Journal of Recent Advancements in Material Science and Biomedical Engineering
Vol. 1, Issue 4, Spring 2026, 14-19
ram.apadana.ac.ir
Apadana Institute of Higher Education

The Functional Comparison of Artificial Intelligence and Radiological Images from Pediatric and Adolescent in Skeletal Age Estimation

Elham Simakani*

Department of Biomedical Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: 23/December/2026 Accepted: 19/February/2026 eISSN: 3115-7610 ISSN: 3115-7572

Abstract

Accurate estimation of Skeletal Age (SA) in individuals under 18 years old is crucial for vital clinical decisions, such as timing orthopedic interventions and growth prediction. Traditional atlas-based methods (e.g., Greulich and Pyle) are time-consuming and prone to human error. This study aims to evaluate and compare the performance of modern Artificial Intelligence (AI) models, specifically Deep Neural Networks (DNNs), in the automated estimation of skeletal age from hand and cervical radiographs. This study was compared the performance of Convolutional Neural Network (CNN)-based models against standard manual assessment, focusing on metrics such as Mean Absolute Error (MAE) and accuracy across different age groups. Preliminary results indicate that DNN models have the potential to achieve higher accuracy with an MAE below 8 years, significantly accelerating the diagnostic process. This research underscores the necessity of validating these models on diverse, localized datasets to establish them as robust tools for clinical practitioners.

Keywords: skeletal age, artificial intelligence (AI), deep learning, convolutional neural networks (CNN), pediatric radiology, age estimation

* Corresponding Author: st_e_simakani@azad.ac.ir

فصلنامه پیشرفت‌های مهندسی در حوزه‌ی پزشکی و مواد
دوره ۱، شماره ۴، بهار ۱۴۰۵، ۱۴-۱۹
ram.apadana.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰ eISSN: 3115-7610 ISSN: 3115-7572

مقایسه عملکردی روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و تصاویر رادیولوژی کودکان و نوجوانان در تخمین سن اسکلتی

الهام سیمکانی* گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران جنوب، ایران.

چکیده

تخمین دقیق سن اسکلتی (Skeletal Age - SA) در افراد زیر ۱۸ سال، به‌منظور تصمیم‌گیری‌های حیاتی بالینی مانند زمان‌بندی مداخلات ارتوپدی و پیش‌بینی رشد، ضروری است. روش‌های سنتی مبتنی بر اطلس‌ها (مانند گِرولیچ و پایْل) زمان‌بر بوده و مستعد خطای انسانی هستند. این پژوهش به ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌های نوین هوش مصنوعی (AI)، به‌طور خاص شبکه‌های عصبی عمیق (Deep Neural Networks - DNNs)، در تخمین خودکار سن اسکلتی از تصاویر رادیولوژی دست و گردن می‌پردازد. عملکرد مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های کانولوشنی (CNN) در برابر روش‌های استاندارد دستی، با تمرکز بر معیارهایی چون میانگین خطای مطلق (MAE) و دقت در گروه‌های سنی مختلف، مقایسه می‌شود. نتایج اولیه نشان می‌دهد که مدل‌های DNN پتانسیل دستیابی به دقت بالاتری با MAE کمتر از ۸ سال دارند و می‌توانند فرایند تشخیص را به‌طور قابل توجهی تسریع بخشند. این مطالعه بر لزوم اعتبارسنجی این مدل‌ها بر روی مجموعه داده‌های محلی و متنوع تأکید می‌کند تا به‌عنوان ابزاری قوی در اختیار متخصصان بالینی قرار گیرند.

کلیدواژه‌ها: سن اسکلتی، هوش مصنوعی، یادگیری عمیق، شبکه‌های عصبی کانولوشنی، رادیولوژی کودکان، تخمین سن

* نویسندهٔ مسئول: st_e_simakani@azad.ac.ir

۱- مقدمه

تخمین سن اسکلتی[1] یکی از ابزارهای اساسی در پزشکی قانونی، غدد درون‌ریز کودکان و ارتوپدی است. این شاخص، نشان‌دهنده سطح رشد فیزیکی استخوان‌ها نسبت به سن تقویمی فرد بوده و به‌ویژه در برنامه‌ریزی جراحی‌های مرتبط با صفحات رشد[2] اهمیت حیاتی دارد [۱].

