



Islamic Azad University , Shiraz Branch
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis



نشریه

تحلیل مدارها،

داده ها

و سامانه ها





نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها

هیأت تحریریه

مدیر مسئول	دکتر حامد آگاهی	دانشگاه آزاد اسلامی شیراز
سر دبیر	دکتر طاهر نیکنام	دانشگاه صنعتی شیراز
مدیر داخلی	دکتر زهرا مقصودزاده سروسرستانی	دانشگاه آزاد اسلامی شیراز

هیأت تحریریه

استاد	دکتر طاهر نیکنام	دانشگاه صنعتی شیراز
استاد	دکتر رحیم غیور	دانشگاه شیراز
استاد	دکتر حبیب اله عبیری	دانشگاه شیراز
استاد	دکتر حمید خالوزاده	دانشگاه صنعتی خواجه نصیر
استاد	دکتر اصغر کشت کار	دانشگاه بین المللی امام خمینی
استاد	دکتر محمدباقر منهج	دانشگاه صنعتی امیرکبیر
استاد	دکتر محمد ناصر مقدسی	دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات
استاد	دکتر حسن توکلی	دانشگاه علوم پزشکی بقیه الله
استاد	دکتر سید ابراهیم افجه ای	دانشگاه شهید بهشتی
دانشیار	دکتر حامد آگاهی	دانشگاه آزاد اسلامی شیراز
دانشیار	دکتر احمد فخاریان	دانشگاه آزاد اسلامی قزوین
دانشیار	دکتر امیرمسعود افتخاری مقدم	دانشگاه آزاد اسلامی قزوین
دانشیار	دکتر مجید ابن علی	دانشگاه شهرکرد
دانشیار	دکتر محمدصادق جوادی	دانشگاه آزاد اسلامی شیراز



نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها

سال دوم- شماره چهارم - زمستان ۱۴۰۳

فهرست مقالات

ردیف	عنوان مقاله / نویسندگان	صفحه
۱	معرفی یک معماری جدید CMOS-MTJ برای کمپرسورهای تقریبی ۴:۲ سریع و کم توان: بررسی کاربردهای آنها در پردازش تصویر فرحناز ذاکریان	۱
۲	ساخت بار مقاومتی جهت تست دیزل ژنراتورهای اضطراری سامانه ها سید حامد حسینی نژاد، مژده حیدریان اصل	۱۴
۳	مروری بر مدل های انگیزش درونی یادگیری ماشین سعید جمالی، سعید ستایشی، محسن جهانشاهی، سجاد تقوایی	۲۴
۴	سیستم تصمیم گیری فازی برای اولویت بندی فرآیندها به منظور تعیین استراتژی های بهینه حسین اکبری، مهدی باقری زاده	۵۴
۵	تاثیر طراحی اقلیمی ساختمان بر کاهش انرژی نهفته و مقایسه با برق مصرفی (نمونه موردی شهر شیراز) آذر زینلی خراجی، مریم حق پناه	۷۰
۶	استفاده از شبکه های عصبی کانولوشن جهت تعیین اندازه تومور و متاستاز غدد لنفاوی در تصاویر تشدید مغناطیسی بیماران سرطان کولون محمد رضا هدیه زاده، مهدی یوسفی	۸۰



Islamic Azad University, Shiraz Branch

نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis

sanad.iau.ir/journal/jcdsa



Introducing a new CMOS-MTJ architecture for fast and highly low power 4:2 approximate compressors: insights into their applications in image processing

Farahnaz Zakerian^{1*}

¹ Department of Electrical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran

farahnaz.zakerian@iau.ac.ir

Abstract: The performance of digital signal processors (DSPs) can be improved by introducing some acceptable errors, such as the inaccuracy of hardware computational blocks. In fault-tolerant signal and image processing, approximation multipliers are used. These programs are superior in speed and energy efficiency but sacrifice accuracy. In this paper, we focus on the design of a 4:2 approximation compressor, which is at the heart of the inexact multipliers. This study proposes a concept for an approximation multiplier that uses an MTJ-based 4:2 approximation compressor to reduce hardware and power consumption compared to current designs. Using 180 nm CMOS technology and a novel adiabatic MTJ/CMOS hybrid structure, a method is proposed to create compressor circuits with a 4:2 approximation compressor. The evaluation findings in the above-mentioned technology show a significant improvement in the proposed system. The compressor performance was simulated in ADS and calculated in terms of delay, power and power delay product (PDP) with values of 969.53 μ j, 067.41 ps and 216.2 fsj, respectively. When multiplying images in MATLAB, the proposed compressor is used to simulate an 8 $\times$ 8 multiplier. The MSSIM and PSNR are competitive with values of 26.79 and 15.52, respectively, which is comparable to more complex approximation coefficients.

Keywords: Approximate multiplier, MATLAB, 4:2 compressor, Adiabatic MTJ/CMOS hybrid structure, ADS.

JCDSA, Vol. 2, No. 4, Winter 2025

Received: 2024-09-02

Online ISSN: 2981-1295

Accepted: 2025-01-07

Journal Homepage: <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa>

Published: 2025-03-20

CITATION

Zakerian, F., "Introducing a new CMOS-MTJ architecture for fast and highly low power 4:2 approximate compressors: insights into their applications in image processing", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 2, No. 4, pp. 1-13, 2025.

