Short Review

Digital Twin Technology in Blood, Blood-Related Disorders, and Clinical Applications: Potentials and Future Challenges

Alihasan Ahmadipour[1]

[1]*Social Determinants of Health Research Center, Yasuj University of Medical Sciences, Yasuj, Iran*

Received: 2026/07/01
Accepted: 2026/08/25

http://dx.doi.org/10.66224/bloodj.23.1.1

Citation:
Ahmadipour A.H. Digital Twin Technology in Blood, Blood-Related Disorders, and Clinical Applications: Potentials and Future Challenges. J Iran Blood Transfus. 2026: 23 (3): 241-250

Correspondence: Ahmadipour A.H., Social Determinants of Health Research Center, Yasuj University of Medical Sciences.
P.O.Box: 75917-41417 Yasuj, Iran.
Tel: (+9874) 33346078
E-mail:
alihasanahmadipour@gmail.com

ABSTRACT

Background and Objectives

Digital twin technology, an emerging artificial intelligence driven approach, enables the development of dynamic virtual representations of patients and healthcare processes, offering substantial potential for prediction, simulation, and optimization of clinical decision-making. Despite its growing applications in blood-related fields, associated disorders, and transfusion medicine, the available evidence remains fragmented, and a comprehensive assessment of its capabilities, applications, and challenges is still needed. Therefore, this short review aimed to explore the applications, potentials, and challenges of digital twins in blood-related domains, associated diseases, and clinical practice.

Materials and Methods

This short review was based on a literature search on PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar for publication published between January 2020 and June 2026.After applying the eligibility criteria and screening the retrieved records, 11 relevant studies were selected from a total of 275 records.

Results

The identified applications of digital twins were categorized into four major domains: cardiovascular medicine (6 studies), hematology (2 studies), blood management (2 studies), and transfusion medicine (1 study). Digital twins showed potential for simulation and prediction patient status ,supporting personalized medicine, optimizing blood management and supply chains, and facilitating clinical decision-making. The reviewed studies indicated that cardiovascular medicine represents the most mature and extensively developed area, whereas applications in hematology, blood management, and particularly transfusion medicine remain limited and are still at early stage of development.

Conclusions

Digital twins hold considerable promise for advancing clinical decision support, personalized medicine, intelligent blood management, and transfusion safety. However, their broader adoption requires addressing critical challenges, including data quality and interoperability, standardization, clinical validation, and ethical considerations.

Keywords: Digital Technology, Blood Transfusion, Hematology, Cardiovascular Medicine, Personalized Medicine, Artificial Intelligence

Copyright © 2025 Journal of Iranian Blood Transfusion, Published by Blood Transfusion Research Center.
This work is licensed under a Creative Common Attribution-Non Commercial 4.0 International license.

[Downloaded from bloodjournal.ir on 2026-11-17]

خون
فصلنامه پژوهشی
دوره ۲۳ شماره ۳ پائیز ۱۴۰۵ (۲۵۰-۲۴۱)

مروری کوتاه

فناوری دوقلوی دیجیتال در حوزه خون، بیماری ها و کاربردهای بالینی: ظرفیت‌ها و چالش‌های پیش‌رو

علی حسن احمدی‌پور[۱]

۱- دکترای تخصصی انفورماتیک پزشکی ـ مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی مؤثر بر سلامت دانشگاه علوم پزشکی یاسوج ـ یاسوج ـ ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۳

http://dx.doi.org/10.66224/bloodj.23.1.1

Citation:
Ahmadipour A.H. Digital Twin Technology in Blood, Blood-Related Disorders, and Clinical Applications: Potentials and Future Challenges. J Iran Blood Transfus. 2026: 23 (3): 241-250

نویسنده مسئول:
دکتر علی حسن احمدی‌پور. مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی مؤثر بر سلامت دانشگاه علوم پزشکی یاسوج ـ یاسوج ـ ایران
صندوق پستی: ۷۵۹۱۷-۴۱۴۱۷
E-mail: *alihasanahmadipour@gmail.com*

چکیده

سابقه و هدف

دوقلوی دیجیتال به عنوان یکی از فناوری‌های نوظهور مبتنی بر هوش مصنوعی، با ایجاد مدل‌های مجازی پویا از بیماران و فرآیندهای سلامت، ظرفیت بالایی برای پیش‌بینی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تصمیمات بالینی دارد. با وجود کاربردهای رو به گسترش این فناوری در حوزه خون، بیماری‌های مرتبط و انتقال خون، شواهد موجود پراکنده است و ارزیابی جامعی از ظرفیت‌ها، کاربردها و چالش‌های آن وجود ندارد. ازاین‌رو، این مرور کوتاه با هدف بررسی کاربردها، ظرفیت‌ها و چالش‌های دوقلوی دیجیتال در حوزه خون، بیماری‌های مرتبط و کاربردهای بالینی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه به صورت مرور کوتاه انجام شد. مقالات منتشرشده بین ژانویه ۲۰۲۰ تا ژوئن ۲۰۲۶ در پایگاه‌های PubMed، Scopus، Web of Science و Google Scholar جستجو شدند. پس از اعمال معیارهای ورود و خروج و غربالگری مطالعات، از ۲۷۵ مقاله بازیابی شده، ۱۱ مطالعه مرتبط وارد مرور شدند.

یافته‌ها

یافته‌ها نشان دادند که کاربردهای دوقلوی دیجیتال در چهار حوزه اصلی شامل پزشکی قلب و عروق (۶ مطالعه)، هماتولوژی (۲ مطالعه)، مدیریت خون (۲ مطالعه) و انتقال خون (۱ مطالعه) متمرکز است. این فناوری در شبیه‌سازی و پیش‌بینی وضعیت بیماران، پزشکی شخصی‌سازی‌شده، بهینه‌سازی مدیریت، زنجیره تأمین خون و پشتیبانی از تصمیم‌گیری بالینی نقش مؤثری دارد. بررسی مطالعه‌ها نشان داد که دوقلوهای دیجیتال در پزشکی قلب و عروق از بیشترین بلوغ و گستردگی کاربرد برخوردارند، در حالی که کاربرد آن‌ها در هماتولوژی، مدیریت خون و به ویژه انتقال خون هنوز محدود و در مراحل اولیه توسعه است.

نتیجه گیری

دوقلوهای دیجیتال ظرفیت بالایی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری بالینی، پزشکی شخصی‌سازی‌شده، مدیریت هوشمند خون و ارتقای ایمنی انتقال خون دارند. بااین‌حال، توسعه و استقرار گسترده این فناوری مستلزم رفع چالش‌هایی مانند کیفیت و یکپارچگی داده‌ها، استانداردسازی، اعتبارسنجی بالینی و ملاحظات اخلاقی است.