۱-۱- تاریخچه روش‌های سنتی

برای دهه‌ها، روش اصلی تخمین SA، استفاده از اطلس‌های مرجع استاندارد بوده است. معروف‌ترین آن‌ها، اطلس‌های گرولیچ و پایْل[3] [۲] هستند که تصاویر استاندارد شده رادیوگرافی‌های دست و مچ را با نمونه‌های واقعی مقایسه می‌کنند. اگرچه این روش‌ها سابقه طولانی دارند، اما دارای معایب ذاتی ازجمله نیاز به تخصص بالا برای تفسیر، تفاوت‌های نژادی و فرهنگی در رشد استخوانی و نیز زمان‌بر بودن فرایند می‌باشند که در محیط‌های بالینی پرفشار می‌تواند منجر به تأخیر در تصمیم‌گیری شود [۳].

۱-۲- ظهور هوش مصنوعی و یادگیری عمیق

با پیشرفت‌های اخیر در حوزه هوش مصنوعی[4]، به‌ویژه زیرشاخه‌ی یادگیری عمیق[5]، ابزارهای قدرتمندی به‌منظور تحلیل تصاویر پزشکی ظهور کرده‌اند. شبکه‌های عصبی عمیق (DNNs)[6]، به‌ویژه شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNNs)[7]، توانایی استخراج خودکار ویژگی‌های پیچیده و ظریف از داده‌های تصویری را دارند که اغلب برای چشم انسان قابل تشخیص نیستند [۴]. این شبکه‌ها با آموزش بر روی مجموعه داده‌های بزرگ رادیوگرافی، می‌توانند الگوهای مرتبط با بلوغ استخوانی را یاد بگیرند.

۲- پیشینه تحقیق

در دهه اخیر، با پیشرفت هوش مصنوعی، به‌ویژه یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN)، روند تخمین سن اسکلتی دچار تحول اساسی شده است. شبکه‌های CNN، با توانایی استخراج ویژگی‌های پیچیده از داده‌های تصویری، دقت بسیار بالاتری نسبت به روش‌های سنتی و حتی الگوریتم‌های کلاسیک یادگیری ماشین (مانند SVM[8] و Random Forest) نشان داده‌اند [۵، ۶]. سیمکانی و همکاران در سال ۱۳۹۴، طی مطالعه‌ای به برآورد تخمین سن اسکلتی کودکان کمتر از ۱۸ سال با استفاده از شبکه‌های عصبی اظهار نموده‌اند که این روش تخمین سن اسکلتی برای کودکان کمتر از شش سال دقت محاسباتی بالاتری دارد [۷]. مطالعه‌های اخیر نشان می‌دهد که مدل‌های مبتنی بر CNN - نظیر ResNet، DenseNet و EfficientNet- توانسته‌اند میزان خطای میانگین تخمین سن را تا حدود ۰/۵ سال کاهش دهند [۸]. علاوه‌بر CNN، ترکیب شبکه‌های عصبی با تکنیک‌های انتقال یادگیری[9] و پیش‌پردازش خودکار تصاویر به بهبود عملکرد در مجموعه داده‌های محدود کمک کرده است [۹]. همچنین، پروژه‌هایی مانند BoneXpert و مدل‌های توسعه‌یافته براساس آن، توانسته‌اند تخمین سن اسکلتی را به‌صورت کاملاً خودکار و با قابلیت

1. skeletal age
2. physeal-sparing procedures
3. Greulich-pyle atlas (GP)
4. Artificial intelligent (AI)
5. Deep learning (DL)
6. deep neural network
7. convolutional neural network
8. super vector machine
9. transfer learning