DOI: 00.00000/0000

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

1- Introduction

Utilizing unconventional CMOS devices and new nanotechnology is one method for minimizing leakage power in low-power electronics design. Low-power applications can benefit greatly from the usage of some developing technologies. The non-volatile memory known as magnetic tunnel junction (MTJ) provides a fast access time, a small footprint, and is compatible with CMOS technology. Thus, it is well-suited for implementations in in-memory logic systems. Since MTJ-based LiM structures have nearly negligible quiescent power dissipation, they are ideally suited for low power systems. Because of their high performance, digital signal processors (DSPs) provide excellent computing platforms for handling multimedia.

Multiplier circuits are commonly employed in the image processing industry. To improve the circuit's efficiency and shorten the critical route delay, compressors are employed for summing. Since more efficient multipliers require faster compressors, this necessitates lowering their power requirements. To improve performance while decreasing power consumption, 4:2 and 5:2 compressors are commonly utilized in modern multiplier designs.

In this study, we introduce a new logical design for an approximate 4:2 compressor and use it to develop an approximate multiplier. To do this, cutting-edge hybrid adiabatic compressors are incorporated into the multiplier circuit. Current-mode logic circuit design significantly decreases the time it takes for an output to be generated. Therefore, the performance of the multiplier circuit can be greatly enhanced by designing the central section, which comprises of compressors, in MTJ/CMOS technology.

2- Methodology

A broad variety of silicon FET (MOSFET or FinFET) based compressors are built on the same two essential logic blocks, regardless of whether they are designed for precision or non-precision 4:2 compressors. In this work, 4:2 compressor in CMOS-MTJ technology was proposed using the adibatback logic design. Therefore, the truth table of the approximation mode and the magnitude of the approximation error are described first to introduce the design of the 4:2 approximation compressors. Next, the logical circuit structure of the approximation compressor is shown and its circuit function is introduced at the gate level. Adibatback logic in CMOS-MTJ technology is used to create and design the approximation models described in this article at the transistor level. Through simulation in ADS, it is ensured that base gates and non-precision compressors operate correctly. Following the compressor architectural design, this part explains the approximate multiplier architecture that was employed to test the suggested approximation compressor. While the outputs of this multiplier architecture have an acceptable accuracy when compared to the exact multiplier, it should be noted

that all of the 4:2 compressor components utilized in this article's proposed multiplier are approximate.

3- Results and discussion

All of the suggested compressors are built on 180 nm CMOS-MTJ technology, run at 1 GHz, and require only 0.9 v of bias voltage. Transistor count, latency, power, and PDP metrics are all examples of operational efficiency metrics that can be used to analyze the quality of the proposed hardware architecture. Less transistors means a more compact design. Latency is the amount of time it takes for a design to carry out its intended function; it is used to gauge the highest possible running speed of a circuit and to broach topics like power consumption. For a wide variety of equivalent accuracy, the parameters of the design, such as the number of transistors, latency, and power consumption, should be optimized. In the architecture of compressor designs, a design with less error has been considered. Compressors are typically designed with the assumption that all input states have an equal chance of occurring. The total number of errors, the total number of transistors, power consumption, delay and the Power-Delay Product (PDP) delay of the proposed approximate current mode compressors are reported. In comparison to previous approximate compressors in current mode articles, the suggested approximate compressor performs better, as evidenced by the table, in terms of power and delay, transistor count, and error count. We have used the ADS2009 simulator to evaluate the suggested approximation multiplier circuits.

4- Conclusion

This study proposes a novel, remarkably simple 4:2 approximation compressor architecture. In accordance with different applications, it uses a revolutionary MTJ/CMOS adiabatic structure-based design to minimize power consumption problems. With a specified error rate, the suggested system exhibits an acceptable accuracy. Thus, the suggested technique has a favorable error rate and greatly improves both MED and MRED. This compressor, which has minimized hardware complexity, latency, and power consumption with flexibility in accuracy criteria, was also suggested in the paper for a multiplication operation. Utilizing ADS simulator, this adiabatic architecture was planned and built at the transistor level utilizing MTJ/CMOS technology at 180 nm. Using MATLAB, the suggested structures' potential for usage in error-tolerant applications like image processing was examined. Findings from the study indicate that, when compared to previous efforts, the suggested multiplier performs satisfactorily for picture multiplication in terms of accuracy, speed, and power consumption. Our goal is to supply multipliers in the future using differential current mode architecture and 5:2 compressors with MTJ technology. We will also assess the multiplier's performance and ensure that applications continue to process data accurately.





معرفی یک معماری جدید CMOS-MTJ برای کمپرسورهای تقریبی ۴:۲ سریع و کم توان: بررسی کاربردهای آنها در پردازش تصویر

فرحناز ذاکریان*

۱- گروه مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران (farahnaz.zakerian@iau.ac.ir)