کلمات کلیدی: تکنولوژی دیجیتال، انتقال خون، هماتولوژی، پزشکی قلب و عروق، پزشکی شخصی‌سازی شده، هوش مصنوعی

[Downloaded from bloodjournal.ir on 2026-11-17]

مقدمه

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در علوم خون و انتقال خون، چالش‌هایی مانند پیش‌بینی نیاز بیماران، مدیریت منابع خونی، تضمین ایمنی انتقال خون و شخصی‌سازی تصمیمات درمانی هم‌چنان نیازمند راه‌کارهای نوین مبتنی بر داده هستند. در سال‌های اخیر، فناوری‌های هوش مصنوعی، تحلیل داده‌های چند وجهی و سیستم‌های هوشمند، زمینه‌ساز تحول در پزشکی شده‌اند. در این میان، فناوری دوقلوی دیجیتال به عنوان یک رویکرد نوظهور، امکان ایجاد مدل‌های مجازی پویا از بیماران، فرآیندهای درمانی یا سیستم‌های سلامت را فراهم می‌کند که با ادغام داده‌های واقعی قادر به شبیه‌سازی، پیش‌بینی و بهینه‌سازی تصمیمات بالینی هستند (۱). این فناوری، نمایش مجازی از اشیای فیزیکی، سیستم‌ها یا فرآیندها است که با ایجاد همتایان دیجیتال دقیق و بلادرنگ، رفتار و ویژگی‌های نمونه فیزیکی خود را شبیه‌سازی و به بهبود فرآیندهای تصمیم‌گیری و مدیریت کمک می‌کند (۳، ۲).

هم‌چنین این فناوری با بهره‌گیری از داده‌های بالینی، تصویربرداری، الکتروفیزیولوژی و اطلاعات چنداُمیکی، نقش مهمی در توسعه پزشکی شخصی‌سازی شده ایفا می‌کند (۴). کاربرد دوقلوهای دیجیتال در حوزه خون و بیماری‌های آن در مطالعه‌های متنوعی مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان مثال در بیماری‌های قلبی- عروقی، این فناوری با فنوتیپ‌سازی دقیق بیماران و ادغام داده‌های بلادرنگ، ظرفیت پیش‌بینی پیشرفت بیماری و بهینه‌سازی درمان را نشان داده است، اگرچه بسیاری از مدل‌های موجود هنوز در مرحله شبیه‌سازی عددی قرار دارند (۵).

در حوزه هماتولوژی، پلتفرم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند با استفاده از داده‌های بالینی و ژنومی، روند بیماری و پاسخ به درمان را در اختلالات پیچیده‌ای مانند سندرم‌های میلودیسپلاستیک شبیه‌سازی کنند (۶).

با این حال، چالش‌هایی مانند استانداردسازی داده‌ها، یکپارچه‌سازی منابع اطلاعاتی ناهمگون، محدودیت داده‌های بلادرنگ و ملاحظات اخلاقی، توسعه این فناوری را با محدودیت‌هایی مواجه کرده است (۷).

با وجود ظرفیت‌های قابل‌توجه دوقلوهای دیجیتال، شواهد موجود در حوزه خون، بیماری‌های مرتبط و کاربردهای بالینی آن هم‌چنان پراکنده و محدود به مطالعه‌های اولیه است. هم‌چنین، تنوع کاربردها، فناوری‌های مورد استفاده و حوزه‌های بالینی، ارزیابی جامع وضعیت فعلی این فناوری و شناسایی شکاف‌های پژوهشی را ضروری می‌سازد. ازاین‌رو، انجام یک مرور می‌تواند ضمن یکپارچه‌سازی شواهد موجود، تصویری روشن از کاربردهای کنونی، چالش‌های پیش‌رو و مسیرهای آینده توسعه دوقلوهای دیجیتال در این حوزه ارائه دهد؛ بنابراین، هدف این مرور کوتاه، بررسی ظرفیت‌ها، کاربردها و چالش‌های فناوری دوقلوی دیجیتال در حوزه خون، بیماری‌ها و کاربردهای بالینی و تبیین نقش بالقوه آن در ارتقای تصمیم‌گیری بالینی، مدیریت فرآورده‌های خونی و توسعه نسل آینده سیستم‌های هوشمند انتقال خون است.

مواد و روش‌ها

این مطالعه به روش کتابخانه‌ای و در قالب یک مرور کوتاه انجام شد. به منظور شناسایی و مرور شواهد موجود درباره کاربرد دوقلوی دیجیتال در حوزه خون و انتقال خون، جستجوی منابع در پایگاه‌های اطلاعاتی PubMed، Scopus، Web of Science و Google Scholar برای مقالات منتشر شده بین ژانویه ۲۰۲۰ تا ژوئن ۲۰۲۶ انجام گرفت. راهبرد جستجو بر اساس ترکیبی از کلید واژه‌های Digital Twins ، Blood Transfusion ، Blood ، Artificial Intelligence ، Cardiovascular Medicine ، Hematology و مترادف‌ها با استفاده از عملگرهای بولی AND و OR طراحی شد. معیارهای ورود شامل مقالات پژوهشی به زبان انگلیسی بود که به کاربرد، ظرفیت یا چالش‌های فناوری دوقلوی دیجیتال در حوزه خون، بیماری‌ها و کاربردهای بالینی آن پرداخته بودند. معیارهای خروج نیز شامل مقالات نامرتبط، چکیده‌های همایش، نامه به سردبیر، مقالات فاقد متن کامل و مطالعه‌های تکراری بود. پس از غربالگری عناوین، چکیده‌ها و متن کامل مقالات، از ۲۷۵ مقاله بازیابی شده، ۱۱ مقاله به عنوان مرتبط‌ترین مطالعه‌ها انتخاب و یافته‌های آن‌ها تحلیل شدند.

یافته‌ها

تعریف دوقلوی دیجیتال:

دوقلوهای دیجیتال، نسخه دیجیتالی از اشیا، سامانه‌ها، فرآیندها یا موجودیت‌های فیزیکی هستند که با ایجاد همتایان دیجیتال دقیق و پویا، رفتار و ویژگی‌های نمونه فیزیکی را به‌صورت بلادرنگ شبیه‌سازی می‌کنند (۸). این سامانه‌ها با ادغام فناوری‌های مختلف، از جمله واقعیت ترکیبی، اینترنت اشیا، یادگیری ماشین، کلان‌داده و رایانش ابری، امکان انجام شبیه‌سازی‌های دقیق مبتنی بر داده‌های

[Downloaded from bloodjournal.ir on 2026-11-17]

لحظه‌ای را فراهم می‌سازند (۹). این ابزار به عنوان یک پارادایم تحول‌آفرین در پزشکی شخصی‌سازی‌شده شناخته می‌شود که با ایجاد بازنمایی مجازی و پویای هر بیمار، امکان شبیه‌سازی و پیش‌بینی مسیر سلامت افراد را به صورت بلادرنگ فراهم می‌کند (۷). این سیستم‌های جفت شده پیشرفته با حفظ ارتباط و به‌روزرسانی دو سویه در سراسر چرخه عمر خود، فرصت‌های نوینی را برای تحول دیجیتال در حیطه‌های مختلف از جمله حوزه خون، بیماری‌ها و کاربردهای بالینی آن ایجاد می‌کنند (۱۰).

