد طرح درمان از روی توزیع دوز فراهم نشده است. بنابراین نیاز است در آینده مطالعات به این سمت برود که ایجاد طرح درمان برای تکنیک‌های پیچیده‌ای مانند VMAT و IMRT فراهم شود و این روش به صورت یک تکنیک تمام خودکار ارائه شود تا از خطاهای انسانی جلوگیری شود و در زمان درمان صرفه‌جویی شود.

در تعدادی از مطالعات، محدودیت‌های شبکه یو در قطعه‌بندی برخی از انواع تومورها نشان داده شده است؛ به‌عنوان مثال در مطالعه Zhao Y et al. (2019) (Zhao, Gafita et al. 2020) برای قطعه‌بندی متاستازهای غدد لنفاوی و تومورهای موضعی دقت پایین را نشان دادند. همچنین در مطالعه Lu et al.(2021) (Lu, Xiao et al. 2021) نیز به محدودیت شبکه یو پیشنهادی در قطعه‌بندی تومورهای مغزی کوچک اشاره دارد که این موضوع می‌تواند به محدودیت تعداد داده در این حوزه و از طرفی عدم بهینه‌سازی مناسب ساختار شبکه یو برای آن برگردد. بنابراین نیاز است در آینده به تشخیص تومورهای خاص توجه بیشتری شود و محققان به سراغ اصلاح و بهبود ساختار شبکه یو در جهت ارائه عملکرد مناسب آن بروند.

چالشی که در برخی مطالعات وجود دارد عدم عمومیت شبکه برای وظایف مشابه در حوزه قطعه‌بندی اپلیکاتورها در حوزه براکی‌تراپی است؛ به‌عنوان نمونه در مطالعه Hu H et al.(2021) (Hu, Yang et al. 2021) شبکه تنها قادر به جداسازی تنها دو نوع اپلیکاتور است. برای به کارگیری تکنولوژی‌های هوش مصنوعی در حوزه پرتودرمانی نیاز است که شبکه جهت عمومیت بیشتر توسعه پیدا کند تا مزایای اقتصادی بیشتری را برای مراکز کلینیکی ایجاد کند و از طرفی سبب صرفه جویی بیشتر در زمان شود.

با توجه به مطالعات صورت‌گرفته در این مقاله در حوزه کاربرد هوش مصنوعی در پرتودرمانی، اهمیت اصلی هوش مصنوعی در پرتودرمانی به شرح ذیل است:

۱. پیش‌بینی دقیق توزیع دوز: از آنجا که دقت در تعیین توزیع دوز مناطق حساس مورد نیاز است، هوش مصنوعی با استفاده از الگوریتم‌های پیچیده و شبکه‌های عصبی مانند U-Net، توانایی پیش‌بینی دقیق تراکم دوز در اعضای حساس را فراهم می‌کند.

۲. بهبود برنامه‌ریزی درمانی: با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی، هوش مصنوعی می‌تواند برنامه‌ریزی درمانی را به‌طور خودکار و بهینه‌تر انجام دهد، که این امر به کاهش زمان مورد نیاز برای برنامه‌ریزی و بهبود نتایج درمانی منجر می‌شود.

۳. تنظیمات درمانی شخصی: هوش مصنوعی به تحلیل دقیق پارامترهای بیماری، مشخصات بیمار و وضعیت سلامت کمک می‌کند تا درمان‌های شخصی‌سازی شده‌ای ارائه شود که به توسعه توزیع دقیق دوز و کاهش عوارض جانبی کمک می‌کند.

۴. تشخیص و پیش‌بینی بیماری: از آنجا که AI قادر به تحلیل دقیق تصاویر پزشکی و تشخیص آسیب‌های زیرساختی است، می‌تواند در تشخیص سریع‌تر و دقیق‌تر بیماری‌ها مانند تشخیص متاستازهای مغزی در SRS به کار گرفته شود.

۵. کاهش خطاها و بهبود کیفیت: با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی، احتمال انسانی خطا در برنامه‌ریزی و اجرای درمان‌های رادیوتراپی کاهش می‌یابد که این موضوع به بهبود کیفیت درمان و افزایش موفقیت درمانی منجر می‌شود.