چکیده: عملکرد پردازنده های سیگنال دیجیتال را می توان با اعمال برخی خطاهای قابل قبول، مانند عدم دقت بلوک های محاسباتی سخت افزاری، بهبود بخشید. در پردازش سیگنال و تصویر مقاوم به خطا، از ضریب های تقریبی استفاده می شود. این برنامه ها در سرعت و بهره وری انرژی برتر هستند اما دقت را قربانی می کنند. در این مقاله، ما بر روی طراحی یک کمپرسور تقریبی ۴:۲ تمرکز می کنیم که در قلب ضرب های غیردقیق قرار دارد. این مطالعه مفهومی را برای یک ضریب تقریبی پیشنهاد می کند که از یک کمپرسور تقریبی ۴:۲ بر اساس MTJ به منظور کاهش سخت افزار و مصرف برق استفاده می کند. با استفاده از فناوری CMOS ۱۸۰ نانومتری و ساختار هیبریدی MTJ/CMOS آدیباتیک جدید، روشی برای ایجاد مدارهای کمپرسور با کمپرسور تقریبی ۴:۲ پیشنهاد شده است. یافته های ارزیابی در فناوری ذکر شده در بالا، بهبود قابل توجهی را در سیستم پیشنهادی نشان می دهد. عملکرد کمپرسور در ADS شبیه سازی شد و از نظر تاخیر، توان و محصول تاخیر توان با مقادیر $53/969 \mu J$ و $41/067 ps$ و $2/216 fsJ$ به ترتیب محاسبه شد. هنگام ضرب تصاویر در متلب، از کمپرسور پیشنهادی برای شبیه سازی یک ضرب کننده 8×8 استفاده می شود. شاخص های MSSIM و PSNR با مقادیر $79/26$ و $52/15$ این ضریب با ضریب های تقریبی پیچیده تر قابل رقابت هستند.

واژه های کلیدی: ضرب کننده تقریبی، متلب، کمپرسور ۴:۲، ساختار هیبریدی آدیباتیک MTJ/CMOS، ADS

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۲

۱- مقدمه

طراحی الکترونیک کم مصرف شدند [۳]. روشی برای طراحی الکترونیک کم مصرف که مصرف برق نشستی را کاهش می دهد، استفاده از دستگاه های CMOS^۲ غیر متعارف و استفاده از فناوری های نوظهور نانو است. برخی از فناوری های نوظهور جدید برای استفاده در کاربردهای کم توان بسیار مناسب هستند [۴]. روش دیگر برای کاهش مصرف برق دینامیکی، بازیابی انرژی ذخیره شده در خازن بار به جای اتلاف آن به صورت گرما است. این رویکرد که بر اساس بازیافت انرژی عمل می کند، به عنوان طراحی مدار آدیباتیک (برگشت پذیر) شناخته می شود [۵]. علاوه بر این، معماری های بسیار کم توان را می توان با پارادایم منطق در حافظه (LiM)^۳ تحقق بخشید، جایی که عناصر حافظه بر روی مدارهای منطقی توزیع می شوند [۶]. اتصال تونل مغناطیسی (MTJ)^۴ یک حافظه غیر فرار است که زمان دسترسی کوتاه، ابعاد کوچک و سازگار با فناوری CMOS دارد [۷]. بنابراین، برای استفاده در معماری های منطق در حافظه بسیار مناسب است.

دقت و قابلیت اطمینان بالا از ویژگی های مهم در صنعت نیمه هادی است که علاوه بر کارایی در عملکرد و توان مصرفی، در طراحی سازه های محاسباتی نقش دارد [۱]. بلوک های حسابی دیجیتال تعیبه شده در این دستگاه ها نیز از حقایق ذکر شده در بالا مستثنی نیستند. با این حال، بسیاری از برنامه ها همچنان اشتباه یا عدم دقت را در محاسبات خود حفظ می کنند؛ حتی اگر نتایج قابل استفاده باشند. کاربردهای چند رسانه ای مانند پردازش تصویر، نمونه هایی از یک مورد مناسب برای استفاده از الگوریتم ها و ساختارهای غیردقیق هستند [۲]. در دهه گذشته، دستگاه های اینترنت اشیا، وسایل الکترونیکی قابل حمل مانند گوشی های هوشمند، تبلت ها و حسگرها به طور چشمگیری افزایش یافته است. اکثر این دستگاه ها با باتری کار می کنند و بنابراین مصرف انرژی (عمر باتری) به یک محدودیت طراحی حیاتی تبدیل شده است. بنابراین، محققان به دنبال کشف روش های جدیدی برای

* فرحناز ذاکریان

^۲ complementary metal-oxide semiconductor (CMOS)

^۳ Logic-in-Memory

^۴ magnetic tunnel junction



سازه‌های LiM با استفاده از MTJ برای طراحی‌های کم‌توان بسیار مناسب هستند، زیرا اتلاف توان ساکن در این مدارها تقریباً صفر است. پردازش چندرسانه‌ای سهم عمده‌ای از فرآیندهای کلی در دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل را به خود اختصاص می‌دهد. استفاده از روش‌های محاسباتی نادقیق در چنین برنامه‌هایی مزایایی را به همراه دارد، از جمله کاهش پیچیدگی سخت‌افزار، کاهش اتلاف توان و همچنین افزایش عملکرد [۸]. پردازنده‌های سیگنال دیجیتال (DSP) به دلیل عملکرد برتر، پلتفرم‌های محاسباتی درخشان را برای پردازش چند رسانه‌ای ارائه می‌کنند. یک مدار پرکاربرد در بخش پردازش تصویر استفاده از مدارات ضرب‌کننده می‌باشد. برای یک ضرب‌کننده $n \times n$ ، در بخش کاهش رقم نقلی، رقم‌های نقلی تولید شده در بخش تولید رقم نقلی را به دو رقم کاهش می‌دهد. این امر عمدتاً با پیاده‌سازی چند مرحله‌ای بخش کاهش رقم نقلی که در آن از جمع‌کننده با ذخیره رقم نقلی^۲ به صورت آرایه‌ای از جمع‌کننده‌ها و یا از کمپرسورها استفاده شده، صورت می‌پذیرد [۹]. کمپرسورها برای انجام عمل جمع مورد استفاده قرار می‌گیرند که باعث می‌شود تاخیر مسیر بحرانی را نیز کاهش داده و کارایی کلی مدار را نیز افزایش دهند [۱۰]. در نتیجه افزایش سرعت کمپرسورها و کاهش توان مصرفی آنها برای دستیابی به ضرب‌کننده‌ها با کارایی بالاتر ضروری است. امروزه برای طراحی ضرب‌کننده‌ها با سرعت بالا، کمپرسورهای ۴:۲ و ۵:۲ به طور گسترده برای افزایش سرعت و کاهش توان به کار می‌روند [۱۱].