کاربرد دوقلوی دیجیتال در حوزه خون، بیماری‌ها و کاربردهای بالینی آن:

مطالعه‌های بازیابی شده واجد شرایط در این مرور کوتاه در چهار حوزه اصلی پزشکی قلب و عروق، هماتولوژی، مدیریت خون و انتقال خون طبقه‌بندی شدند. هر یک از این حوزه‌ها کاربردها و ظرفیت‌های متفاوتی را برای به‌کارگیری دوقلوهای دیجیتال در تشخیص، درمان، پایش بیماران و بهینه‌سازی فرآیندهای مراقبت سلامت نشان می‌دهند. در ادامه، مهم‌ترین مطالعه‌های شناسایی شده در هر یک از این چهار حوزه به صورت مجزا تحلیل و توصیف می‌شوند و خلاصه‌ای از ویژگی‌ها، فناوری‌های به کار رفته و مهم‌ترین یافته‌های این مطالعه‌ها به تفکیک هر حوزه در جدول ارائه شده است (جدول ۱).

الف- کاربرد دوقلوی دیجیتال در پزشکی قلب و عروق:

بر اساس جدول یک، در حوزه پزشکی قلب و عروق، بیشترین تعداد مطالعه‌های شناسایی شده (۶ مطالعه) به توسعه دوقلوهای دیجیتال برای مدل‌سازی عملکرد قلبی-عروقی، پیش‌بینی شاخص‌های همودینامیک، پایش وضعیت بیمار و پشتیبانی از تصمیم‌گیری درمانی شخصی‌سازی شده اختصاص داشت. مطالعه‌های این حوزه از رویکردهای مختلفی شامل مدل‌سازی بیومکانیکی، دینامیک سیالات محاسباتی، مدل‌های فیزیک محور، هوش مصنوعی و شبکه‌های عصبی آگاه از فیزیک استفاده کرده‌اند. داده‌های ورودی این مدل‌ها شامل اطلاعات فیزیولوژیک، سیگنال‌های قلبی مانند ECG ، داده‌های تصویربرداری، ویژگی‌های هندسی عروق، پارامترهای همودینامیک و داده‌های حاصل از حسگرهای پوشیدنی بود. یافته‌ها نشان دادند که دوقلوهای دیجیتال توانسته‌اند عملکرد سیستم قلبی- عروقی را شبیه‌سازی کرده، جریان خون و فشارهای عروقی را پیش‌بینی کنند، فنوتیپ‌های همودینامیک بیماران را شناسایی نمایند و در پیش‌بینی روند بیماری، ارزیابی خطر، پایش غیر تهاجمی و انتخاب راهبرد درمانی فرد محور مورد استفاده قرار گیرند. هم‌چنین برخی چارچوب‌ها مانند CereBRLSIM ، WPINNs و TwinCardio نشان دادند که ترکیب مدل‌های فیزیکی با هوش مصنوعی و داده‌های بلادرنگ می‌تواند دقت پیش‌بینی و قابلیت تفسیر مدل‌های دوقلوی دیجیتال قلبی-عروقی را افزایش دهد.

ب - کاربرد دوقلوی دیجیتال در هماتولوژی:

بر اساس جدول یک، مطالعه‌های مرتبط با هماتولوژی (۲ مطالعه) نشان دادند که دوقلوهای دیجیتال عمدتاً با هدف پزشکی شخصی‌سازی شده، پیش‌بینی سیر بیماری، ارزیابی پاسخ درمانی و شبیه‌سازی سناریوهای بالینی توسعه یافته‌اند. در این حوزه، مدل‌های مبتنی بر داده و هوش مصنوعی با استفاده از اطلاعات چند وجهی شامل داده‌های بالینی، ژنومی، تصویربرداری و پرونده الکترونیک سلامت برای ایجاد بازنمایی مجازی از وضعیت بیمار به‌کار گرفته شده‌اند. مطالعه آمیکو و همکاران با استفاده از پلتفرم GEMINI نشان داد که دوقلوی دیجیتال مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند برای پیش‌بینی بقا، خطر پیشرفت بیماری، پاسخ به درمان و تعیین زمان مناسب مداخلات درمانی در سطح فردی استفاده شود. هم‌چنین در مطالعه مورنو و همکاران، استفاده از دوقلوهای دیجیتال مبتنی بر شبکه مولد تخاصمی شرطی، رگرسیون لجستیک و شبیه‌سازی مونت‌کارلو امکان بازتولید نتایج درمانی بیماران مبتلا به ترومبوز و ارزیابی سناریوهای مختلف درمانی را فراهم کرد.

ج- کاربرد دوقلوی دیجیتال در مدیریت خون:

در حوزه مدیریت خون، مطالعه‌های شناسایی شده (۲ مطالعه) بر استفاده از دوقلوهای دیجیتال برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین خون، مدیریت موجودی، بهبود توزیع فرآورده‌های خونی و برنامه‌ریزی خدمات اهدای خون تمرکز داشتند. این مطالعه‌ها عمدتاً از ترکیب فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا، رایانش ابری، سیستم اطلاعات جغرافیایی، و مدل‌های بهینه‌سازی استفاده کرده‌اند. در مطالعه شیخ و همکاران، یک معماری دوقلوی دیجیتال مبتنی بر اینترنت اشیا و رایانش ابری برای مدیریت خون پیشنهاد شد که امکان اشتراک‌گذاری بلادرنگ اطلاعات موجودی، شناسایی منابع نزدیک خون و بهبود انتقال فرآورده‌ها بین مراکز درمانی را

[Downloaded from bloodjournal.ir on 2026-11-17]

جدول ۱: مطالعه‌های کاربرد دو قلوی دیجیتال در حوزه خون، بیماری‌ها و کاربردهای بالینی آن

