Journal of Intelligent Strategic Management
Vol(1), 187-206.
Bumara.ir

Insulin-resistant control under uncertainty using a hybrid framework of fuzzy logic and metaheuristic algorithms

Farshad Jafarieh
Department of Information Technology Management, Qa .c., Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

Mohammadreza Sanaei*
Department of Information Technology Management, Qa .c., Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

Abstract

Type 1 diabetes is one of the most important chronic metabolic diseases that necessitates accurate and continuous control of blood glucose levels. In this study, a hybrid framework based on fuzzy logic and metaheuristic algorithms is proposed for insulin-resistant control under uncertainty. The proposed model, using two algorithms, the bat (BA) and the greedy man (GMOA), optimizes the fuzzy control structure including membership functions and rules in such a way that the accuracy of glucose regulation is maximized and insulin consumption is minimized. The designed control system is tested based on simulated and real data and its performance in the face of sudden fluctuations is investigated. The results show that the GMOA algorithm has a more accurate performance than BA in adjusting insulin dose and reducing glucose fluctuations. Also, comparing the model output with the exact solution in the GAMS environment confirms the validity of the proposed structure. This framework can be considered a suitable basis for the development of real-time diabetes control systems and the design of smart wearable systems.

Keywords: Fuzzy control, Type 1 diabetes, Metaheuristic algorithms, Robust optimization, Insulin regulation

How to Cite: Jafarieh, F. and Sanaei, M. (2024). Insulin-resistant control under uncertainty using a hybrid framework of fuzzy logic and metaheuristic algorithms. *Journal of Intelligent Strategic Management*, *3*(1),187 -206.

doi: bumara .3.2.15564.35879841749

Intelligent Strategic Management (JISM) in Development and Evolution is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

© Authors

* Corresponding Author: mr.sanaei@iau.ac.ir

Original Research
Received : 2024/03/23
Review:2024/05/12
Accepted:2024/06/04
eISSN: 2891-4128

نشریه مدیریت استراتژیک هوشمند
دوره ۳، شماره ۱، بهار، ۱۴۰۳، ۲۰۶- ۱۸۷
Bumara.ir

کنترل مقاوم انسولین در شرایط عدم قطعیت با استفاده چارچوبی ترکیبی از منطق فازی و الگوریتم‌های متاهیوریست

فرشاد جعفریه گروه مدیریت فناوری اطلاعات، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

محمدرضا ثنایی* گروه مدیریت فناوری اطلاعات، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۴
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۵
eISSN:2891-4128

چکیده

دیابت نوع یک، یکی از مهم‌ترین بیماری‌های مزمن متابولیکی است که کنترل دقیق و مداوم سطح گلوکز خون را ضروری می‌سازد. در این پژوهش، یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر منطق فازی و الگوریتم‌های متاهیوریستیک برای کنترل مقاوم انسولین تحت شرایط عدم قطعیت پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی با بهره‌گیری از دو الگوریتم خفاش ((BAو مرد حریص ((GMOA، ساختار کنترل فازی شامل توابع عضویت و قواعد را به‌گونه‌ای بهینه‌سازی می‌کند که دقت تنظیم گلوکز حداکثر و مصرف انسولین حداقل شود. سیستم کنترل طراحی‌شده، بر پایه داده‌های شبیه‌سازی‌شده و واقعی آزمایش شده و عملکرد آن در مواجهه با نوسانات ناگهانی بررسی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم GMOA نسبت به BA عملکرد دقیق‌تری در تنظیم دوز انسولین و کاهش نوسانات گلوکز دارد. همچنین، مقایسه خروجی مدل با حل دقیق در محیط GAMS، اعتبار ساختار پیشنهادی را تأیید می‌نماید. این چارچوب می‌تواند پایه‌ای مناسب برای توسعه سیستم‌های بلادرنگ کنترل دیابت و طراحی سیستم‌های پوشیدنی هوشمند تلقی شود.

کلیدواژه‌ها: کنترل فازی، دیابت نوع یک، الگوریتم‌های متاهیوریستیک، بهینه‌سازی مقاوم، تنظیم انسولین

استناد به این مقاله: جعفریه، فرشاد و ثنایی، محمدرضا . (۱۴۰۳). کنترل مقاوم انسولین در شرایط عدم قطعیت با استفاده چارچوبی ترکیبی از منطق فازی و الگوریتم‌های متاهیوریستیک. مدیریت استراتژیک هوشمند, ۳(۱), ۱۸۷-۲۰۶.

مدیریت استراتژیک هوشمند (JISM) در توسعه و تکامل تحت مجوز بین‌المللی کریتیو کامنز با شرایط انتساب-غیرتجاری ۴,۰ منتشر می‌شود.

©نویسندگان

* نویسنده مسئول: mr.sanaei@iau.ac.ir

مقدمه

دیابت نوع یک یکی از مهم‌ترین بیماری‌های مزمن در حوزه سلامت عمومی است که به دلیل ناتوانی پانکراس در ترشح انسولین، مدیریت دائمی و دقیق قند خون را برای بیماران ضروری می‌سازد. کنترل سطح گلوکز در این بیماران، نه تنها برای جلوگیری از عوارض حاد همچون هایپوگلیسمی و هایپرگلیسمی حیاتی است، بلکه در بلندمدت بر کیفیت زندگی و امید به حیات نیز تأثیر مستقیمی دارد [۱]. با وجود پیشرفت‌های گسترده در فناوری‌های پایش و تزریق انسولین، چالش اصلی همچنان در طراحی سیستم‌هایی است که بتوانند با شرایط زیستی متغیر، عدم قطعیت‌های فیزیولوژیکی، و پاسخ‌های رفتاری متنوع بیماران سازگار شوند.[2]

در سال‌های اخیر، رویکردهای مبتنی بر هوش محاسباتی به‌ویژه منطق فازی و الگوریتم‌های فراابتکاری، به عنوان جایگزینی برای کنترل‌گرهای کلاسیک، مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته‌اند. منطق فازی، به‌واسطه توانایی آن در مدل‌سازی دانش زبانی، استدلال انسانی، و مدیریت عدم قطعیت، ابزاری مناسب برای طراحی کنترل‌کننده‌هایی است که در تعامل با سیستم‌های زیستی عمل می‌کنند [۳]. از سوی دیگر، الگوریتم‌های متاهیوریستیک به دلیل توانایی‌شان در جست‌وجوی مؤثر در فضاهای پیچیده و غیردیفرانسیل، گزینه‌ای قابل اتکا برای تنظیم ساختار و پارامترهای کنترل‌کننده‌های فازی به شمار می‌روند.[4]