در این مقاله، ما همچنین یک مدار جدید برای طراحی کمپرسور ۴:۲ غیردقیق معرفی می‌کنیم. ایده اساسی در پشت این تحقیق، اتخاذ بیان منطقی ساده‌تر با توجه به ویژگی‌های VLSI تحت فناوری CMOS-MTJ است. طراحی پیشنهادی باعث صرفه‌جویی قابل توجهی از نظر اشغال منطقه، اتلاف توان و همچنین تاخیر انتشار در فناوری هدف می‌شود. در این مقاله یک ضرب‌کننده تقریبی بر اساس طراحی منطقی جدید کمپرسور ۴:۲ تقریبی پیشنهادی ارائه شده است. در این روش برای افزایش سرعت مدار ضرب‌کننده از کمپرسورهای ساختار هیبریدی آدیباتیک جدید استفاده شده است. طراحی مدارات منطقی در مد جریان به کاهش بسیار خوب تاخیر در خروجی می‌انجامد. بنابراین طراحی بخش اصلی مدار ضرب‌کننده که از کمپرسورها تشکیل شده است در فناوری MTJ/CMOS کمک قابل توجهی به بهبود عملکرد مدار ضرب‌کننده خواهد کرد. در این کار، برای طراحی منطق کمپرسور پیشنهادی از خانواده مدارهای آدیباتیک غیرفرار مبتنی بر Spin-MTJ را بر اساس [۱۲] استفاده می‌کنیم. همچنین در این کار با ارائه یک معماری جدید برای ایجاد ضرب تقریبی 8×8 داد با کمپرسورهای ۴:۲ یک راهکار کاهش‌دهنده برای سخت‌افزار مداری ایجاد کرده‌ایم. سهم اصلی این مقاله در طراحی ضرب‌کننده پیشنهادی به شرح ذیل است:

- بهره‌مندی از ویژگی تغییر ولتاژ آستانه در فناوری نانو لوله کربنی، برای طراحی ماژول‌های کمپرسور تقریبی ۴:۲ و بازیابی جریان‌های تضعیف شده در مد جریان.
- با توجه به اهمیت حاشیه نویز در کاربردهای مقاوم در برابر خطا و بهره‌گیری از ویژگی بالا بودن حاشیه نویز، از کمپرسور ۴:۲ در طراحی ضرب‌کننده تقریبی با دقت بالاتر استفاده می‌شود.
- طرحی کمپرسورهای تقریبی با کمترین خطا در مد جریان برای افزایش دقت ضرب‌کننده تقریبی پیشنهادی.
- ایجاد یک استراتژی ضرب جدید و مقایسه طرح برای یک کاربرد تصویرسازی از لحاظ کیفیت در نرم‌افزار متلب با سایر کارها.
- بررسی طراحی کمپرسور پیشنهادی از لحاظ توان مصرفی و سرعت و تعداد ترانزیستورهای حاصل از آنها.
- بقیه این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. در بخش ۲، بررسی آثار مرتبط انجام شده است و برخی مفاهیم اولیه معرفی شده است. در بخش ۳، یک توصیف منطقی از کمپرسور غیردقیق ۴:۲ بر اساس مدل پیشنهادی با ساختار هیبریدی آدیباتیک ارائه شده است. اجرای VLSI کمپرسور پیشنهادی ۴:۲ نیز برای فن‌آوری MTJ/CMOS به تفصیل آمده است. در بخش ۴، عملکرد کمپرسور پیشنهادی ۴:۲ در مقایسه با آخرین وضعیت موجود ارزیابی شده است. برای این منظور، برای فناوری، معیارهای عملکرد خاص آن در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، مانند طراحی سازه‌های غیر دقیق، مصالحه بین خطای خروجی و سایر معیارهای عملکرد در نظر گرفته می‌شود. به عنوان یک مطالعه موردی، استفاده از پردازش تصویر بر اساس ضرب‌کننده با کمپرسورهای غیردقیق در نظر گرفته شده است. در نهایت، بخش ۵ مقاله را به پایان می‌رساند.