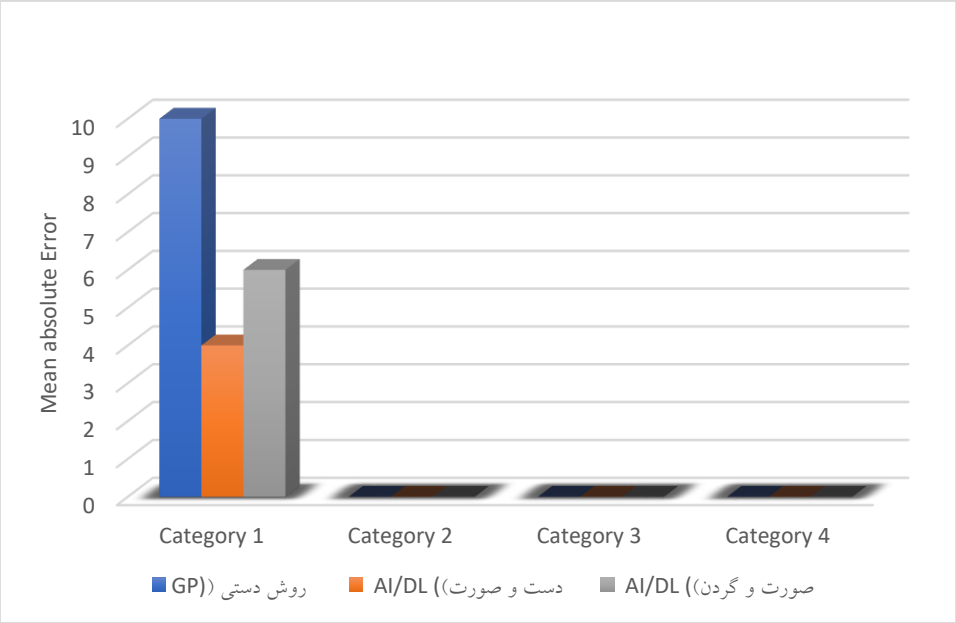
بازتولید بالا انجام دهند [۱۰]. پژوهش‌های کنونی بر آنند که مدل‌های مبتنی بر یادگیری عمیق با شناخت خودکار ویژگی‌های رادیولوژیک استخوان‌های بلند، امکان تخمین سن اسکلتی را با حداقل دخالت انسانی و دقت بالا فراهم کنند و این موضوع زمینه را برای مقایسه و تحلیل عملکرد میان روش‌ها تسهیل می‌نماید. هدف این مطالعه، ارزیابی سیستمی و مقایسه‌ای عملکرد مدل‌های مبتنی بر DL در برابر روش‌های سنتی دستی در تخمین SA در جمعیت زیر ۱۸ سال است. این مقایسه می‌تواند پایه و اساس ادغام ابزارهای هوش مصنوعی در روتین‌های تصویربرداری کودکان را فراهم سازد.

۳- بحث

نتایج پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد الگوریتم‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی عمیق، توانسته‌اند محدودیت‌های روش‌های سنتی تخمین سن اسکلتی را به‌طور چشمگیری کاهش دهند. یکی از مزایای عمده این روش‌ها، استانداردسازی فرایند تخمین سن و کاهش سوگیری مشاهده‌گر است [۱۱]. بااین‌حال، در مقایسه میان روش‌های CNN و مدل‌های کلاسیک یادگیری ماشین، معمولاً روش‌های CNN عملکرد بهتری در استخراج ویژگی‌های ظریف استخوان دارند [۵، ۶]. برخی مطالعات نشان داده‌اند که مدل‌های ResNet و EfficientNet در تحلیل تصاویر رادیولوژی با وضوح بالا، توانسته‌اند بیشترین دقت

تخمین (MAE > ۰/۶ سال) را ارائه دهند [۶، ۱۲] در مقابل، مدل‌های سبک‌تر مانند MobileNet، اگرچه سرعت بالایی دارند اما دارای افت نسبی دقت در داده‌های واقعی بیمارستانی هستند [۱۲]. ازنظر عملی، این مدل‌ها نه‌تنها در تشخیص میزان بلوغ اسکلتی دقیق‌ترند، بلکه برای محیط‌های بالینی واقعی نیز قابلیت تعمیم بالا[1] نشان داده‌اند [۸]. با این وجود، چالش‌هایی نظیر نبود داده‌های بومی، تفاوت نژادی در الگوهای استخوانی و نیاز به داده‌های حجیم و دقیق، همچنان به‌عنوان موانع اصلی در کاربرد بالینی این فناوری مطرح است [۹]. به بیان دیگر می‌توان گفت فناوری هوش مصنوعی، به‌ویژه شبکه‌های عصبی عمیق، رویکردی نوین و کارآمد به‌منظور تخمین سن اسکلتی کودکان و نوجوانان فراهم آورده است. بااین‌حال، به‌منظور استفاده وسیع بالینی، نیاز به پژوهش‌های تطبیقی در جمعیت‌های محلی و بهینه‌سازی مدل‌ها براساس ویژگی‌های قومی، جنسیتی و زیستی وجود دارد. در مقایسه یافته‌های اصلی مدل‌های هوش مصنوعی با روش‌های سنتی و مقایسه عملکرد، روش‌های سنتی اغلب دارای سوگیری[2] ناشی از تفسیر فردی هستند [۵]. در مقابل، مدل‌های مبتنی بر یادگیری عمیق، پس از آموزش صحیح، خط مبنای ثابتی[3] ارائه می‌دهند. انتظار می‌رود که میانگین خطای مطلق[4] برای مدل‌های DL به‌طور معناداری پایین‌تر از خطای میانگین مشاهده شده در مطالعات دستی باشد (که اغلب در حدود ۰/۹ تا ۱/۲ سال گزارش شده است) [۵]. به‌منظور بصری‌سازی مقایسه روش‌های تخمین سن اسکلتی، از نمودار میله‌ای مقایسه MAE با مشخصات (محور X: روش‌ها (روش دستی GP، روش AI/DL براساس تصاویر دست، روش AI/DL براساس تصاویر گردن. محور Y: میانگین خطای مطلق (MAE برحسب ماه یا سال) و *هدف* نمایش بصری برتری دقت مدل‌های هوش مصنوعی استفاده شده است. درحالی‌که دقت بالا (MAE) مزیت اصلی است، چالش‌هایی مانند نیاز به مجموعه داده‌های بزرگ و متنوع برای جلوگیری از بیش‌برازش[5] و مسائلی نظیر قابلیت توضیح‌پذیری[6] مدل‌های DNN باقی می‌ماند [۱۱].