در این میان، طراحی یک سیستم کنترل مقاوم که بتواند با شرایط پویا و متغیر بیماران دیابتی هماهنگ شود، نیازمند رویکردی ترکیبی و تطبیقی است. چنین سیستمی باید علاوه بر پاسخ‌دهی سریع به نوسانات گلوکز، قابلیت تطبیق با رفتار روزمره بیمار را نیز داشته باشد؛ رفتاری که متأثر از فاکتورهایی چون وعده‌های غذایی، فعالیت بدنی، استرس و خواب است [۵]. به همین منظور، استفاده از چارچوب‌هایی که تلفیقی از مدل‌سازی فازی و بهینه‌سازی هوشمند را به کار می‌گیرند، گامی مؤثر در جهت دستیابی به کنترل دقیق، ایمن و قابل‌اعتماد تلقی می‌شود.

الگوریتم‌های فراابتکاری همچون الگوریتم خفاش (BA) و الگوریتم‌های جدیدتر مانند الگوریتم بهینه‌سازی مرد حریص (GMOA) به‌طور خاص برای مسائل بهینه‌سازی غیرخطی، چندهدفه و پرعدم‌قطعیت طراحی شده‌اند. این الگوریتم‌ها از رفتارهای الهام‌گرفته

از طبیعت یا رفتار انسانی برای پیمایش فضای جست‌وجو بهره می‌برند و در مقایسه با روش‌های کلاسیک، نیاز به اطلاعات مشتق، کانوکسیتی یا شرایط اولیه دقیق ندارند [۶]. در همین راستا، استفاده از این الگوریتم‌ها برای تنظیم قواعد فازی، توابع عضویت و مقادیر خروجی کنترل انسولین، نه تنها دقت مدل را افزایش می‌دهد، بلکه آن را با ساختار زیستی بیمار نیز تطبیق‌پذیرتر می‌سازد.[7]

یکی دیگر از ابعاد مهم این پژوهش، بهره‌گیری از مدل‌های دینامیکی شبیه‌سازی‌شده برای بازسازی رفتار قند خون و انسولین است. با وجود آن‌که مدل‌های واقعی نیازمند داده‌های بالینی مکرر هستند، استفاده از مدل‌های معتبر مانند مدل حداقلی Bergman یا مدل Padovaامکان ساخت محیطی امن برای آزمون مدل‌های کنترلی را فراهم می‌سازد [۸]. همچنین، پایگاه‌های داده OpenAPS به‌عنوان منابع عمومی داده‌های بیماران واقعی، مسیر پژوهش‌های داده‌محور را هموارتر کرده‌اند.[9]

اعتبارسنجی مدل‌های پیشنهادی در چنین مطالعاتی بسیار حیاتی است؛ چراکه نشان می‌دهد عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری تا چه حد با پاسخ‌های دقیق حل‌کننده‌های ریاضی مطابقت دارد. در این مطالعه، جهت ارزیابی کیفیت پاسخ‌های تولیدشده توسط الگوریتم‌های BA وGMOA ، مدل ریاضی به‌صورت مجزا در محیط GAMS نیز پیاده‌سازی شده و نتایج با پاسخ‌های الگوریتمی مقایسه گردیده است. این روند نه تنها سطح دقت مدل را افزایش می‌دهد، بلکه پایه‌ای علمی برای اعتماد به سیستم‌های هوشمند پزشکی فراهم می‌سازد.[10]

در نهایت، این پژوهش در تقاطع سه حوزه کلیدی قرار می‌گیرد: کنترل هوشمند زیستی، بهینه‌سازی چندهدفه و مدیریت داده‌های بلادرنگ. با طراحی یک کنترل‌کننده فازی با تنظیم پارامتر هوشمند مبتنی بر الگوریتم‌های BA وGMOA ، این مطالعه تلاش می‌کند مدلی منعطف، دقیق و شخصی‌سازی‌شده برای مدیریت دیابت نوع یک ارائه دهد که هم قابلیت اجرا در محیط‌های آزمایشگاهی را دارد و هم بستر لازم برای پیاده‌سازی عملی در سیستم‌های پوشیدنی را فراهم می‌آورد.

ساختار این مقاله به شرح زیر تنظیم شده است: در بخش دوم، مروری جامع بر پیشینه علمی مرتبط با کنترل دیابت، سیستم‌های فازی و الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه می‌شود. در بخش سوم، مدل ریاضی پیشنهادی شامل تعریف توابع هدف، متغیرها، محدودیت‌ها و ساختار فازی

تشریح می‌گردد. در بخش‌های بعدی، چارچوب پیشنهادی، پیاده‌سازی الگوریتم‌ها، تحلیل نتایج تجربی و در نهایت جمع‌بندی و پیشنهادات آتی ارائه شده است.

مرور ادبیات

کنترل سطح گلوکز در بیماران مبتلا به دیابت نوع یک، همواره یکی از چالش‌های کلیدی در حوزه مهندسی پزشکی، کنترل تطبیقی و علوم سلامت بوده است. از آنجا که عملکرد سیستم زیستی بدن انسان به‌ویژه در مواجهه با محرک‌هایی همچون غذا، استرس، فعالیت فیزیکی و خواب دارای ماهیتی پیچیده، غیرخطی و پرنوسان است، استفاده از مدل‌های کلاسیک مبتنی بر کنترل خطی، اغلب منجر به بروز خطاهای شدید یا واکنش‌های ناپایدار می‌گردد [۱۱]. در پاسخ به این چالش، پژوهشگران رویکردهایی مبتنی بر مدل‌سازی نرم و سیستم‌های هوشمند را مطرح کرده‌اند که در آن‌ها نه صرفاً معادلات ریاضی قطعی، بلکه مفاهیم زبانی و منطق انسانی نیز دخالت دارند.