۲- پیشینه تحقیق

۲-۱- کارهای مرتبط

در سال‌های اخیر، تکنیک‌های اتوماسیون و الگوریتم‌های یادگیری ماشین تقریباً در تمام زمینه‌ها، نقش مهمی را ایفا نموده‌اند. محاسبات تقریبی، که برای دستیابی به عملکرد بالاتر یا تاخیر کمتر و یا مصرف انرژی کمتر، دقت کامل را کاهش می‌دهد، به طور گسترده در برنامه‌های کاربردی مقاوم در برابر خطا مانند چند رسانه‌ای و یادگیری ماشین استفاده می‌شود. در این بخش به مرور کارهای انجام شده برای طراحی کمپرسور و ضرب‌کننده‌های تقریبی پرداخته شد. برای کمپرسورهای دقیق و تقریبی ۵:۲، مرجع [۱۳] کار بر روی طرح‌های ترکیبی کارآمد اتصال تونل مغناطیسی MTJ/FinFET را پیشنهاد می‌کند. طرح‌های پیشنهادی از روش نوشتن اثر اسپین هال (SHE)^۳ برای ذخیره اطلاعات در MTJ استفاده می‌کنند، که تا حد زیادی بازده

³ Spin Hall effect

¹ digital signal processor

² Carry save adder



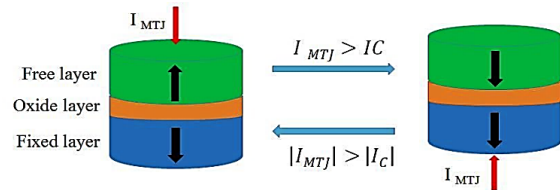
کامل کردن ضرب‌های 8×8 از این کمپرسور استفاده می‌شود. سپس ضرب‌های موجود با ضریب 8×8 پیشنهادی مقایسه می‌شوند. کمپرسور پیشنهادی $5:3$ در مقایسه با سیستم‌های فعلی 18 درصد تاخیر کمتری ارائه می‌دهد. در [۱۸]، یک کمپرسور تقریبی ارائه شده است که در عین استفاده از فضا، زمان و انرژی کمتر، دقتی معادل معماری‌های معمولی دارد. در مجموع، یک کمپرسور $5:2$ علاوه بر آنالیز دو کمپرسور $4:2$ پیشنهاد شده است. هر دو ضرایب 8×8 و 16×16 با کمک کمپرسورهای پیشنهادی قابل پیاده‌سازی هستند. برنامه‌های کاربردی مقاوم در برابر خطا مانند صاف کردن تصویر و ضرب تصویر با عمق بیشتری تجزیه و تحلیل می‌شوند، همانطور که طرح برنامه و اجرای طرح نیز تحلیل می‌شوند. دو کمپرسور که هر کدام مزایای منحصر به فرد خود را دارند در مقاله [۱۹] پیشنهاد و تحلیل شده‌اند. طرح‌های پیشنهادی در فناوری CMOS 45 نانومتری پیاده‌سازی شده‌اند و عملکرد آن‌ها از نظر مساحت، تاخیر، توان، محصول تاخیر توان، نرخ خطا^۵، فاصله خطا^۶ و تعداد دقیق خروجی (AOC) آزمایش می‌شود. در مقایسه با یک کمپرسور کامل $4:2$ ، تقریب $4:2$ پیشنهادی کاهش $56/80\%$ در مساحت، $57/20\%$ در مصرف برق و $73/30\%$ در تاخیر را نشان می‌دهد. ضریب‌های 8 بیتی و 16 بیتی را می‌توان با کمک کمپرسورهای پیشنهادی پیاده‌سازی کرد. هنگامی که با ضرب‌های تقریبی پیچیده مقایسه می‌شود، دقت این روش‌ها برابر است. طبق [۲۰]، یک معماری کمپرسور $5:2$ را می‌توان با تنظیم چند محاسبات داخلی ایجاد کرد. برای داشتن یک کمپرسور پرسرعت، از بلوک جمع‌کننده کامل^۷ کارآمد نیز استفاده می‌شود. در [۲۱]، نویسندگان پیشنهاد می‌کنند که یک کمپرسور جدید با نسبت $4-2$ توسعه داده‌اند. برای استفاده حداکثری از کمپرسور پیشنهادی و کاهش خطای خروجی، یک نسخه اصلاح شده از طرح ضرب‌کننده دادا ارائه شده است. با استفاده از فناوری متداول 45 نانومتری CMOS، راندمان کمپرسور و ضریب پیشنهادی به صورت تجربی آزمایش می‌شود و پارامترهای آن‌ها با ضریب‌های تقریبی پیچیده مقایسه می‌شوند. در مقایسه با ضریب دقیق، ضریب پیشنهادی مصرف برق را تا 35% ، تاخیر را تا 36% و مساحت را 17% کاهش می‌دهد. ضریب پیشنهادی نتایجی با 85% شباهت ساختاری بین تصاویر ورودی و خروجی ایجاد می‌کند. حال با توجه به مطالعات انجام شده مشاهده شد که تمام تلاش مقالات به ارائه یک تعامل بین مصرف توان و تاخیر و دقت طراحی ضرب برای کاربردهای مختلف است. بنابراین بر خلاف سایر کارهای انجام شده، در این مقاله از تکنیک ساختار هیبریدی آدیلباتیک با فناوری CMOS-MTJ برای طراحی کمپرسور بهره‌برده‌ایم، تا با کمک تکنیک پیشنهادی ضرب 8 در 8 بر اساس کمپرسور $4:2$ تقریبی پیشنهادی تا حد قابل قبول و کمترین خطا، استفاده شود.