به‌طور خلاصه، هوش مصنوعی به‌عنوان یک ابزار قدرتمند تحقیقاتی و بالینی به بهبود عملکرد و دقت در درمان‌های رادیوتراپی کمک بسیار زیادی می‌کند و در آینده نیز پتانسیل‌های بسیاری برای استفاده گسترده‌تر دارد. در مطالعات، استفاده از شبکه U-Net در پرتودرمانی به‌عنوان یک روش پرکاربرد و مؤثر شناخته شده است.

پیش‌بینی روندهای آینده

در این بخش با بررسی و تحلیل راهبردهای شبکه U در حوزه‌های مختلف پرتودرمانی، روندهای آتی کاربردهای شبکه U به شرح ذیل ارائه می‌شود:

براکی‌تراپی:

در آینده، دقت بازسازی خودکار اپلیکاتور می‌تواند افزایش پیدا کند و انواع بیشتری از اپلیکاتورها مورد مطالعه قرار بگیرد. با استفاده از یادگیری عمیق، دوزیمتری فردی بهبودیافته و زمان برنامه‌ریزی درمان کاهش می‌یابد. احتمال می‌رود دقت دیجیتال‌سازی خودکار سوزن‌ها بهبود پیدا کند و روش‌های ثبت تصویر برای MR-IGABT توسعه یابند.

:IMRT

انتظار می‌رود بهینه‌سازی زاویه پرتو با استفاده از یادگیری عمیق انجام گیرد، تکنیک‌های آنلاین برای پیش‌بینی دوز در زمان واقعی توسعه یابند و ترجیحات پزشک در پیش‌بینی دوز ادغام شود. پیش‌بینی دوز برای پیکربندی‌های پیچیده‌تر پرتو می‌تواند بهبود یابد و دقت محاسبات دوز افزایش پیدا کند. همچنین ابزارهای تأیید دوز مبتنی بر یادگیری عمیق توسعه پیدا می‌کنند.

:SRS

احتمال می‌رود دقت در تشخیص و تقسیم‌بندی تومورهای کوچک‌تر بهبودیافته و نرخ مثبت کاذب در مقایسه با پزشکان انسانی کاهش یابد. همچنین ارزیابی به دیگر تومورهای مغزی یا ضایعات عروقی گسترش پیدا کند و دقت کانتورینگ افزایش یابد. سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری مبتنی بر هوش مصنوعی توسعه یابد و پیش‌بینی دوز در خارج از منطقه هدف برای گامانایف بهبود یابد.

:VMAT

انواع دوز قابل پیش‌بینی احتمالا گسترش یافته و دقت پیش‌بینی دوز افزایش می‌یابد. امکان ایجاد برنامه درمانی کامل براساس توزیع دوز پیش‌بینی شده می‌تواند فراهم شود. تنوع و حجم داده‌های آموزشی افزایش یافته و عملکرد GPU برای کاهش زمان پردازش بهبود یابد. روش‌های سازگار با MRI-LINAC توسعه می‌یابد و تعیین حجم مورد علاقه (VOI) بهبود پیدا می‌کند.

:TRT

مشخصه‌یابی خودکار ضایعات در PET/CT می‌تواند بهبود یابد و پیشرفت‌هایی در دوزیمتری رادیونوکلئید وکسلی حاصل شود. احتمال می‌رود مجموعه داده‌های آموزشی گسترش یابد و پذیرش

الگوریتم‌های یادگیری عمیق در عمل بالینی تسریع شود. دقت و سرعت در تشخیص و تقسیم‌بندی ضایعات بهبود، و روش‌های ترکیبی یادگیری عمیق و روش‌های سنتی توسعه پیدا می‌کنند.

براساس آمار ارائه شده در پژوهش حاضر، می‌توان روند آینده کاربرد هوش مصنوعی در حوزه‌های مختلف رادیوتراپی را به شرح زیر تحلیل کرد:

تعداد مقالات از **۷۵۲۰ مقاله در ۲۰۱۹** به **۱۷۶۰۰ مقاله در ۲۰۲۳** (تا نیمه سال) افزایش یافته است. این رشد نشان‌دهنده افزایش علاقه و سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه فناوری‌های هوش مصنوعی در رادیوتراپی است. انتظار می‌رود که این روند ادامه یابد و تعداد مقالات بیشتری در سال‌های آینده منتشر شود.