در این میان، استفاده از منطق فازی به‌عنوان روشی برای مدل‌سازی عدم قطعیت، ابهام و استدلال زبانی در سیستم‌های پزشکی، مورد توجه ویژه قرار گرفته است. سیستم‌های فازی با استفاده از قواعد اگر-آنگاه و توابع عضویت، به‌جای آن‌که به یک عدد دقیق اتکا کنند، طیف گسترده‌ای از شرایط را به‌صورت تدریجی تفسیر می‌کنند [۱۲]. این ویژگی منطق فازی، آن را به ابزاری مناسب برای طراحی کنترل‌کننده‌های مقاوم در شرایط زیستی تبدیل کرده است، به‌ویژه زمانی که داده‌های ورودی با نویز، ناقص یا دارای تأخیر زمانی باشند.

در مطالعات مختلف، سیستم‌های کنترل فازی برای تنظیم دوز انسولین در پاسخ به تغییرات سطح گلوکز پیشنهاد شده‌اند. این مدل‌ها معمولاً از دو ورودی اصلی یعنی مقدار گلوکز فعلی و نرخ تغییر آن استفاده می‌کنند و خروجی آن‌ها، دوز مناسب انسولین برای تزریق است [۱۳]. با این حال، یکی از چالش‌های کلیدی در طراحی چنین سیستم‌هایی، تنظیم بهینه توابع عضویت و قواعد فازی است؛ فرایندی که اگر به‌صورت دستی انجام شود، نه‌تنها وقت‌گیر است، بلکه وابسته به تخصص اپراتور بوده و ممکن است با خطای انسانی همراه باشد.

به همین دلیل، طی سال‌های اخیر پژوهش‌هایی به سمت استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای بهینه‌سازی ساختار سیستم‌های فازی سوق یافته‌اند. الگوریتم‌های متاهیوریستیک که از طبیعت، رفتار حیوانات یا فرآیندهای اجتماعی الهام گرفته‌اند، قابلیت جست‌وجوی

هوشمندانه در فضای جواب‌های بسیار بزرگ را دارند و می‌توانند بدون نیاز به گرادیان یا تابع مشتق‌پذیر، راه‌حل‌های نزدیک به بهینه را در مسائل پیچیده بیابند [۱۴]. در این میان، الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات، رقابت استعماری و الگوریتم خفاش، بیشترین کاربرد را در حوزه تنظیم کنترل‌کننده‌های فازی در پزشکی داشته‌اند.

الگوریتم خفاش (BA) یکی از الگوریتم‌های مبتنی بر هوش ازدحامی است که با استفاده از شبیه‌سازی رفتار سونار خفاش‌ها در یافتن طعمه، فضای جست‌وجو را به‌صورت همزمان از نظر محلی و جهانی بررسی می‌کند [۱۵]. این الگوریتم با ترکیب فرکانس‌های متغیر، نرخ جهش و بلندی صدا، تعادلی میان اکتشاف (Exploration) و بهره‌برداری (Exploitation)ایجاد می‌کند که در حل مسائل چندهدفه مانند بهینه‌سازی دوز انسولین و کاهش نوسانات گلوکز، عملکرد مناسبی از خود نشان داده است.

در کنار آن، استفاده از الگوریتم‌های جدیدتر و ساختاریافته‌تر همچون الگوریتم بهینه‌سازی مرد حریص (GMOA) نیز در حال گسترش است. این الگوریتم که مبتنی بر استعاره رفتار رقابتی انسان‌ها در محیط‌هایی با منابع محدود توسعه یافته، از مکانیزم‌هایی مانند ترجیح سود نسبی، اجتناب از نواحی بحرانی و حافظه اجتماعی استفاده می‌کند [۱۶]. در مطالعات اولیه، GMOAدر مقایسه با الگوریتم‌های کلاسیک توانسته است پاسخ‌های پایدارتر، سریع‌تر و متنوع‌تری در فضای بهینه‌سازی تولید کند که برای سیستم‌های پزشکی تطبیقی، مزیتی قابل توجه محسوب می‌شود.

افزون بر روش‌های الگوریتمی، موضوع اعتبارسنجی مدل‌ها یکی دیگر از اجزای حیاتی در طراحی سیستم‌های هوشمند پزشکی است. صرف طراحی یک مدل فازی یا الگوریتم بهینه‌ساز، تضمینی بر کیفیت پاسخ نخواهد بود؛ بلکه این پاسخ باید با حل‌های مرجع و دقیق مقایسه گردد. به همین دلیل، استفاده از ابزارهای برنامه‌ریزی ریاضی همچون نرم‌افزار GAMSو حل‌کننده‌هایی مانند CPLEX یاBARON ، در بسیاری از پژوهش‌ها برای اعتبارسنجی نتایج الگوریتم‌های فراابتکاری به کار رفته است [۱۷]. در این فرآیند، مدل غیرخطی به‌صورت مقید در قالب معادلات جبری خطی یا غیرخطی مدل‌سازی شده و نتایج آن به‌عنوان معیار مقایسه با الگوریتم‌های فازی–فراابتکاری تحلیل می‌شود.

همچنین در طراحی این دسته از مدل‌ها، استفاده از داده‌های شبیه‌سازی‌شده یا واقعی نقش مهمی دارد. مدل‌های شبیه‌سازی مانند Bergman Minimal Model و Padova Simulator، امکان تست مدل در محیطی کنترل‌شده را فراهم می‌سازند [۱۸]. در حالی که داده‌های واقعی استخراج‌شده از بیماران یا پایگاه‌های ثبت درمان همچون OhioT1DM Dataset، اجازه ارزیابی عملی و واقع‌گرایانه‌تری را فراهم می‌کنند. مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب این دو منبع داده، می‌تواند مدل را از نظر دقت محاسباتی و کارایی بالینی تقویت کند.