انرژی سوئیچینگ MTJ را در مقایسه با روش استاندارد گشتاور انتقال اسپین^۱ افزایش می‌دهد. با استفاده از مدل‌های 7 FinFET نانومتری و عمود بر SHE MTJ، مدارها در HSPICE شبیه‌سازی شده‌اند. هنگامی که با همتایان دقیق خود مقایسه می‌شود، نتایج نشان می‌دهد که سیستم‌های تقریبی پیشنهادی به طور قابل توجهی مصرف انرژی و تعداد دستگاه را بهبود می‌بخشند. طراحی دقیق 51 درصد بهبود در مصرف برق، 16 درصد بهبود در تاخیر خواندن و 70 درصد کاهش در تعداد ترانزیستورها در هنگام استفاده از طرح‌های تقریبی اول و دوم ارائه شده دارد. میزان خطا در کمپرسور طراحی تقریبی دوم بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر است (27 در مقابل 48) و پارامترهای عملکرد نیز بهبود یافته‌اند. برنامه‌های پردازش تصویر اغلب از کمپرسورهای نادقیق $5:2$ به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری دقت استفاده می‌کنند. شبیه‌سازی‌های گسترده در متلب تأیید می‌کند که روش پیشنهادی، که تعدادی از معیارهای دقت و کیفیت را در نظر می‌گیرد، طیف گسترده‌ای از قابلیت‌ها را برای کاربردهای پردازش تصویر ارائه می‌دهد. همانطور که در [۱۴] نشان داده شده است، یک سلول کمپرسور هیبریدی $4:2$ می‌تواند تنها با استفاده از گیت‌های اکثریت دو طرفه و مالتی‌پلکسرها ساخته شود. ترانزیستورهای اثر میدان نانولوله کربنی (CNFET) برای زنده کردن این مدار استفاده می‌شوند. با توجه به اعداد و ارقام، طرح پیشنهادی با اختلاف 53 درصد از نظر تاخیر و 38 درصد از نظر مصرف انرژی، از بهترین طراحی مرجع بهتر عمل می‌کند. در [۱۵]، یک تکنیک هرس تخمینی برای به تصویر کشیدن مدار کمپرسور $4:2$ استفاده شده است. کمپرسور پیشنهادی $4:2$ با کمک یک شبکه عصبی مصنوعی آموزش و آزمایش می‌شود. به طور کلی توافق شده است که بهترین مدار تقریبی یک شبکه عصبی است که به همان سطح از دقت در آموزش و داده‌های آزمایشی دست می‌یابد. جدول صحت کمپرسور تقریب پیشنهادی $4:2$ برای آموزش یک شبکه عصبی با تکنیک یادگیری ماشین نظارت شده استفاده شده است. با تنها 19 ترانزیستور، کمپرسور پیشنهادی از انرژی کمتری ($0/2015$ nJ) و مساحت سیلیکونی ($14/36$ میکرومتر مربع) نسبت به طرح‌های موجود استفاده می‌کند. در [۱۶]، نویسندگان یک کمپرسور تقریبی $2-4$ را ارائه می‌دهند که چه خطا مثبت یا منفی باشد، همان نتایج اشتباه را به همراه دارد. هنگام توسعه دو ضریب تقریبی 8×8 (UBAM) هم دقت و هم نیاز به توان کمپرسور $2-4$ برنامه‌ریزی شده در نظر گرفته می‌شود. نتایج تجربی نشان می‌دهد که یکی از تکنیک‌های پیشنهادی محصول تاخیر توان^۲ را 39% و EDP^۳ را 46% در مقایسه با ضرب‌کننده‌های تقریبی قبلی کاهش می‌دهد، در حالی که فاصله میانگین خطای نرمال شده^۴ کاهش می‌یابد. در [۱۷]، یک تکنیک جدید مقایسه منطقه، توان و تاخیر کارآمد برای تقریب با استفاده از کمپرسور $5:3$ پیاده‌سازی شده است. برای

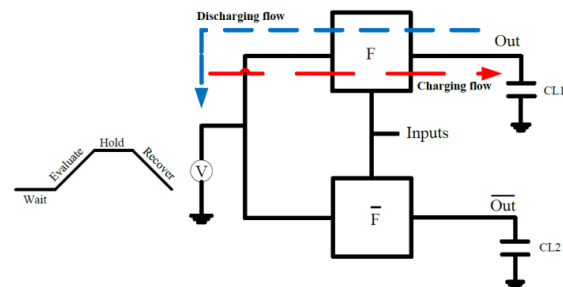
⁵ Error rate (ER)⁶ Error distance (ED)⁷ Full adder (FA)¹ Spin-transfer torque (STT)² power-delay product (PDP)³ energy-delay product (PDP)⁴ Normalized mean error distance (NMED)