نویسنده اول	حوزه بالین	هدف مطالعه	نوع دوقلوی دیجیتال /فناوری	داده‌های ورودی	مهم‌ترین یافته‌ها
D' Amico S (۶)	هماتولوژی	توسعه دوقلوی دیجیتال برای پزشکی شخصی‌سازی‌شده و پشتیبانی از تصمیم‌گیری بالینی	دوقلوی دیجیتال مبتنی بر هوش مصنوعی (GEMINI)	داده‌های چندوجهی شامل اطلاعات بالینی، ژنومی، تصویربرداری، پرونده الکترونیک سلامت	پیش‌بینی بقا، خطر پیشرفت بیماری، پاسخ به درمان، تعیین زمان مناسب مداخله درمانی و شبیه‌سازی سیر بیماری در سطح فردی
Briggs J (۱۱)	پزشکی قلب و عروق	توسعه دوقلوی دیجیتال برای استنباط عملکرد تنظیم عروقی مغز ، پیش‌بینی جریان خون مغزی و پشتیبانی از تشخیص دقیق	دوقلوی دیجیتال مبتنی بر مدل‌های فیزیکی (CereBRLSIM)	دانش فیزیولوژیک، داده‌های اختصاصی بیمار، داده‌های آزمایش‌های *in vivo* و داده‌های شبیه‌سازی‌شده،	دوقلوی دیجیتال CereBRLSIM جریان خون مغزی و سازوکارهای تنظیم عروقی (میوژنیک، اندوتلیال و متابولیک) را با دقت پیش‌بینی کرد، فنوتیپ‌های همودینامیک مغزی را تفکیک نمود، پیامدهای بیماران را پیش‌بینی کرد و در پیش‌بینی جریان خون، عملکردی بهتر از مدل‌های یادگیری ماشین داشت.
Dinc, R (۱۱)	پزشکی قلب و عروق	توسعه چارچوب دوقلوی دیجیتال اختصاصی بیمار برای پیش‌بینی سیر بیماری، ارزیابی خطر و پشتیبانی از تصمیم‌گیری درمانی.	دوقلوی دیجیتال اختصاصی بیمار مبتنی بر مدل‌سازی چندوجهی شامل مدل‌سازی ساختاری-بیومکانیکی، همودینامیک محاسباتی، داده‌های ایمونوبیولوژیک و هوش مصنوعی پیش‌بین	داده‌های چندوجهی شامل هندسه آئورت، داده‌های تصویربرداری، ویژگی‌های بیومکانیکی، شاخص‌های همودینامیک(مانند Wall Shear Stress)، داده‌های التهابی و ایمنی، اطلاعات طولی بیمار و داده‌های مداخلات اندوواسکولار.	دوقلوی دیجیتال امکان پیش‌بینی رشد و عوارض بیماری، ارزیابی خطر اختصاصی بیمار، برنامه‌ریزی مداخلات اندوواسکولار، انتخاب وسیله درمانی و پایش شخصی‌سازی‌شده را فراهم می‌کند و می‌تواند از پیشگیری زودهنگام و تصمیم‌گیری دقیق‌تر در مدیریت بیماری‌های آئورت حمایت کند.
Shaikh, F (۱۲)	مدیریت خون	طراحی و ارائه نمونه اولیه معماری یک سامانه مدیریت خون در سطح کشور به‌منظور کاهش هدررفت خون، بهبود توزیع و حمل‌ونقل فرآورده‌های خونی، و افزایش دسترسی مراکز درمانی به خون مورد نیاز	دوقلوی دیجیتال مبتنی بر اینترنت اشیا، همراه با رایانش ابری، وب‌اپلیکیشن و فناوری GPS	اطلاعات موجودی خون و فرآورده‌های خونی، گروه خونی، اطلاعات بیمارستان‌ها و بانک‌های خون، موقعیت جغرافیایی مراکز، اطلاعات اهداکنندگان (شامل آدرس و مختصات، داده‌های ثبت‌شده از طریق وب‌اپلیکیشن مبتنی بر ابر)	معماری پیشنهادی امکان اشتراک‌گذاری بلادرنگ اطلاعات موجودی خون، جستجوی نزدیک‌ترین منبع خون، انتقال خون بین بیمارستان‌ها و بانک‌های خون در سطح شهر، استان و کشور را فراهم می‌کند و می‌تواند هدررفت خون ناشی از انقضا را کاهش داده، حمل‌ونقل فرآورده‌های خونی را بهبود بخشد و دسترسی به خون مورد نیاز را افزایش دهد.
Cueva, B (۱۳)	مدیریت خون	توسعه دوقلوی دیجیتال برای بهینه‌سازی مکان و زمان استقرار مراکز سیار اهدای خون و افزایش عدالت در دسترسی به خدمات اهدای خون	دوقلوی دیجیتال مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی و برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط	شش شاخص دسترسی مکانی، داده‌های جغرافیایی، محدودیت‌های عملیاتی و داده‌های مربوط به زمان و مکان استقرار مراکز سیار اهدای خون	دوقلوی دیجیتال امکان بهینه‌سازی برنامه‌ریزی مراکز سیار اهدای خون را فراهم کرد. این مطالعه امکان‌پذیری استفاده از تحلیل مکانی و بهینه‌سازی ریاضی برای برنامه‌ریزی عادلانه جمع‌آوری خون را نشان داد.
Osman, D (۱۴)	پزشکی قلب و عروق	توسعه و اعتبارسنجی یک چارچوب دوقلوی دیجیتال قلبی- عروقی برای برآورد پارامترهای شخصی‌سازی‌شده سیستم قلبی- عروقی (مانند کامپلاینس شریانی و مقاومت محیطی) و پیش‌بینی شکل موج فشارخون به‌صورت غیرتهاجمی	دوقلوی دیجیتال قلبی-عروقی مبتنی بر شبکه‌های عصبی آگاه از فیزیک و مدل Windkessel با نام WPINNs	داده‌های بیوامپدانس غیرتهاجمی از دستگاه‌های پوشیدنی، داده‌های افراد سالم و مبتلا به پرفشاری خون، داده‌های مرجع محدود، مجموعه‌داده مصنوعی شکل موج قلبی عروقی برای اعتبارسنجی	پیش‌بینی دقیق شکل موج فشارخون با استفاده از داده‌های غیرتهاجمی، کاهش خطای پیش‌بینی به میزان ۱۲ تا ۲۵ درصد نسبت به مدل‌های یادگیری عمیق داده‌محور سنتی، برآورد دقیق کامپلاینس شریانی و مقاومت محیطی با خطای ۰/۷۷ تا ۶/۰۷ درصد در مجموعه‌داده مصنوعی، ارائه چارچوبی تفسیرپذیر، مبتنی بر قوانین فیزیکی و غیرتهاجمی برای توسعه دوقلوهای دیجیتال قلبی-عروقی و پشتیبانی از پزشکی دقیق
Moreno, F (۱۵)	هماتولوژی	ارزیابی اثربخشی و ایمنی داروهای ضدانعقاد خوراکی مستقیم در مقایسه با آنتاگونیست‌های ویتامین K از نظر بازکانالیزاسیون، عود ترومبوز و خونریزی عمده و بازتولید نتایج دنیای واقعی با استفاده از دوقلوی دیجیتال و شبیه‌سازی مونت‌کارلو	دوقلوی دیجیتال مبتنی بر داده با استفاده از شبکه مولد تخاصمی شرطی (Conditional GAN) برای تولید دوقلوهای دیجیتال، رگرسیون لجستیک برای برآورد احتمال پیامدها و شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای ارزیابی سناریوهای مختلف درمانی	داده‌های بالینی ۹۰ بیمار مبتلا به ترومبوز وریدی در محل‌های غیرمعمول (USVT) و همچنین سناریوهای شبیه‌سازی‌شده شامل افزایش استفاده از DOAC ها، افزایش شیوع سرطان، افزایش موارد ترومبوز وریدهای مغزی و بهینه‌سازی کنترل درمان با VKA بود.	دوقلوی دیجیتال توانست نتایج واقعی درمان را با دقت بالا بازتولید کند و نشان داد که DOACها اثربخشی مشابه VKAها و خطر خونریزی اندکی کمتر دارند. همچنین، شبیه‌سازی مونت‌کارلو پایداری این نتایج را تأیید کرد و نشان داد که مدل‌سازی in silico می‌تواند ابزار مؤثری برای ارزیابی درمان در بیماری‌های نادر ترومبوتیک باشد.
Canon, JW (۱۶)	انتقال خون	توسعه و اعتبارسنجی یک مدل دوقلوی دیجیتال برای پیش‌بینی پاسخ‌های فیزیولوژیک، التهابی و انعقادی و ارزیابی راهبردهای مختلف احیای بیماران مبتلا به شوک هموراژیک ناشی از تروما	دوقلوی دیجیتال مبتنی بر مدل‌سازی ریاضی با استفاده از مدل سه‌مخزنی معادلات دیفرانسیل معمولی برای شبیه‌سازی التهاب و انعقاد	داده‌های پیش‌بالینی از مدل خوکی شوک هموراژیک، داده‌های بالینی بیماران مطالعهPROMMTT ، شاخص‌های فیزیولوژیک، نشانگرهای التهابی، پارامترهای انعقادی، نتایج آزمایشگاهی و پروتکل‌های مختلف احیای مایعات و فرآورده‌های خونی	مدل توانست شاخص‌های فیزیولوژیک، التهابی و آزمایشگاهی، همچنین زمان و احتمال مرگ بیماران را با دقت پیش‌بینی کند. شبیه‌سازی‌ها نشان دادند احیای هم‌زمان با پلاسما و گلبول قرمز نسبت به کریستالوئید یا پلاسما به‌تنهایی مؤثرتر است و شروع زودهنگام تجویز پلاسما موجب کاهش شدت آسیب و افزایش مدت بقا می‌شود.