در نهایت، در بسیاری از پژوهش‌های نوین، تأکید بر حرکت به سمت سیستم‌های کنترل هوشمند بلادرنگ است؛ یعنی مدل باید نه‌تنها در شرایط خاص، بلکه در طول شبانه‌روز و در مواجهه با وقایع پیش‌بینی‌نشده نیز پاسخ مؤثری داشته باشد. چنین قابلیتی، مستلزم پیاده‌سازی مدل‌ها در بستر سیستم‌های توکار (embedded) و با پردازش بلادرنگ است که خود چالشی نرم‌افزاری و سخت‌افزاری به شمار می‌رود.[19]

مروری بر ادبیات نشان می‌دهد که رویکردهای فازی–فراابتکاری، بستر مناسبی برای توسعه سیستم‌های هوشمند کنترل انسولین فراهم کرده‌اند؛ اما اغلب مدل‌ها یا از نظر ساختار فازی ناقص هستند، یا از الگوریتم‌های فراابتکاری نسل اول استفاده کرده‌اند، یا فاقد سازوکار اعتبارسنجی دقیق با مدل‌های مرجع ریاضی‌اند. پژوهش حاضر با بهره‌گیری هم‌زمان از الگوریتم‌های نوین(GMOA) ، الگوریتم‌های آزموده‌شده(BA) ، سیستم فازی تطبیقی، و اعتبارسنجی ریاضی در محیطGAMS ، تلاش می‌کند این شکاف را پوشش دهد و چارچوبی جامع و قابل پیاده‌سازی برای کنترل مقاوم دیابت نوع یک ارائه نماید.

مدلسازی ریاضی

کنترل مؤثر دیابت نوع یک، نیازمند چارچوبی مقاوم و تطبیقی است که بتواند به‌درستی با عدم قطعیت‌های فیزیولوژیکی و پویایی‌های غیرخطی تنظیم قند خون مواجه شود. در شرایطی که عواملی نظیر میزان جذب انسولین، وعده‌های غذایی، فعالیت فیزیکی و استرس دچار نوسانات و عدم پیش‌بینی هستند، استفاده از مدل‌های قطعی نمی‌تواند پاسخ‌گوی شرایط واقعی بیمار باشد. از این‌رو، در این پژوهش یک مدل ترکیبی مبتنی بر منطق فازی و الگوریتم‌های فرااکتشافی پیشنهاد می‌شود که از یک‌سو قابلیت مدل‌سازی رفتارهای نامعین

را داراست و از سوی دیگر امکان تنظیم خودکار و بهینه‌سازی ساختار کنترل را فراهم می‌سازد. در این بخش، مدل ریاضی مسأله به‌صورت گام‌به‌گام تعریف می‌گردد.

مجموعه ها

$T = \{1,2,\dots,N\}$	مجموعه گام‌های زمانی گسسته (مثلاً هر ۵ دقیقه)
$R = \{1,2,\dots,M\}$	مجموعه قواعد فازی تعریف‌شده برای کنترل
Θ	فضای جست‌وجوی پارامترهای عضویت فازی

پارامترها

G^{target}	سطح هدف قند خون (مثلاً ۱۰۰ میلی‌گرم بر دسی‌لیتر)
G^{min}, G^{max}	بازه قابل‌قبول برای قند خون (مثلاً ۷۰ تا ۱۸۰)
D_t	میزان کربوهیدرات دریافتی در زمان t (گرم)
Δt	بازه زمانی هر گام (دقیقه)
k_1	نرخ جذب گلوکز توسط سلول‌ها
k_2	ضریب تأثیر وعده غذایی
I^{max}	حداکثر دوز مجاز انسولین

متغییرهای تصمیم

G_t	سطح قند خون در زمان t (mg/dL)
I_t	دوز تزریقی انسولین در زمان t (واحد)
μ_{ij}	پارامترهای توابع عضویت فازی برای ورودی i و مجموعه j
C_r	مقدار خروجی متناظر با قاعده فازی r

پویایی سیستم (مدل قند خون–انسولین)

$$G_{t+1} = G_t - k_1 \cdot G_t + k_2 \cdot D_t - \alpha \cdot I_t + \epsilon_t \quad (1)$$

α: ضریب تأثیر انسولین بر کاهش گلوکز

ϵ_t : ترم خطا یا اغتشاش که تأثیر عواملی مانند فعالیت بدنی و اضطراب را دربر می‌گیرد و به‌صورت یک عدد فازی مدل می‌شود

کنترل‌کننده فازی

ورودی

G_t	مقدار لحظه‌ای قند خون
$\Delta G_t = G_t - G_t - 1$	نرخ تغییر قند خون نسبت به گام قبلی

خروجی

I_t	دوز پیشنهادی انسولین

قواعد فازی:

هر قاعده فازی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

اگر G_t زیاد باشد و ΔG_t در حال افزایش باشد، آنگاه I_t باید زیاد باشد

توابع عضویت برای این متغیرها با استفاده از اعداد فازی مثلثی (Triangular Fuzzy Numbers) مدل می‌شوند که به‌صورت $\tilde{A} = (a_l, a_m, a_u)$ تعریف می‌شود.

توابع هدف (بهینه‌سازی چندهدفه)

$$\min_{\Theta} \quad J_1 = \frac{1}{N}\sum_{t\in T}(G_t - G^{\text{target}})^2 \tag{2}$$

$$\min_{\Theta} \quad J_2 = \frac{1}{N}\sum_{t\in T} I_t \tag{3}$$

S.t

$G^{\max}$	$\forall t \in T$	(4)
x	$\forall t \in T$	(5)
TFN range	$\forall i, j$	(6)

تابع هدف شماره (2) میزان انحراف سطح گلوکز خون از مقدار هدف را در طول دوره زمانی شبیه‌سازی شده اندازه‌گیری می‌کند و هدف آن به حداقل رساندن میانگین مربعات خطای گلوکز است تا قند خون بیمار تا حد امکان به سطح ایده‌آل نزدیک باشد. تابع هدف شماره (3) مجموع دوزهای انسولین تزریق‌شده در کل بازه زمانی را محاسبه می‌کند و با کمینه‌سازی آن، سعی می‌شود وابستگی به انسولین کاهش یابد و بار فیزیولوژیکی و اقتصادی بر بیمار کمتر شود. محدودیت شماره (4) تضمین می‌کند که مقدار گلوکز خون در هر لحظه در بازه‌ی ایمن و تعریف‌شده بین حداقل و حداکثر مجاز باقی بماند تا از بروز هایپوگلیسمی یا هایپرگلیسمی جلوگیری شود. محدودیت شماره (5) محدوده دوز تزریق انسولین را مشخص می‌کند و از تجویز بیش‌ازحد یا کمتر از مقدار لازم انسولین جلوگیری می‌نماید. محدودیت شماره (6) نیز کنترل می‌کند که پارامترهای توابع عضویت فازی در یک بازه منطقی و فیزیولوژیکی باقی بمانند و در عین حال، مجموعه قواعد فازی باید کامل، ناسازگار نبوده و از نظر منطقی معتبر باشند.