۲-۲- بررسی مختصر اتصال تونل مغناطیسی MTJ

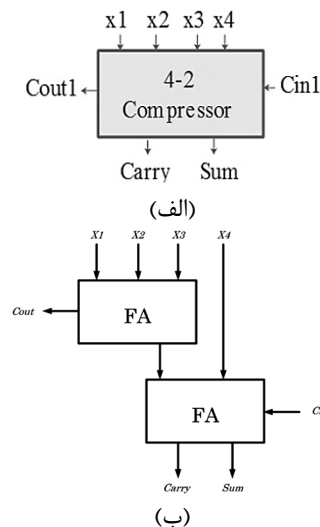
اتصال تونل مغناطیسی (MTJ) از دو لایه فرومغناطیسی^۱ (یکی از لایه‌ها ثابت و دیگری آزاد) و یک لایه مانع اکسیدی که بین این دو لایه قرار گرفته است، تشکیل شده است که در شکل (۱) نشان داده شده است. سد اکسیدی توانایی ذخیره داده‌های بیش از ده سال را دارد که با اندازه‌گیری‌های آزمایشی شکست دی‌الکتریک وابسته به زمان^۲ تأیید می‌شود [۲۳ و ۲۴]. دو پیکربندی ممکن (موازی و ضد موازی) را می‌توان با توجه به تراز لایه‌های فرومغناطیسی انجام داد. بر اساس این دو پیکربندی، یک MTJ ویژگی‌های مقاومت کم (RP) یا مقاومت بالا (RAP) را نشان می‌دهد [۲۴]. بنابراین، ما می‌توانیم از این ویژگی‌ها برای پیاده‌سازی طرح‌های پیشنهادی استفاده کنیم.



شکل (۱): ساختار نانو ستونی اتصال تونل مغناطیسی عمودی. حالت‌های از P به AP و بالعکس با اعمال جریان (IMTJ) بالاتر از جریان بحرانی (IC) تغییر می‌کند [۲۲].



شکل (۲): مداری که نشان‌دهنده شارژ/دشارژ آدیباتیک است [۲۶].



شکل (۳): الف - یک نمونه کمپرسور دقیق ۴:۲. ب - تجزیه منطقی یک نمونه کمپرسور دقیق ۴:۲ [۲۹].

سه روش اصلی برای تغییر پیکربندی MTJ پیشنهاد شده است: سوئیچینگ مغناطیسی القایی میدانی^۳، سوئیچینگ با کمک حرارتی^۴ و انتقال گشتاور چرخشی^۵. امیدوارکننده‌ترین روش، انتقال گشتاور چرخشی است که به عنوان جایگزینی برای دو روش دیگر پیشنهاد شده است. انتقال گشتاور چرخشی تنها به یک جریان سوئیچینگ کم دو جهت نیاز دارد. حالت‌های MTJ زمانی تغییر می‌کنند که جریان MTJ (IMTJ) از جریان بحرانی (IC) بیشتر شود (شکل ۱) [۲۵]. سوئیچینگ مغناطیسی القایی میدانی، رویکرد مرسوم برای تغییر حالت‌های MTJ بود. RAP و RP که مبتنی بر اعمال میدان مغناطیسی بودند. این روش به دلیل جریان سوئیچینگ بالا از مصرف برق بالا، گزینش‌پذیری ضعیف و مقیاس‌پذیری ضعیف رنج می‌برد.

۳-۲- منطق آدیباتیک

منطق آدیباتیک یکی از تکنیک‌های طراحی مدار کم مصرف به قیمت پایین‌تر بودن سرعت عمل است. شمای یک تکنیک آدیباتیک در شکل (۲) نشان داده شده است. در مدارهای آدیباتیک، خازن بار توسط یک منبع جریان ثابت شارژ می‌شود برخلاف CMOS معمولی که در آن، ظرفیت بار توسط یک منبع ولتاژ ثابت شارژ می‌شود. منطق آدیباتیک با استفاده از یک توان AC کلاک شده برای شارژ خازن بار، مصرف برق کلی مدار را کاهش می‌دهد و انرژی را از خازن شارژ شده به روشی آهسته بازیابی می‌کند تا اتلاف توان دینامیکی را حذف کند [۲۶]. انرژی تلف شده را می‌توان بر اساس رابطه زیر محاسبه کرد:

$$E_{diss} = \frac{RC}{T} CV_{DD}^2 \quad (۱)$$

که C خازن بار، T زمان شارژ خازن و V_{DD} ولتاژ نوسان کامل کلاک قدرت است. مدارهای آدیباتیک برای اینکه مصرف برق کمتری نسبت به CMOS معمولی داشته باشند، زمان شارژ (T) بیشتر از 2RC دارند.

۴-۲- کمپرسور ۴:۲

کمپرسور ۴:۲ به طور کلی برای عمل جمع مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک کمپرسور ۴:۲ دقیق مطابق شکل (۳-الف) دارای ۵ ورودی و سه خروجی است. چهار ورودی x_1, x_2, x_3, x_4 و c_{in} با خروجی Sum هم ارزش هستند [۲۷]. کمپرسور ۴:۲ دقیق یک ورودی از مرحله قبل گرفته معمولاً از مازول‌های مشابه در سطح قبل و یک خروجی با ارزش بالاتر به مرحله بعد می‌دهد. یک کمپرسور ۴ به ۲ را می‌توان با استفاده از اتصال دو جمع‌کننده به صورت سری مطابق شکل (۳-ب) ساخت. معادله (۳) تابع منطقی کمپرسور ۴ به ۲ را نمایش می‌دهد که در آن x_i نمایانگر ورودی‌های اصلی جمع‌کننده و c_i رقم نقلی است که از مرحله قبل با ارزش کمتر به کمپرسور وارد می‌شود [۲۸].