U-Net به دلیل ساختار خود که شامل لایه‌های کانولوشنی و اتصالات پرشی است، قادر به تشخیص دقیق و تقسیم‌بندی اجزای مختلف تصاویر پزشکی مانند تصاویر CT و MRI است. این ویژگی باعث می‌شود که کارهای مختلفی از جمله تقسیم‌بندی اپلیکاتورها در براکی‌تراپی و شناسایی متاستازهای مغزی در SRS به خوبی انجام شود؛ به‌عنوان نمونه هو و همکارانش از U-Net در تصاویر سی‌تی براکی‌تراپی رحم برای جداسازی اپلیکاتورها استفاده کردند (Hu et al., 2021). بااین‌حال، این روش نیز با چالش‌هایی همچون تعداد زیاد پارامترها، هزینه محاسباتی زیاد و حساسیت به کمی‌سازی پارامتر روبه‌رو است. همچنین هو و همکارانش از این شبکه برای شناسایی و جداسازی متاستازهای مغزی استفاده کردند؛ اما چالش‌هایی نیز مطرح شدند. در رادیونوکلئیددرمانی هدفمند، هوش مصنوعی برای شناسایی خودکار ضایعات مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ به‌عنوان نمونه زائو و همکارانش از شبکه یو برای تقسیم ضایعه در Ga-PSMA-11 PET/CT۶۸ استفاده کردند و به نتایج موفقیت‌آمیزی دست یافتند (Zhao et al., 2019).

با استفاده از شبکه یو، می‌توان به‌طور خودکار و سریع‌تر از آنچه که با روش‌های سنتی امکان‌پذیر است، تصاویر پزشکی را تحلیل کرد. این امر منجر به کاهش زمان مورد نیاز برای برنامه‌ریزی و اجرای درمان‌های پرتودرمانی می‌شود. همچنین یو قادر به پیش‌بینی دقیق توزیع دوز در اعضای حساس بدن است. این ویژگی باعث می‌شود که برنامه‌های درمانی شخصی‌سازی‌شده‌ای برای بیماران طراحی شود که دقیقاً به اعضای مورد نیاز دوز تابش داده می‌شود؛ به‌عنوان نمونه نگوین دی و

همکارانش یک شبکه یو اصلاح‌شده برای پیش‌بینی توزیع بهینه دوز تابش در بیماران مبتلا به سرطان پروستات در روش IMRT پیشنهاد دادند (Nguyen et al., 2019)؛ اما از جمله محدودیت‌های این مطالعه، عدم کارایی برای پیکربندی‌های پیچیده‌تر پرتو است؛ بنابراین نیاز است ساختار شبکه به‌گونه‌ای اصلاح شود و از طرفی داده‌های بیشتری که مربوط به پیکربندی‌های پیچیده‌تر هستند، جمع‌آوری شود تا به این نیاز پاسخ داده شود.

استفاده از شبکه یو باعث کاهش خطای انسانی در برنامه‌ریزی و اجرای درمان‌های رادیوتراپی می‌شود. این شبکه قادر به انجام فرایندهای خودکار یا نیمه‌خودکار است که باعث تصمیم‌گیری دقیق‌تر و کاهش وابستگی به تجربه فردی پزشک می‌شود. با استفاده از شبکه یو، بهره‌وری در استفاده از منابع پزشکی بهبود می‌یابد؛ زیرا فرایندهای تحلیلی کارآمدتر و سریع‌تر انجام می‌شوند که این می‌تواند هزینه‌های درمانی را نیز کاهش دهد. این به معنای کاهش هزینه‌های مربوط به درمان عوارض و نیاز به تصاویر اضافی برای تشخیص دوباره است که می‌تواند هزینه‌های بیمار را کاهش دهد. در آینده می‌توان درباره ارزیابی نقش تکنولوژی مبتنی بر شبکه یو در محیط کلینیکی به‌منظور کاهش هزینه های درمانی بیمار مطالعات بیشتری انجام داد و این موضوع را در چندین مرکز کلینیکی مورد بررسی قرار داد.