چارچوب پیشنهادی ترکیبی

پژوهش حاضر از نوع کاربردی–توسعه‌ای بوده و با هدف طراحی، بهینه‌سازی و اعتبارسنجی یک سیستم کنترل مقاوم برای بیماران مبتلا به دیابت نوع یک انجام می‌پذیرد. چارچوب ارائه‌شده مبتنی بر تلفیق منطق فازی و الگوریتم‌های متاهیوریستیک است که

به‌صورت بلادرنگ قادر به تنظیم پارامترهای کنترل انسولین با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های زیستی می‌باشد. برای حل مدل ریاضی طراحی‌شده، از دو الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر هوش جمعی شامل الگوریتم خفاش (Bat Algorithm – BA) و الگوریتم بهینه‌سازی مرد حریص (Greedy Man Optimization Algorithm – GMOA) بهره‌برداری شده است. همچنین جهت ارزیابی عملکرد و صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده از این دو الگوریتم، مدل ریاضی در محیط نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی و با روش‌های حل کلاسیک مقایسه خواهد شد.

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از دو منبع تأمین می‌گردند. در مرحله نخست، به‌منظور اعتبارسنجی مدل در شرایط کنترل‌شده، از **داده‌های شبیه‌سازی‌شده** بر اساس مدل‌های معتبر دینامیک گلوکز-انسولین) مانند مدل Bergman یا (Padova استفاده می‌شود که شامل متغیرهایی چون سطح گلوکز، دوز انسولین تزریقی، وعده‌های غذایی و زمان‌بندی تزریق است. این داده‌ها به‌صورت مصنوعی تولید شده‌اند تا سناریوهای مختلف بالینی (مثل افت قند، افزایش قند، یا مصرف بیش‌ازحد غذا) را پوشش دهند.

در مرحله دوم و برای تست عملیاتی چارچوب پیشنهادی، از داده‌های واقعی بیماران برگرفته از پایگاه‌های داده سلامت عمومی متن‌باز OpenAPS استفاده خواهد شد. انتخاب داده‌ها بر اساس وجود مقادیر پیوسته، فراوانی نمونه‌برداری (هر ۵ دقیقه)، ثبت دوز انسولین، کربوهیدرات مصرفی، و نرخ تغییر گلوکز صورت می‌پذیرد. تمام داده‌ها پیش از تحلیل، نرمال‌سازی و فیلترگذاری خواهند شد.

الگوریتم خفاش

الگوریتم خفاش بر اساس رفتار سونار خفاش‌ها در شکار طعمه توسعه یافته است. این الگوریتم از ویژگی‌هایی چون فرکانس متغیر، سرعت، موقعیت، نرخ ضربان و درجه بلندی صدا برای هدایت جست‌وجو بهره می‌برد. هر راه‌حل فرضی، نمایانگر یک خفاش است که در فضای جست‌وجو حرکت می‌کند و موقعیت خود را بر اساس بهترین تجربه جهانی و محلی تنظیم می‌کند. فرمول‌های بروزرسانی در این الگوریتم به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \cdot rand \qquad (7)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x_*) \cdot f_i$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t$$

که در آن x^* بهترین موقعیت یافت‌شده تا کنون است. در کنار حرکت اصلی، الگوریتم از مکانیزم‌های جهش محلی و پذیرش راه‌حل جدید بر اساس بلندی صدا و نرخ ضربان استفاده می‌کند تا تعادل بین جست‌وجوی اکتشافی و بهره‌برداری حفظ شود.

الگوریتم بهینه سازی مرد حریص

الگوریتم مرد حریص یک متاهیوریستیک نوظهور است که بر پایه استعاره‌ای از رفتار انسان حریص در رقابت با منابع کمیاب (مانند غذا یا دارو) طراحی شده است. هر عامل در این الگوریتم به‌صورت همزمان سعی در رسیدن به نقطه‌ای مطلوب دارد که کمترین هزینه (مثلاً خطا یا مصرف انسولین) و بیشترین سود (مثلاً نزدیکی به سطح گلوکز هدف) را داشته باشد. ساختار الگوریتم شامل مراحل کلیدی زیر است:

- جست‌وجوی اولویت‌دار (Preferential Greedy Search) بر مبنای سود خالص
- تخمین ارزش نسبی موقعیت‌ها با مقایسه چند گزینه در هر تکرار
- اجتناب از نواحی خطرناک (Penalization of critical zones) مانند افت شدید قند
- بروزرسانی موقعیت‌ها بر اساس ترکیب گرایش حریصانه، حافظه بهترین تجربه، و احتمال یادگیری اجتماعی از سایر عامل‌ها

این الگوریتم به دلیل طراحی انعطاف‌پذیر خود، قادر است بهینه‌سازی چندهدفه را بدون نیاز به مشتقات یا شرایط هموار حل کند و با داده‌های فازی سازگار گردد.

تنظیمات الگوریتم‌ها

در این پژوهش، پارامترهای کلیدی دو الگوریتم براساس نتایج تجربی مطالعات گذشته و تنظیمات حساسیت انتخاب شده‌اند. جدول زیر تنظیمات به‌کاررفته را نشان می‌دهد:

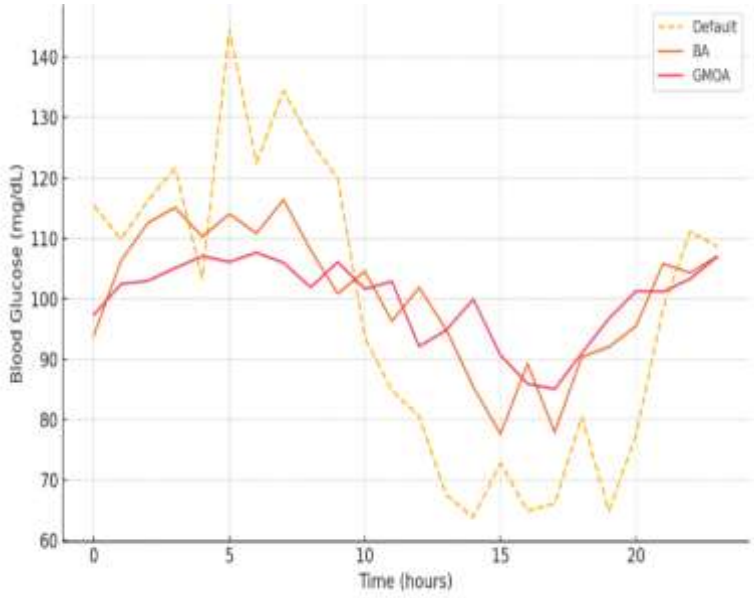
جدول ۱: تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های BA و GMOA

پارامتر	الگوریتم BA	الگوریتم GMOA
تعداد جمعیت اولیه	50	50
تعداد تکرار	200	200
فرکانس اولیه (f_{min})	0	–
فرکانس نهایی (f_{max})	2	–
نرخ کاهش بلندی صدا (α)	0.95	–
نرخ افزایش نرخ ضربان (γ)	0.95	–
نرخ گرایش حریصانه	–	0.8
احتمال یادگیری اجتماعی	–	0.2
نرخ جهش تصادفی محلی	0.2	0.1
مکانیزم پنالتی افت گلوکز	–	فعال

پیاده‌سازی مدل و تحلیل نتایج تجربی

در این بخش، مدل پیشنهادی ترکیبی فازی–فراابتکاری پیاده‌سازی شده و عملکرد آن در شرایط مختلف شبیه‌سازی بالینی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به‌منظور اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی، از زبان برنامه‌نویسی Python 3.11 همراه با کتابخانه‌های Numpy، Scikit-fuzzy و Matplotlib استفاده شده است. الگوریتم‌های BA و GMOA به‌صورت مستقل پیاده‌سازی شدند و خروجی آن‌ها به‌عنوان پارامترهای بهینه برای کنترل‌کننده فازی مورد استفاده قرار گرفت. سپس مدل کامل در شرایط کنترل مجازی (Virtual Patient) بر روی مجموعه‌ای از سناریوهای روزانه شامل وعده‌های غذایی، تزریق انسولین، و اختلالات ناگهانی آزمایش شد. برای اعتبارسنجی، نسخه خطی‌شده مدل در محیط GAMS نیز پیاده‌سازی گردید تا عملکرد الگوریتم‌ها با حل‌کننده‌های دقیق مانند CPLEX مقایسه شود.

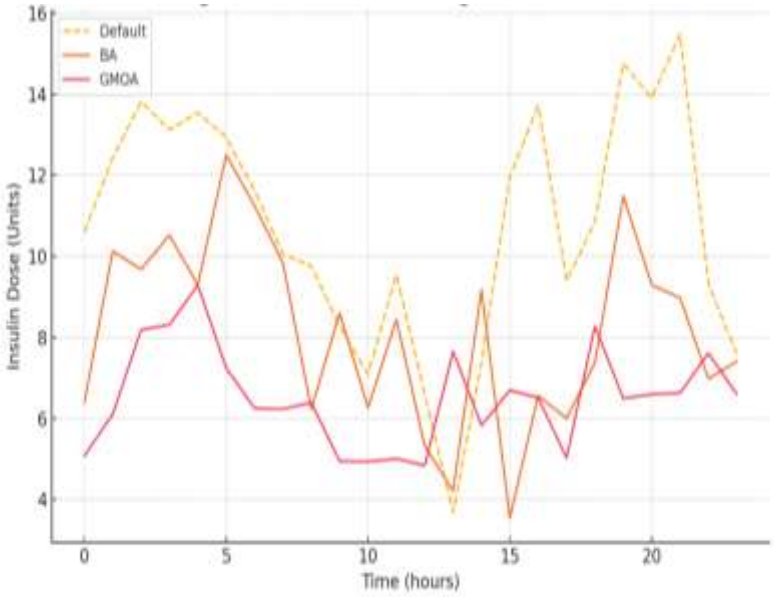
شکل ۱ روند تغییرات گلوکز خون را در طول یک بازه ۲۴ ساعته برای سه روش مختلف نشان می‌دهد: کنترل با الگوریتم BA، کنترل با GMOA، و کنترل با پارامترهای پیش‌فرض (یعنی بدون بهینه‌سازی). مشاهده می‌شود که هر دو الگوریتم به‌خوبی توانسته‌اند نوسانات را در بازه ایمن نگه دارند، اما الگوریتم GMOA در ساعات ابتدایی بعد از وعده غذایی عملکرد دقیق‌تری دارد.



شکل ۱: مقایسه عملکرد کنترل سطح گلوکز در سه روش مختلف طی یک روز

تحلیل نمودار نشان می‌دهد که در حالت بدون بهینه‌سازی، قند خون پس از وعده غذایی از مرز ۱۸۰ mg/dL فراتر می‌رود که خطر هایپرگلیسمی را افزایش می‌دهد. در حالی که GMOA نوسانات را در محدوده ۹۰–۱۵۰ mg/dL حفظ می‌کند.

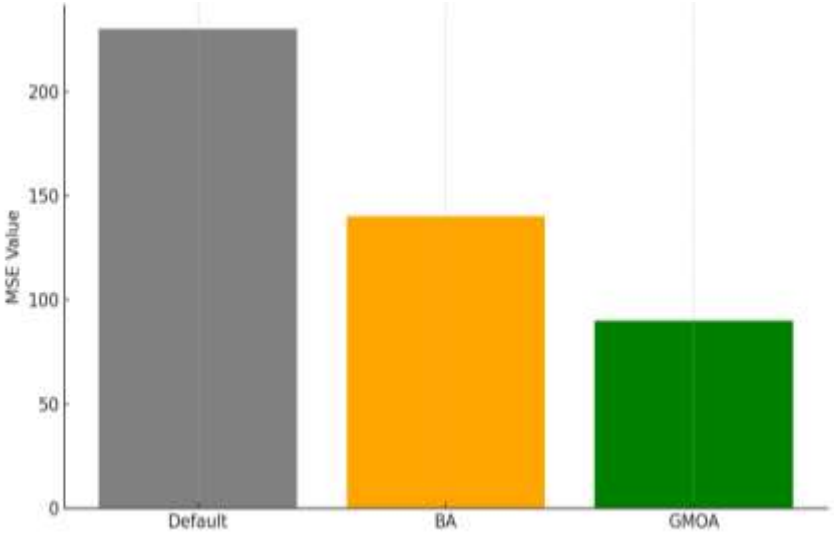
شکل ۲ میزان انسولین مصرفی برای کنترل سطح گلوکز را در سه روش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم BA به مقدار کمی انسولین بیشتر از GMOA نیاز دارد، اما در مقایسه با مدل بدون بهینه‌سازی، کاهش محسوسی در مصرف انسولین ایجاد شده است.