[Downloaded from bloodjournal.ir on 2026-11-17]

Iyer, A (۱۷)	پزشکی قلب و عروق	توسعه یک چارچوب دوقلوی دیجیتال برای پایش هوشمند سلامت، تشخیص و پیش‌بینی بیماری‌های قلبی-عروقی با هدف ارائه مراقبت شخصی‌سازی‌شده و دقیق	چارچوب TwinCardio دوقلوی دیجیتال سلامت مبتنی بر سیستم سایبر-فیزیکی، اینترنت اشیا، حسگرهای پوشیدنی و TwinNet شبکه عصبی اختصاصی برای طبقه‌بندی و پیش‌بینی بیماری قلبی-عروقی	داده‌های جمع‌آوری‌شده از حسگرهای پوشیدنی روی بدن، داده‌های فیزیولوژیک بیمار، داده‌های پایش مداوم سلامت، داده‌های مورداستفاده برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی دیجیتال	چارچوب TwinCardio امکان جمع‌آوری مداوم داده‌ها، شبیه‌سازی وضعیت سلامت، ارزیابی و پیش‌بینی بیماری‌های قلبی-عروقی را فراهم می‌کند. ترکیب دوقلوی دیجیتال با هوش مصنوعی و IoT می‌تواند مسیر توسعه مراقبت سلامت هوشمند، تشخیص به‌موقع و مدیریت شخصی‌سازی‌شده بیماران قلبی را هموار کند.
Balasubra. Mamia m,A (۱۸)	پزشکی قلب و عروق	توسعه یک چارچوب دوقلوی دیجیتال برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم قلبی-عروقی با هدف بهبود تشخیص بلادرنگ، پیش‌بینی وضعیت بیمار و بهینه‌سازی درمان‌های شخصی‌سازی‌شده	دوقلوی دیجیتال قلبی-عروقی مبتنی بر مدل‌سازی بیومکانیکی با استفاده از مدل‌های کامپلاینس متغیر با زمان، بازسازی شکل موج با تبدیل فوریه و اعتبارسنجی با ECGمصنوعی	داده‌های فیزیولوژیک قلب، سیگنال‌های الکتروکاردیوگرام مصنوعی، داده‌های مربوط به دینامیک فشار-حجم قلب، داده‌های واقعی بیماران و پارامترهای همودینامیک مانند گرادیان فشار اوج در تنگی آئورت	چارچوب پیشنهادی توانست دینامیک قلب و فیزیولوژی قلبی-عروقی را با دقت و تطابق بالا شبیه‌سازی کند. مدل قادر بود الگوهای واقعی عملکرد قلب را بازنمایی کرده و پتانسیل استفاده از دوقلوی دیجیتال را برای پزشکی دقیق، تشخیص بلادرنگ و برنامه‌ریزی درمان فردمحور نشان دهد.
Geddes, R (۱۹)	پزشکی قلب و عروق	توسعه یک چارچوب دوقلوی دیجیتال برای پیش‌بینی شاخص‌های همودینامیک اختصاصی بیمار و بهبود پایش، تشخیص زودهنگام و مدیریت نارسایی قلبی به‌صورت غیرتهاجمی	دوقلوی دیجیتال قلبی-عروقی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی سه‌بعدی برای شبیه‌سازی جریان خون و پیش‌بینی فشار در شریان‌های ریوی	داده‌های هندسی اختصاصی بیمار از سیستم عروقی، مدل‌های سه‌بعدی شریان‌های ریوی، شرایط مرزی همودینامیک، داده‌های فشار اندازه‌گیری‌شده به‌صورت تهاجمی برای اعتبارسنجی	دوقلوهای دیجیتال توانستند معیارهای همودینامیک اختصاصی بیمار را با دقت مناسب پیش‌بینی کنند. این فناوری امکان پایش مداوم و غیرتهاجمی بیماران مبتلا به نارسایی قلبی و شناسایی زودهنگام وخامت بیماری را فراهم می‌کند و می‌تواند پایه‌ای برای مراقبت شخصی‌سازی‌شده در نارسایی قلبی باشد.

فراهم می‌کرد. هم‌چنین مطالعه کوئه‌وا و همکاران با ترکیب دوقلوی دیجیتال، تحلیل مکانی و برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، به بهینه‌سازی زمان و مکان استقرار مراکز سیار اهدای خون پرداخت. نتایج این مطالعه‌ها نشان دادند که دوقلوهای دیجیتال می‌توانند با ایجاد نمایی پویا از شبکه تأمین خون، به کاهش اتلاف ناشی از انقضا، افزایش دسترسی به خون و ارتقای کارآیی عملیات خدمات انتقال خون کمک کنند.