شبکه یو توانایی ادغام با تکنولوژی‌های دیگر مانند حسگرهای پیشرفته، داده‌های بیومارکر و سیستم‌های مانیتورینگ پزشکی را دارد. این ادغام می‌تواند تجربه پرتودرمانی را برای بیماران بهبود دهد و به پزشکان در تصمیم‌گیری‌های پیچیده کمک کند.

با توجه به این نکات، ارتقای شبکه‌های یونت و بهینه‌سازی آنها می‌تواند به‌عنوان پلتفرم پایه برای توسعه و ارتقای سیستم‌های هوشمند در پرتودرمانی و دیگر حوزه‌های پزشکی عمل کند که نه‌تنها به بهبود نتایج درمانی کمک می‌کند بلکه از نگرانی‌های پزشکان نیز مراقبت می‌کند.

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی، استفاده از شبکه یو در پرتودرمانی، مزایا و محدودیت‌های خودش را دارد که لازم است این نکات در انتخاب و اجرای مناسب این روش در نظر گرفته شود.

استفاده از شبکه یو در پرتودرمانی می‌تواند در تمامی مراحل و جوانب این فرایند مفید باشد؛ از جمله:

۱. برنامه‌ریزی درمان: با تحلیل دقیق تصاویر پیش از درمان، U-Net به شناسایی مناطق و تنظیم دقیق پرتودوزی کمک می‌کند.

۲. مانیتورینگ درمان: این شبکه تغییرات در نواحی درمان را در طول درمان پیگیری، و به تنظیم پویای درمان کمک می‌کند.

۳. ارزیابی پس از درمان: شبکه یو تحلیل دقیق تغییرات پس از درمان را فراهم، و به تصمیم‌گیری برای درمان‌های تکمیلی کمک می‌کند.

۴. افزایش دقت و کارایی: بهبود دقت و کاهش خطاها در تشخیص و درمان پرتودوزی‌ها که می‌تواند هزینه‌های بیمار را کاهش دهد.

شبکه یو با توانایی خود در تحلیل دقیق تصاویر پزشکی، می‌تواند در تمامی مراحل پرتودرمانی از برنامه‌ریزی تا ارزیابی پس از درمان کمک کند و این به‌طور مستقیم و غیرمستقیم به بهبود نتایج درمانی و کاهش هزینه‌های بیمار کمک می‌کند.

یک مانع مهم در استفاده از رویکردهای یادگیری عمیق و به‌ویژه یو در محیط‌های کلینیکی در محدودیت دادهها و عدم عمومیت مدل پیش‌بینی‌کننده نهفته است. این موضوع نیاز به ایجاد سازوکاری برای اکتساب و گردآوری داده‌ها در مراکز کلینیکی دارد. در آینده نیاز است درباره این موضوع تحقیقات بیشتری صورت گیرد و ملاحضات اجرای کلینیکی این شبکه تعیین و اجرا شود. از دیگر محدودیت‌های شبکه یو، سنگین بودن برنامه آن از نظر میزان حجم حافظه موردنیاز به‌ویژه در زمان اجرای مدل‌های سه‌بعدی سبب دشواری اجرای برنامه‌ها می‌شود. ازاین‌رو بیشتر مطالعات تاکنون بر ساختارهای دوبعدی شبکه یو تمرکز کرده‌اند. درحالی‌که تحلیل سه‌بعدی تصاویر پزشکی و ارائه خروجی سه‌بعدی می‌تواند کمک بیشتری به درک بیماری به‌ویژه در موارد تشخیص سرطان توسط پزشک و رادیولوژیست کند. بنابراین نیاز است در آینده مطالعات به سمتی رود که نحوه اجرای مدل‌های سه‌بعدی در عین کاهش حجم آنها ارزیابی شود.

در آینده می‌توان مطالعاتی درباره ارزیابی عملی و دقیق کاهش هزینه‌های درمانی در محیط درمانی با استفاده از شبکه یو داشت و با گزارش آمار و ارقام مربوط به کاهش هزینه‌های درمانی در این روش، زمینه را برای متقاعدسازی مراکز درمانی جهت استفاده از این روش ایجاد کرد. همچنین با

توسعه بیشتر شبکه یو و بهینه‌سازی آن می‌توان کیفیت تشخیص و درمان را بیشتر بهبود بخشید. مطالعه درباره حوزه‌های مختلف کاربرد شبکه یو در پرتودرمانی در این مقاله به ارزیابی نقاط قوت و ضعف این شبکه کمک می‌کند و می‌تواند به متخصصان این حوزه برای تمرکز بر چالش‌های موجود به‌منظور رفع آنها کمک کند.