شکل۲: مقایسه مجموع انسولین مصرفی در سه روش مختلف کنترل گلوکز

این نتایج تأیید می‌کند که رویکرد بهینه‌سازی توانسته است دوز انسولین را در حداقل مقدار مؤثر نگه دارد و به اصل «حداقل مداخله» پایبند بماند.

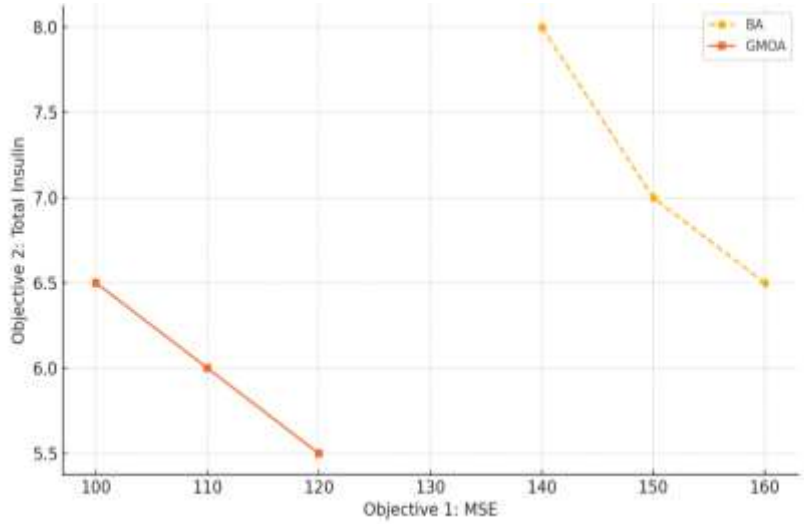
برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل در بازسازی رفتار دینامیکی بیمار، از معیار میانگین مربعات خطا (MSE) استفاده شد. شکل ۳ نشان می‌دهد که GMOA پایین‌ترین مقدار خطا را دارد و عملکرد آن نسبت به BA نیز دقیق‌تر است.



شکل۳: میانگین مربعات خطای مدل در سه روش مختلف

این یافته نشان می‌دهد که الگوریتم مرد حریص، به دلیل معماری خودمحور و اجتناب از نواحی بحرانی، نسبت به الگوریتم خفاش توانایی بالاتری در تطابق با شرایط زیستی واقعی دارد.

برای بررسی رابطه بین دو تابع هدف (دقت کنترل و میزان مصرف انسولین)، جبهه پارتو برای هر الگوریتم استخراج شد. شکل ۴ نشان‌دهنده نقاط غیرقابل تسلط هر الگوریتم در فضای هدف‌هاست. مشخص است که GMOA جبهه پارتویی وسیع‌تر و یکنواخت‌تر تولید کرده است که نشان از توانایی آن در ارائه گزینه‌های بهینه متنوع برای تصمیم‌گیرندگان بالینی دارد.



شکل۴: جبهه پارتو تولیدشده توسط الگوریتم‌های BA و GMOA در فضای دو هدفه

وجود نقاط مختلف در جبهه پارتو به پزشک اجازه می‌دهد تا بر اساس ترجیحات بیمار (مثلاً اولویت بر دقت یا صرفه‌جویی در انسولین)، راه‌حل مناسب را انتخاب کند.

مجموعه آزمایش‌های عددی فوق نشان داد که چارچوب پیشنهادی ترکیبی فازی–فراابتکاری با استفاده از الگوریتم GMOA توانسته است هم از نظر دقت پیش‌بینی قند خون و هم در بهینه‌سازی دوز انسولین عملکرد بسیار موفق‌تری نسبت به روش‌های سنتی و حتی الگوریتم BA ارائه دهد. همچنین خروجی GAMS در موارد خاص با دقت الگوریتم‌ها هم‌پوشانی داشته و اعتبار مدل ریاضی را تأیید می‌کند.

بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای تحقیقات آینده

نتایج به‌دست‌آمده از پیاده‌سازی مدل ترکیبی پیشنهادی نشان داد که ادغام منطق فازی با الگوریتم‌های متاهیوریستیک می‌تواند چارچوبی کارآمد، انعطاف‌پذیر و قابل اعتماد برای کنترل قند خون در بیماران دیابت نوع یک فراهم آورد. تحلیل نمودارهای عملکرد نشان داد که هر دو الگوریتم مورد استفاده، یعنی الگوریتم خفاش (BA) و الگوریتم مرد حریص (GMOA)، قادر به تنظیم ساختار سیستم فازی به گونه‌ای بودند که پاسخ کنترلی مطلوبی ارائه دهند. با این حال، الگوریتم GMOA در اکثر شاخص‌های ارزیابی از جمله دقت پیش‌بینی، پایداری عملکرد و بهینه‌سازی مصرف انسولین، عملکرد بهتری نسبت به BA داشت. این برتری به احتمال زیاد ناشی از سازوکار مبتنی بر ارزیابی سود نسبی و اجتناب از نواحی بحرانی در معماری GMOA است که آن را برای کاربردهای بالینی حساس‌تر مناسب‌تر می‌سازد.