د- کاربرد دوقلوی دیجیتال در انتقال خون:

بر اساس نتایج جدول یک، در حوزه انتقال خون، یک مطالعه واجد شرایط بر استفاده از دوقلوهای دیجیتال برای پیش‌بینی پاسخ بیماران به مداخلات انتقالی، شبیه‌سازی فرآیندهای احیا و بهینه‌سازی راهبردهای درمانی در شرایط بحرانی تمرکز داشت. مطالعه انجام شده توسط کانون و همکاران یک مدل دوقلوی دیجیتال مبتنی بر مدل‌سازی ریاضی و معادلات دیفرانسیل معمولی برای شبیه‌سازی پاسخ‌های فیزیولوژیک، التهابی و انعقادی بیماران مبتلا به شوک هموراژیک ناشی از تروما را توسعه داد. این مدل با استفاده از داده‌های پیش‌بالینی و بالینی توانست شاخص‌های فیزیولوژیک، نشانگرهای آزمایشگاهی و احتمال مرگ بیماران را پیش‌بینی کند و سناریوهای مختلف احیای مایعات و فرآورده‌های خونی را ارزیابی نماید. یافته‌ها نشان داد که دوقلوهای دیجیتال می‌توانند به عنوان ابزار شبیه‌سازی رایانه‌ای برای بررسی راهبردهای انتقال خون، پیش‌بینی پیامدهای درمانی و حمایت از تصمیم‌گیری در شرایط پیچیده بالینی مورد استفاده قرار گیرند.

بحث

بررسی مطالعه‌های شناسایی شده در جدول یک نشان داد که توسعه دوقلوهای دیجیتال در حوزه‌های مختلف سلامت از نظر فراوانی مطالعه‌ها و بلوغ فناوری، نوع داده‌های مورد استفاده، اهداف کاربردی و سطح شخصی‌سازی تفاوت قابل‌توجهی دارند.

فراوانی مطالعه‌ها و بلوغ فناوری:

در مجموع، از ۱۱ مطالعه بررسی شده، بیشترین سهم مطالعه‌ها مربوط به پزشکی قلب و عروق (۶ مطالعه، ۵۰٪) بود، در حالی که حوزه‌های هماتولوژی (۲ مطالعه، ۱۶/۷٪)، مدیریت خون (۲ مطالعه، ۱۶/۷٪) و انتقال خون (۱ مطالعه، ۸/۳٪) سهم کمتری داشتند. از نظر نوع دوقلوی دیجیتال و فناوری‌های به کار رفته، حوزه پزشکی قلب و عروق بیشترین تنوع را در میان مطالعه‌های بررسی شده نشان داد. در این حوزه، شش مطالعه از طیف گسترده‌ای از فناوری‌ها شامل مدل‌های فیزیکی، مدل‌سازی بیومکانیکی، دینامیک سیالات محاسباتی، هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی آگاه از فیزیک،

[Downloaded from bloodjournal.ir on 2026-11-17]

اینترنت اشیا و حسگرهای پوشیدنی بهره گرفته بودند. این تنوع، بیانگر بلوغ بیشتر دوقلوهای دیجیتال در پزشکی قلب و عروق نسبت به سایر حوزه‌های بالینی است. به‌طور مشخص، چارچوب‌هایی مانند CereBRLSIM، WPINNs و TwinCardio نشان دادند که دوقلوهای دیجیتال می‌توانند از بازنمایی ساختارهای آناتومیک فراتر رفته و با ادغام داده‌های چندمنبعی، امکان پایش مستمر، پیش‌بینی بلادرنگ تغییرات فیزیولوژیک و پشتیبانی از تصمیم‌گیری بالینی را فراهم کنند.

یافته‌های این مرور با مطالعه‌های پیشین نیز همسو است. شواهد موجود نشان می‌دهد که دوقلوهای دیجیتال، به‌ویژه در حوزه کاردیولوژی دقیق، توانسته‌اند در برنامه‌ریزی درمان، ارزیابی خطر و پیش‌بینی پیامدهای بیماری‌هایی مانند آریتمی‌های قلبی و نارسایی قلبی، نتایج امیدوارکننده‌ای ارائه دهند (۲۰). هم‌چنین، یک مرور دامنه‌ای شامل ۳۱ مطالعه، توسعه و به‌کارگیری دوقلوهای دیجیتال در پزشکی قلب و عروق را در قالب پنج مرحله اصلی شامل جمع‌آوری داده‌ها، توسعه مدل، کالیبراسیون، تحلیل و شبیه‌سازی، و پشتیبانی از تصمیم‌گیری بالینی توصیف کرده است (۲۱). این چارچوب نشان می‌دهد که موفقیت دوقلوهای دیجیتال در این حوزه مستلزم یکپارچه‌سازی داده‌های چندوجهی، اعتبارسنجی مستمر مدل‌ها و به کارگیری آن‌ها در فرآیند تصمیم‌گیری بالینی است. در مقابل، مطالعه‌های هماتولوژی بیشتر بر دوقلوهای دیجیتال داده‌محور و مبتنی بر هوش مصنوعی تمرکز داشتند؛ به‌گونه‌ای که هر دو مطالعه این حوزه از داده‌های چندوجهی و الگوریتم‌های پیشرفته مانند شبکه‌های مولد تخاصمی شرطی، یادگیری ماشین و شبیه‌سازی استفاده کردند. در حوزه مدیریت خون نیز فناوری‌های غالب شامل اینترنت اشیا، رایانش ابری، سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های بهینه‌سازی بود که نشان‌دهنده ماهیت شبکه‌ای و لجستیکی این حوزه است.

نوع داده‌های مورد استفاده:

از نظر نوع داده‌های ورودی، تفاوت قابل توجهی بین حوزه‌ها مشاهده شد. مطالعه‌های قلبی-عروقی عمدتاً از داده‌های پیچیده فیزیولوژیک و ساختاری شامل تصاویر پزشکی، سیگنال‌های ECG ، پارامترهای همودینامیک، هندسه عروق و داده‌های حسگرهای پوشیدنی استفاده کردند. در هماتولوژی، داده‌ها بیشتر ماهیت چندأمیک و بالینی داشتند و شامل اطلاعات ژنومی، پرونده الکترونیک سلامت، تصویربرداری و داده‌های درمانی بودند. در مقابل، مطالعه‌های مدیریت خون بیشتر به داده‌های عملیاتی و سازمانی مانند موجودی خون، موقعیت جغرافیایی مراکز و اطلاعات اهداکنندگان و بیمارستان‌ها متکی بودند. در حوزه انتقال خون نیز داده‌های فیزیولوژیک، التهابی و انعقادی بیماران برای شبیه‌سازی پاسخ به احیا و انتقال فرآورده‌های خونی مورد استفاده قرار گرفتند.

اهداف کاربردی:

از نظر هدف بالینی، تفاوت اصلی میان حوزه‌ها در سطح تمرکز دوقلوی دیجیتال مشاهده شد. در پزشکی قلب و عروق، تمرکز اصلی بر ایجاد مدل فردمحور برای تشخیص، پیش‌بینی، پایش و انتخاب درمان شخصی‌سازی‌شده بود. در هماتولوژی، هدف اصلی پیش‌بینی سیر بیماری، ارزیابی پاسخ درمانی و شبیه‌سازی پیامدهای احتمالی درمان‌ها بود. در مدیریت خون، دوقلوهای دیجیتال بیشتر نقش یک ابزار مدیریت سیستم و بهینه‌سازی منابع را داشتند و هدف آن‌ها کاهش هدررفت، بهبود توزیع و افزایش دسترسی به خون بود. در مقابل، در انتقال خون، کاربرد دوقلوی دیجیتال بیشتر در سطح پیش‌بینی پاسخ بیمار و ارزیابی سناریوهای درمانی در شرایط بحرانی مطرح شده است.