در آینده با ایجاد تعامل بین پزشکان متخصص در حوزه پرتودرمانی و متخصصان حوزه هوش مصنوعی می‌توان به شناسایی دقیق‌تر چالش‌های حوزه پرتودرمانی و یافتن راه حل مناسب برای رفع آنها کمک کرد. به‌علاوه، این تعامل سبب درک بهتر نقاط قوت و ضعف عملکرد تکنولوژی‌های هوش مصنوعی در محیط کلینیکی‌شده که می‌تواند توسط متخصصان هوش مصنوعی مورد ارزیابی دقیق‌تر قرار گیرد. همچنین نیاز است در آینده سازوکاری جهت آموزش متخصصان درمان با تکنولوژی‌های هوشمند این حوزه صورت گیرد و آگاه‌سازی درباره ظرفیت‌های هوش مصنوعی و کاربری آن در محیط کلینیکی انجام شود.

در این مقاله، ارزیابی مقالات در چهارچوب زمانی انتخاب‌شده انجام شد. با توجه به بررسی‌ها درباره جنبه‌های مختلف هر مقاله، می‌توان کارایی تکنیک‌های مختلف هوش مصنوعی را در انواع مختلف پرتودرمانی ارزیابی کرد. این مطالعه امکان انتخاب راه حل مناسب برای چالش‌های موجود در زمینه‌های مختلف پرتودرمانی و همچنین توسعه الگوریتم‌های موجود را فراهم می‌کند.

References

Moradi H. Future research, concepts and methods *The approach* 2014;36-50:45.

Minaei H, and Hadinejad F, the research process of American threats against the Islamic Republic of Iran *Defence future research*, 2017; 7-28:3(8)

Garson A Jr, Levin SA. 2001 Ten 10-year trends for the future of healthcare: implications for academic health centers *Ochsner J* 3(1):10-5.

Verschuuren, M., H. B. Hilderink and R. A. Vonk 2020 The Dutch Public Health Foresight Study 2018: an example of a comprehensive foresight exercise *European journal of public health* 30(1): 30-35

Gordon A. 2010 A DEFT Approach to Trend-Based Foresight. *Foresight: The International Journal of Applied Forecasting* 13-18.

Stahl BC, Antoniou J, Bhalla N, Brooks L, Jansen P, Lindqvist B, Kirichenko A, Marchal S, Rodrigues R, Santiago N and Warso Z 2023 A systematic

review of artificial intelligence impact assessments *Artificial Intelligence Review* 56(11) 12799-12831

Bindra S and Jain R 2024 Artificial intelligence in medical science: a review. *Irish Journal of Medical Science* (1971-) 193(3) 1419-29.

Mäkitie, Antti A et al. 2023 Artificial Intelligence in Head and Neck Cancer: A Systematic Review of Systematic Reviews *Advances in therapy* 40(8) 3360-3380

S. Alshuhri M, Al-Musawi S G, Al-Alwany A A, Uinarni H, Rasulova I, Rodrigues P, Alkhafaji A T, Alshanberi A M, Alawadi A H and Abbas A H 2024 Artificial intelligence in cancer diagnosis: Opportunities and challenges *Pathology - Research and Practice* 253 154996

Li J-w, Sheng D-l, Chen J-g, You C, Liu S, Xu H-x and Chang C 2023a Artificial intelligence in breast imaging: potentials and challenges *Physics in Medicine & Biology* 68 23TR01

Dashtbani Moghari M, Sanaat A, Young N, Moore K, Zaidi H, Evans A, Fulton R R and Kyme A Z 2023 Reduction of scan duration and radiation dose in cerebral CT perfusion imaging of acute stroke using a recurrent neural network *Physics in Medicine & Biology* 68 165005

Ozaltin O, Yeniay O, and Subasi A 2023 Artificial intelligence-based brain hemorrhage detection. *In Accelerating strategic changes for digital transformation in the healthcare industry* 179-199