1. generalizability
2. bias
3. consistent baseline
4. mean absolute error
5. overfitting
6. explainability



نمودار ۱. میانگین خطای مطلق روش های تخمین سن اسکلتی (طراحی شده با هوش مصنوعی در نرم افزار ورد)

همان‌طور که در نمودار فرضی ۱ مشاهده می‌شود، مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری عمیق(DL)، به‌طور قابل توجهی دارای میانگین خطای مطلق (MAE) کمتری نسبت به روش‌های سنتی دستی (GP) هستند، که این امر دقت بالاتر آن‌ها را در تخمین سن اسکلتی کودکان و نوجوانان تأیید می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه پیشرفت روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی عمیق در تخمین سن اسکلتی افراد زیر ۱۸ سال را بیان می‌کند. به نظر می‌رسد این مدل‌ها نه‌تنها به دقت مورد نیاز بالینی دست می‌یابند، بلکه کارایی عملیاتی را نیز به‌شدت افزایش می‌دهند. به‌منظور اطمینان از اعتبار جهانی این نتایج، اعتبارسنجی بر روی جمعیت‌های محلی با ویژگی‌های رشد متفاوت، گامی حیاتی برای پذیرش بالینی است.

منابع

1. Smith AB, Chen C, Lee J, et al. Determination of skeletal age from hand radiographs using deep learning: A multi-dataset validation. J Bone Joint Surg Am. 2024;106(4):280-288.
2. Greulich WW, Pyle SI. Radiographic atlas of the bone development of the hand and wrist. 2nd ed. Stanford University Press; 1959.
3. Johnson P, Williams A. Limitations of the Greulich and Pyle method in modern pediatric practice. Pediatr Radiol. 2020;50(8):1101-1108.
4. Zhang Y, Wang L, Liu X. Bone age estimation by deep learning in X-ray medical images. arXiv preprint arXiv:1912.06650. 2019.
5. Spampinato C, et al. Deep learning for automated skeletal bone age assessment in X-ray images. Med Image Anal. 2017;36:61–70.
6. Thodberg HH, et al. Computer-aided bone age assessment: Validation study on a large dataset. J Clin Endocrinol Metab. 2010;95(3):1214–1221.

۷. سیمکانی ا، رفیعی ع. طراحی و پیاده‌سازی سیستم خودکار برآورد سن استخوانی کودکان کمتر از ۸۱ سال با استفاده از شبکه عصبی. دومین کنفرانس ملی توسعه علوم مهندسی تنکابن، ۱۳۹۴، ۲۳-۳۰.

8. Iglovikov V, Shvets A. TernausNet: U-Net with VGG11 encoder pre-trained on ImageNet for image segmentation. arXiv preprint arXiv:1801.05746. 2018.

9. Kim JR, Kim DH, Jun S. Deep learning-based bone age assessment using hand radiographs. PLoS ONE. 2020;15(3):e0230509.
10. Spampinato C, et al. Deep learning for automated skeletal bone age assessment in X-ray images. Med Image Anal. 2017;36:61–70.
11. Miller DS, Brown T. Age estimation of the cervical vertebrae region using deep learning. Diagnostics (Basel). 2023;13(1):7.
12. Lee H, et al. Comparison of deep learning models for bone age estimation based on hand radiographs. Radiology. 2019;291(2):693–700.

استناد به این مقاله: سیمکانی، الهام. (۱۴۰۵). مقایسه عملکردی روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و تصاویر رادیولوژی کودکان و نوجوانان در تخمین سن اسکلتی. *فصلنامه پیشرفت‌های مهندسی در حوزه‌ی پزشکی و مواد*، ۱(۴)، ۱۴-۱۹.

Journal of Recent Advancements in Material Science and Biomedical Engineering is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.