از منظر بلوغ کاربرد بالینی، می‌توان چهار حوزه را در یک طیف توسعه قرار داد. پزشکی قلب و عروق در بالاترین سطح بلوغ قرار دارد؛ زیرا مدل‌های توسعه یافته در این حوزه علاوه بر شبیه‌سازی، در برخی موارد قابلیت پیش‌بینی و پشتیبانی از تصمیم درمانی را نشان داده‌اند. هماتولوژی در مرحله توسعه و اعتبارسنجی مدل‌های فرد محور قرار دارد و ظرفیت بالایی برای پزشکی دقیق دارد، اما نیازمند داده‌های طولی گسترده‌تر است. مدیریت خون هنوز عمدتاً در مرحله طراحی معماری و اثبات مفهوم قرار دارد و مطالعات موجود بیشتر بر امکان‌سنجی فناوری تمرکز کرده‌اند.

کاربرد دوقلوهای دیجیتال در حوزه انتقال خون هنوز در مراحل اولیه توسعه قرار دارد، اما به دلیل ماهیت پویا و پیچیده پاسخ بیماران به خون و فرآورده‌های خونی، این حوزه یکی از امیدوارکننده‌ترین زمینه‌ها برای توسعه آینده این فناوری محسوب می‌شود. پیش‌بینی و تشخیص بلادرنگ رخدادهای نامطلوب انتقال خون همچنان از حوزه‌های کمتر مطالعه‌شده در پژوهش‌های کنونی است و به‌عنوان یک شکاف پژوهشی مهم شناخته می‌شود (۲۲). این شکاف، در کنار ظرفیت بالای دوقلوهای دیجیتال برای مدل‌سازی پویا

[Downloaded from bloodjournal.ir on 2026-11-17]

و پایش مستمر، فرصت ارزشمندی را برای توسعه پژوهش‌های آینده فراهم می‌کند. دوقلوهای دیجیتال با ایجاد یک تعامل پویا و دوسویه میان بیمار و همتای دیجیتالی وی، امکان پایش بلادرنگ وضعیت بیمار و شناسایی زودهنگام واکنش‌های نامطلوب انتقال خون را بر اساس داده‌های شخصی‌سازی‌شده فراهم می‌کنند (۲۳). افزون بر این، این فناوری با ایجاد نسخه‌های مجازی از فرایندهای واقعی که به‌صورت مستمر و بر پایه داده‌های حاصل از حسگرها به‌روزرسانی می‌شوند، می‌تواند از مدیریت ایمنی انتقال خون پشتیبانی کرده و مداخله به‌موقع در بیماران دچار واکنش‌های نامطلوب را تسهیل کند (۲۵، ۲۴).

چالش‌های توسعه دوقلوی دیجیتال :

با وجود این ظرفیت‌ها، چندین چالش اساسی مانع از کاربرد گسترده دوقلوی دیجیتال در این حوزه است:

۱- دسترسی و کیفیت داده‌ها:

توسعه دوقلوهای دیجیتال نیازمند داده‌های استاندارد، طولی و چند وجهی است. نبود داده‌های یکپارچه، محدودیت دسترسی به پرونده‌های سلامت و کیفیت متفاوت داده‌ها می‌تواند عملکرد مدل‌ها را کاهش دهد.

۲- استانداردسازی و قابلیت همکاری:

نبود استانداردهای مشترک برای تبادل داده میان سامانه‌های سلامت، تجهیزات پزشکی و بانک‌های اطلاعاتی یکی از موانع اصلی توسعه دوقلوهای دیجیتال است. استفاده از استانداردهایی مانندHL7 FHIR ، ISO 13606 و استانداردهای حوزه خون از جمله ISBT 128 می‌تواند این مشکل را کاهش دهد.

۳- اعتبارسنجی بالینی و اعتمادپذیری:

بسیاری از مدل‌های موجود هنوز در مرحله آزمایشگاهی یا اثبات مفهوم هستند و نیازمند مطالعات اعتبارسنجی گسترده در محیط واقعی بالینی می‌باشند.

۴- تفسیرپذیری مدل‌های هوش مصنوعی:

در حوزه‌های حساس مانند انتقال خون و درمان بیماران، تصمیم‌های مبتنی بر مدل باید قابل توضیح و قابل اعتماد باشند؛ بنابراین توسعه مدل‌های توضیح‌پذیر اهمیت زیادی خواهد داشت.

۵- مسائل اخلاقی، امنیت داده و حریم خصوصی:

استفاده از داده‌های ژنتیکی، بالینی و شخصی بیماران نیازمند چارچوب‌های مشخص برای مالکیت داده، امنیت سایبری و رضایت آگاهانه است.

۶- هزینه و زیرساخت فناوری:

پیاده‌سازی دوقلوهای دیجیتال نیازمند زیرساخت‌های محاسباتی، اینترنت اشیا، ذخیره‌سازی داده و نیروی انسانی متخصص در حوزه‌های پزشکی، مهندسی و علوم داده است. غلبه بر این چالش‌ها مستلزم همکاری میان‌رشته‌ای متخصصین انفورماتیک پزشکی، هماتولوژی، بالینی و مهندسی نرم‌افزار به‌منظور تدوین پروتکل‌های استاندارد تبادل و محتوای داده و توسعه مدل‌های پیشرفته دوقلوهای دیجیتال شخص سازی شده است (۴).

نتیجه‌گیری

شواهد این مرور نشان می‌دهد که دوقلوهای دیجیتال در حال گذار از یک ابزار شبیه‌سازی به یک بستر هوشمند برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری بالینی، پزشکی دقیق و مدیریت هوشمند خون هستند. در این حوزه‌ها، این فناوری می‌تواند با یکپارچه‌سازی داده‌های بالینی، آزمایشگاهی، ژنتیکی و عملیاتی، امکان پیش‌بینی سیر بیماری، انتخاب راهبردهای درمانی فردمحور، بهینه‌سازی زنجیره تأمین خون، مدیریت موجودی و ارتقای ایمنی انتقال خون را فراهم کند. همچنین، ادغام دوقلوهای دیجیتال با سامانه‌های پرونده الکترونیک سلامت، داده‌های همو‌ویژیلانس، هوش مصنوعی و اینترنت اشیا می‌تواند زمینه‌ساز پایش بلادرنگ بیماران، پیش‌بینی و تشخیص زودهنگام واکنش‌های نامطلوب انتقال خون و توسعه رویکرد انتقال خون دقیق باشد.