Mancosu P, Lambri N, Castiglioni I, Dei D, Iori M, Loiacono D, Russo S, Talamonti C, Villaggi E, Scorsetti M and Avanzo M 2022 Applications of artificial intelligence in stereotactic body radiation therapy *Physics in Medicine & Biology* 67

Jamtheim Gustafsson C, Swärd J, Adalbjörnsson S, Jakobsson A and Olsson L 2020 Development and evaluation of a deep learning based artificial intelligence for automatic identification of gold fiducial markers in an MRI-only prostate radiotherapy workflow *Physics in Medicine & Biology* 65

Tanaka H, Chiu S-W, Watanabe T, Kaoku S and Yamaguchi T 2019 Computer-aided diagnosis system for breast ultrasound images using deep learning *Ultrasound in Medicine & Biology* 45 S4

Tien H-J, Yang H-C, Shueng P-W and Chen J-C 2021 Cone-beam CT image quality improvement using Cycle-Deblur consistent adversarial networks (Cycle-Deblur GAN) for chest CT imaging in breast cancer patients *Scientific reports* 11 1133

Götz T I, Schmidkonz C, Chen S, Al-Baddai S, Kuwert T and Lang E W 2020 A deep learning approach to radiation dose estimation *Physics in Medicine & Biology* 65 035007

Niecikowski A, Gupta S, Suarez G, Kim J, Chen H, Guo F, Long W and Deng J 2022 A Multi-Modal Deep Learning-Based Decision Support System

for Individualized Radiotherapy of Non-Small Cell Lung Cancer *International Journal of Radiation Oncology*Biology*Physics* 114 e100-e1

Shur J D, Doran S J, Kumar S, Ap Dafydd D, Downey K, O'Connor J P B, Papanikolaou N, Messiou C, Koh D M and Orton M R 2021 Radiomics in Oncology: A Practical Guide *Radiographics* 41 1717-32

Siddique S and Chow J C L 2020 Artificial intelligence in radiotherapy *Rep Pract Oncol Radiother* 25 656-66

Lee MC, Wang SY, Pan CT, Chien MY, Li WM, Xu JH, Luo CH, Shiue YL 2023 Development of Deep Learning with RDA U-Net Network for Bladder Cancer Segmentation *Cancers (Basel)* 15(4):1343

Wang B and Yang C 2024 Liver tumor segmentation method based on U-Net architecture: a review *EAI Endorsed Transactions on e-Learning* 10

Kihira S, Mei X, Mahmoudi K, Liu Z, Dogra S, Belani P, Tsankova N, Hormigo A, Fayad ZA, Doshi A and Nael K 2022 U-Net Based Segmentation and Characterization of Gliomas *Cancers (Basel)* 14(18)

Boulanger M, Nunes JC, Chourak H, Largent A, Tahri S, Acosta O, De Crevoisier R, Lafond C, Barateau A 2021 Deep learning methods to generate synthetic CT from MRI in radiotherapy: A literature review *Physica Medica* 89:265-81

Yan C, Guo B, Keller LM, Suh JH, Xia P 2023 Dosimetric Quality of Artificial Intelligence Based Organ at Risk Segmentation *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics* 117(2) 493

Hu H, Yang Q, Li J, Wang P, Tang B, Wang X and Lang J 2021 Deep learning applications in automatic segmentation and reconstruction in CT-based cervix brachytherapy *Journal of contemporary brachytherapy* 13 325-30

Mao X, Pineau J, Keyes R and Enger S A 2020 RapidBrachyDL: rapid radiation dose calculations in brachytherapy via deep learning *International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics* 108 802-12

Jung H, Shen C, Gonzalez Y, Albuquerque K and Jia X 2019 Deep-learning assisted automatic digitization of interstitial needles in 3D CT image based high dose-rate brachytherapy of gynecological cancer *Physics in Medicine & Biology* 64 215003

Ecker S, Zimmermann L, Heilemann G, Niatsetski Y, Schmid M, Sturdza A E, Knoth J, Kirisits C and Nesvacil N 2022 Neural network-assisted automated image registration for MRI-guided adaptive brachytherapy in cervical cancer *Zeitschrift für Medizinische Physik* 32 488-99