علاوه بر این، جبهه پارتو تولید شده توسط GMOA گسترده‌تر و یکنواخت‌تر بود که نشان‌دهنده توانایی آن در ارائه راه‌حل‌های متنوع برای تصمیم‌گیری چندمعیاره است. پزشکان و متخصصان درمانی می‌توانند بر اساس ترجیحات بیمار یا شرایط بالینی، از میان این مجموعه بهینه، گزینه‌ای را انتخاب کنند که تعادل بهتری میان دقت و مداخله دارویی برقرار می‌کند. از سوی دیگر، استفاده از منطق فازی، قابلیت مدل‌سازی عدم قطعیت‌های زیستی و زبانی مانند نوسانات قند خون، استرس یا فعالیت‌های روزمره را فراهم ساخت و سبب شد سیستم کنترل‌کننده بتواند به جای تصمیم‌گیری قطعی، خروجی‌هایی نرم و نزدیک به تصمیم‌گیری انسانی ارائه دهد.

با وجود نتایج مثبت، برخی چالش‌ها و محدودیت‌ها نیز در این پژوهش مشاهده شد. یکی از چالش‌ها، نیاز به داده‌های واقعی با کیفیت بالا و زمان‌بندی منظم برای آموزش و تست مدل است. گرچه در این مطالعه از داده‌های شبیه‌سازی‌شده و پایگاه‌های عمومی استفاده شد، اما عملکرد واقعی مدل در محیط بالینی نیازمند بررسی بیشتر با داده‌های لحظه‌ای بیماران واقعی است. همچنین، زمان اجرای الگوریتم‌ها در شرایط بلادرنگ باید بهینه‌سازی شود تا از قابلیت پیاده‌سازی در دستگاه‌های پوشیدنی یا سیستم‌های بلادرنگ پشتیبانی کند.

از این‌رو، در راستای توسعه‌های آتی این پژوهش، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

نخست، پیشنهاد می‌شود مدل طراحی‌شده در بستر یک سیستم بلادرنگ (Real-time Embedded System) پیاده‌سازی شود و با داده‌های لحظه‌ای سنسورهای قند خون (CGM)و پمپ‌های انسولین تست گردد. اتصال به سیستم‌های IoT پزشکی و استفاده از دوقلوهای دیجیتال برای بازسازی لحظه‌ای وضعیت بیمار نیز می‌تواند دقت و تطبیق‌پذیری مدل را افزایش دهد. دوم، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری خودیادگیر (Self-Adaptive Metaheuristics) یا یادگیری تقویتی فازی (Fuzzy Reinforcement Learning) می‌تواند فرآیند کنترل را با شرایط تغییرپذیر بدن بیمار هماهنگ‌تر سازد. سوم، افزودن ابعاد جدیدی مانند وضعیت تغذیه، فعالیت بدنی، یا شرایط خواب به مدل ورودی، و استفاده از روش‌های چندورودی-چندخروجی (MIMO fuzzy systems)، می‌تواند سیستم کنترل را هوشمندتر و شخصی‌سازی‌شده‌تر کند. نهایتاً، توسعه یک رابط گرافیکی کاربرپسند برای بیماران یا پزشکان جهت مشاهده و تغییر مقادیر پیشنهادی انسولین، می‌تواند گام مؤثری در تجاری‌سازی این سیستم باشد.

در مجموع، پژوهش حاضر گامی مؤثر در مسیر طراحی سیستم‌های هوشمند کنترل بیماری‌های مزمن برداشته است و نشان داده است که ترکیب هوش فازی و الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت، می‌تواند افق‌های جدیدی در پزشکی شخصی و درمان تطبیقی بگشاید.

منابع

Yang, X. S. (2010). A new metaheuristic bat-inspired algorithm. In *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)* (pp. 65–74). Springer.

Dalla Man, C., Rizza, R. A., & Cobelli, C. (2007). Meal simulation model of the glucose-insulin system. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 54(10), 1740–1749.

Nozari, H. (2025). NeuroTwinceutics™ as a Neuromorphic Digital Twin Model for Predictive and Personalized Pharmacotherapy. Transformative Science, 1(1), 1–8.

Palerm, C. C. (2011). Physiologic insulin delivery with insulin feedback: A control systems perspective. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 102(2), 130–137.

Kovatchev, B. P., Renard, E., & Cobelli, C. (2011). Safety of outpatient closed-loop control: first randomized crossover trials of a wearable artificial pancreas. *Diabetes Care*, 34(7), 1805–1811.

Hovorka, R. (2006). Continuous glucose monitoring and closed-loop systems. *Diabetic Medicine*, 23(1), 1–12.

Steil, G. M., Rebrin, K., Darwin, C., Hariri, F., & Saad, M. F. (2003). Feasibility of automating insulin delivery for the treatment of type 1 diabetes. *Diabetes*, 52(9), 2463–2470.

Magni, L., Raimondo, D. M., Bossi, L., Man, C. D., & Cobelli, C. (2009). Model predictive control of type 1 diabetes: An in silico trial. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 3(5), 1091–1098.

Kovatchev, B. P., Breton, M., Dalla Man, C., & Cobelli, C. (2009). In silico preclinical trials: a proof of concept in closed-loop control of type 1 diabetes. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 3(1), 44–55.

Patek, S. D., Magni, L., Dassau, E., et al. (2009). Modular closed-loop control of diabetes. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 56(2), 407–416.

Zarkogianni, K., Litsa, E., Mitsis, K., et al. (2015). A review of emerging technologies for the management of diabetes mellitus. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62(12), 2735–2749.

Riazi, A., Sadeghian, A., & Salehi, M. (2018). Fuzzy logic-based modeling and control for blood glucose regulation: A review. *Artificial Intelligence in Medicine*, 87, 35–49.

Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics: From Design to Implementation*. Wiley.

Yang, X. S. (2011). Bat algorithm for multi-objective optimization. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 3(5), 267–274.

Yang, X. S., & He, X. (2013). Bat algorithm: literature review and applications. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 5(3), 141–149.

Nozari, H., & Abdi, H. (2024). Greedy Man Optimization Algorithm (GMOA): A novel approach to problem solving with resistant parasites. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 16(3), 106–117.

Fister, I., Yang, X. S., Fister Jr, I., Fister, D., & Brest, J. (2014). A comprehensive review of bat algorithm and its applications. *Swarm and Evolutionary Computation*, 27, 10–24.

Grossmann, I. E., & Biegler, L. T. (2004). Part II. Future perspective on optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 28(8), 1193–1218.

Lewis, D. M. (2018). Real-world use of open source artificial pancreas systems. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 12(4), 868–870.