با وجود این ظرفیت‌ها، شواهد نشان می‌دهد که کاربرد دوقلوهای دیجیتال در حوزه خون، بیماری‌ها و کاربردهای بالینی آن، دارای چالش های متعددی است. رفع این چالش‌ها می‌تواند مسیر استقرار عملی دوقلوی دیجیتال را هموارکرده و این فناوری را به یکی از ارکان کلیدی نسل آینده مراقبت‌های شخصی‌سازی‌شده تبدیل کند.

حمایت مالی

این مطالعه فاقد حمایت مالی بوده است.

عدم تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که هیچ تعارض منافعی وجود

[Downloaded from bloodjournal.ir on 2026-11-17]

ندارد.

طراحی، جستجوی منابع، گردآوری داده‌ها، تحلیل و تفسیر نتایج و نگارش مقاله توسط یک نفر نویسنده انجام شده است.

نقش نویسندگان

دکتر علی حسن احمدی‌پور: تمام مراحل این مطالعه، شامل

References:

1- Zhang Z, Liu Q. Rational or altruistic: the impact of social media information exposure on Chinese youth's willingness to donate blood. Front Public Health. 2024; 12: 1359362.
2- Bellavista P, Di Modica G. IoTwins: Implementing distributed and hybrid digital twins in industrial manufacturing and facility management settings. Future Internet. 2024; 16(2): 65.
3- Chongfuangprinya P, Ye Y, Venkatraman C, Mital P, Osaki H, Kato T. Unlocking the potential of digital twins for a greener grid: Applications for the whole range of the electric power system. IEEE Electrification Magazine. 2024; 12(3): 10-20.
4- Meijer C, Uh H-W, El Bouhaddani S. Digital twins in healthcare: Methodological challenges and opportunities. J Pers Med. 2023; 13(10): 1522.
5- Coorey G, Figtree GA, Fletcher DF, Snelson VJ, Vernon ST, Winlaw D, *et al.* The health digital twin to tackle cardiovascular disease—a review of an emerging interdisciplinary field. NPJ Digit Med. 2022; 5(1): 126.
6- Drusbosky, L.M., Singh NK, Hawkins KE, Salan C, Turcotte M, Wise EA, *et al*. A genomics-informed computational biology platform prospectively predicts treatment responses in AML and MDS patients. Blood advances, 2019. 3(12): p. 1837-1847.
7- Laubenbacher R, Fonseca L, Walch O. Digital Twins are a Key Enabling Technology for Personalized Medicine. Bull Math Biol. 2026; 88(2): 17.
8- Matta A, Lugaresi G, editors. Digital twins: Features, models, and services. 2023 Winter Simulation Conference (WSC); 2024. IEEE Access: 46-60.
9- de Siqueira AG, Cardoso A, Martins VF, Silveira IF, editors. From Virtual Reality to Digital Twins: The Long and Winding Road! Simpósio de Realidade Virtual e Aumentada (SVR); 2024: Sao Paulo, SP, Brazil.
10- Anwer N, Stark R, Tao F, Erkoyuncu JA. Developing and leveraging digital twins in engineering design. CIRP Annals. 2025; 74(2): 843-68.
11- Briggs JK, Stroh J, Park S, Foreman B, Tymko MM, Carr J, *et al.* Towards a physics informed digital twin to predict cerebral blood flow and cerebral vascular regulation. npj Digital Medicine. 2026 ;9(1) :428.
12- Shaikh F, Karwande V. Analysis on nation's blood management system and wastage using internet of things and digital twin. Open Access Int J of Sci & Eng. 2021;6:1-4.
13- Bouzo Cueva J, Perelli I, Freitas F, Waldvogel S, Issom DZ. Designing a Digital Twin for Equitable Blood Donation Logistics in Geneva. Stud Health Technol Inform. 2026; 336: 1795-6.
14- Osman D, Sel K, Spatz E, Jafari R. Cardiovascular digital twins using a Windkessel physics informed neural network. npj Digital Medicine. 2026; 9(1): 433.
15- Franco-Moreno A, Escobar-Curbelo L, Torres-Macho J, Muñoz-Rivas N, Ancos-Aracil CL, Martínez de la Casa-Muñoz A, *et al*. A Digital Twin Strategy Combined with a Monte Carlo Simulation Framework to Predict Outcomes in Patients with Unusual-Site Venous Thrombosis Treated with Direct Oral Anticoagulants Versus Vitamin K Antagonists Using Data from Real-World Populations. Clinics and Practice. 2025; 15(12): 237.
16- Cannon JW, Gruen DS, Zamora R, Brostoff N, Hurst K, Harn JH, *et al*. Digital twin mathematical models suggest individualized hemorrhagic shock resuscitation strategies. Communications medicine. 2024; 4(1): 113.
17- Iyer AA, Umadevi K. Design and analysis of TwinCardio framework to detect and monitor cardiovascular diseases using digital twin and deep neural network. Scientific Reports. 2025; 15(1): 24376.
18- Balasubramanyam A, Manwani R, Kalyanpur D, Basavaraju PB, Padmaraju SV, Honnavalli PB, editors. A cardiovascular modeling framework for enabling personalized healthcare: A Digital Twin Approach. 2025 IEEE 13th International Conference on Healthcare Informatics (ICHI); 2025: IEEE.
19- Geddes JR, Jensen CW, Tanade C, Ghorbannia A, Fudim M, Patel MR, *et al*. Digital twins for noninvasively measuring predictive markers of right heart failure .NPJ Digit Med. 2025; 8(1): 545.
20- Sarani Rad F, Bitaraf E, Jafarpour M, Li J. Technologies, clinical applications, and implementation barriers of digital twins in precision cardiology: systematic review. JMIR cardio. 2026; 10: e78499.
21- Zou H, Zheng X, Wu L, Zhang S, Chang P, Chen Y. Digital twins in cardiovascular disease: a scoping review. Int J Med Inform. 2026; 206: 106138.
22- ShojaeiBaghini M, Ghaemi MM, Ahmadipour A. Artificial intelligence in the identification and prediction of adverse transfusion reactions (ATRs) and implications for clinical management: a systematic review of models and applications. BMC Med Inform Decis Mak. 2025; 25(1): 396.
23- Papachristou K, Katsakiori PF, Papadimitroulas P, Strigari L, Kagadis GC. Digital twins' advancements and applications in healthcare, towards precision medicine. J pers med. 2024; 14(11) : 1101.

[Downloaded from bloodjournal.ir on 2026-11-17]

24- Agnusdei GP, Elia V, Gnoni MG. Is digital twin technology supporting safety management? A bibliometric and systematic review. Applied Sciences. 2021; 11(6): 2767.

25- Villamin C, Bates T, Mescher B, Benitez S, Martinez F, Knopfelmacher A, *et al*. Digitally enabled hemovigilance allows real time response to transfusion reactions. Transfusion. 2022; 62(5): 1010-8.

[Downloaded from bloodjournal.ir on 2026-11-17]