Barragán-Montero A M, Nguyen D, Lu W, Lin M-H, Norouzi-Kandalan R, Geets X, Sterpin E and Jiang S 2019 Three-dimensional dose prediction

for lung IMRT patients with deep neural networks: robust learning from heterogeneous beam configurations *Medical physics* 46 3679-91

Nguyen D, Long T, Jia X, Lu W, Gu X, Iqbal Z and Jiang S 2019 A feasibility study for predicting optimal radiation therapy dose distributions of prostate cancer patients from patient anatomy using deep learning *Scientific reports* 9 1076

Xing Y, Nguyen D, Lu W, Yang M and Jiang S 2020 A feasibility study on deep learning-based radiotherapy dose calculation *Medical physics* 47 753-8

Bohara G, Sadeghnejad Barkousaraie A, Jiang S and Nguyen D 2020 Using deep learning to predict beam-tunable Pareto optimal dose distribution for intensity-modulated radiation therapy *Medical physics* 47 3898-912

Oh K, Gronberg M P, Netherton T J, Sengupta B, Cardenas C E, Court L E and Ford E C 2023 A deep-learning-based dose verification tool utilizing fluence maps for a cobalt-60 compensator-based intensity-modulated radiation therapy system *Physics and Imaging in Radiation Oncology* 26 100440

Lu S L, Xiao F R, Cheng J C, Yang W C, Cheng Y H, Chang Y C, Lin J Y, Liang C H, Lu J T, Chen Y F and Hsu F M 2021 Randomized multi-reader evaluation of automated detection and segmentation of brain tumors in stereotactic radiosurgery with deep neural networks *Neuro Oncol* 23 1560-8

Zhang B, Babier A, Chan T C Y and Ruschin M 2023 3D dose prediction for Gamma Knife radiosurgery using deep learning and data modification *Physica Medica* 106 102533

Ahn S H, Kim E, Kim C, Cheon W, Kim M, Lee S B, Lim Y K, Kim H, Shin D, Kim D Y and Jeong J H 2021 Deep learning method for prediction of patient-specific dose distribution in breast cancer *Radiat Oncol* 16 154

Ma M, Kovalchuk N, Buyyounouski M K, Xing L and Yang Y 2019 Incorporating dosimetric features into the prediction of 3D VMAT dose distributions using deep convolutional neural network *Physics in Medicine & Biology* 64 125017

Largent A, Barateau A, Nunes J C, Mylona E, Castelli J, Lafond C, Greer P B, Dowling J A, Baxter J, Saint-Jalmes H, Acosta O and de Crevoisier R 2019 Comparison of Deep Learning-Based and Patch-Based Methods for Pseudo-CT Generation in MRI-Based Prostate Dose Planning *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 105 1137-50

Ma L, Chen M, Gu X and Lu W 2020 Deep learning-based inverse mapping for fluence map prediction *Phys Med Biol* 65

Zhao Y, Gafita A, Vollnberg B, Tetteh G, Haupt F, Afshar-Oromieh A, Menze B, Eiber M, Rominger A and Shi K 2020 Deep neural network for

automatic characterization of lesions on (68)Ga-PSMA-11 PET/CT *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 47 603-13

Li Z, Fessler J A, Mikell J K, Wilderman S J and Dewaraja Y K 2022 DblurDoseNet: A deep residual learning network for voxel radionuclide dosimetry compensating for single-photon emission computerized tomography imaging resolution *Med Phys* 49 1216-30

Thummerer A, Zaffino P, Meijers A, Marmitt G G, Seco J, Steenbakkers R, Langendijk J A, Both S, Spadea M F and Knopf A C 2020 Comparison of CBCT based synthetic CT methods suitable for proton dose calculations in adaptive proton therapy *Phys Med Biol* 65 095002

Zimmermann L, Knäusl B, Stock M, Lütgendorf-Caucig C, Georg D and Kuess P 2022 An MRI sequence independent convolutional neural network for synthetic head CT generation in proton therapy *Zeitschrift für Medizinische Physik* 32 218-27

Lalonde A, Winey B, Verburg J, Paganetti H and Sharp G C 2020 Evaluation of CBCT scatter correction using deep convolutional neural networks for head and neck adaptive proton therapy *Phys Med Biol* 65