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + c_{in} = sum + 2 \cdot (carry + c_{out}) \quad (۲)$$

^۴ thermally assisted switching (TAS)

^۵ Spin-transfer torque (STT)

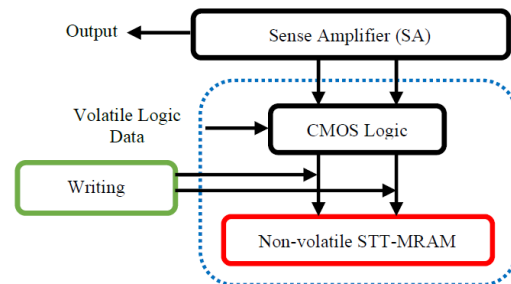
^۱ Ferromagnetic layer (FL)

^۲ time-dependent dielectric breakdown (TDDB)

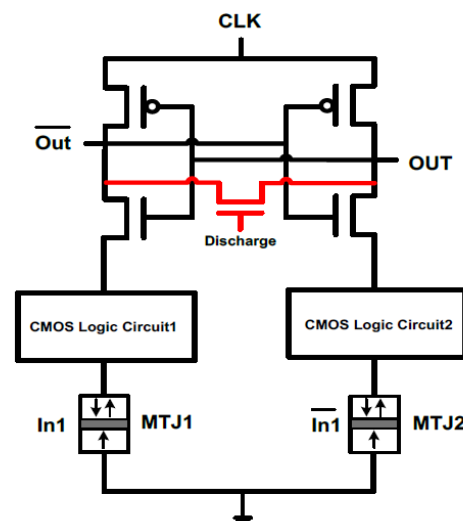
^۳ Field Induced Magnetic Switching (FIMS)

۳- طرح‌های پیشنهادی و ارزیابی

صرف نظر از اینکه طراحی‌ها برای کمپروسورهای دقیق یا غیر دقیق ۴:۲ خاص هستند، طیف وسیعی از کمپروسورهای مبتنی بر FET سیلیکونی (MOSFET یا FinFET) بر اساس دو بلوک منطقی مهم هستند. در این کار، با استفاده از طراحی منطق آدیباتیک پیشنهادی، کمپروسور ۴:۲ در فناوری CMOS-MTJ پیشنهاد شد. بنابراین برای معرفی معماری کمپروسور تقریبی ۴:۲ ابتدا جدول درستی حالت تقریبی و اندازه خطای تقریب بیان می‌شود. سپس تابع مداری کمپروسور تقریبی در سطح گیت معرفی و شکل مدار منطقی آن نمایش داده می‌شود. مدل‌های تقریبی تعریف شده در این مقاله با کمک منطق آدیباتیک در فناوری CMOS-MTJ در سطح ترانزیستور تعریف و طراحی می‌شود. اطمینان از صحت عملکرد گیت‌های پایه و کمپروسورهای غیر دقیق با شبیه‌سازی در ADS مورد بررسی قرار می‌گیرد. بعد از طراحی معماری کمپروسور در این بخش، معماری ضرب‌کننده تقریبی مورد استفاده برای آزمایش کمپروسور تقریبی پیشنهادی، تشریح می‌شود. در این مقاله تمام اجزای کمپروسورهای ۴:۲ استفاده شده در ضرب پیشنهادی از نوع تقریبی می‌باشد و مشاهده می‌شود نتایج این معماری ضرب‌کننده از دقت قابل قبولی در مقایسه با ضرب‌کننده دقیق برخوردار می‌باشد.



شکل (۴): ساختار مدار مبتنی بر MTJ



شکل (۵): شماتیک کلی طرح هیبرید آدیباتیک پیشنهادی MTJ/CMOS. حالت‌های اولیه MTJ و MTJ2 به ترتیب ضد موازی و موازی هستند.

۳-۱- معماری مدارهای آدیباتیک مبتنی بر MTJ

در این بخش، خانواده مدارهای آدیباتیک مبتنی بر MTJ را پیشنهاد می‌کنیم. مدارهای مبتنی بر MTJ معمولاً از سه قسمت تشکیل شده‌اند که در شکل (۴) نشان داده شده است. بخش اول یک مدار نوشتاری است که برای برنامه‌ریزی عناصر حافظه استفاده می‌شود. بخش دوم شامل سلول‌های STT-MRAM و درخت منطقی CMOS است که به عنوان یک بلوک کنترل منطقی است. در نهایت، قسمت آخر یک تقویت‌کننده حس است که نتایج منطق خروجی را ارزیابی می‌کند. یک نمای کلی از خانواده مدارهای مبتنی بر MTJ آدیباتیک پیشنهادی در شکل (۵) است. تفاوت بین مدارهای ارائه شده و مدارهای مبتنی بر MTJ در [۳۰] در ساختار SA است. برای شارژ و دشارژ خروجی‌ها از منبع تغذیه AC کلاک شده استفاده می‌شود که دارای چهار فاز (انتظار، ارزیابی، نگه داشتن و بازیابی) مانند شکل (۲) است. همچنین از ترانزیستور N-MOS برای داشتن شارژ برابر در انتظار فاز استفاده می‌کنیم. بنابراین، هنگامی که مدار در فاز انتظار است، سیگنال درین V_{DD} است. در این مقاله، گیت‌های منطقی مبتنی بر MTJ آدیباتیک و مدار حسابی یک کمپروسور ۴:۲ ارائه شده است.

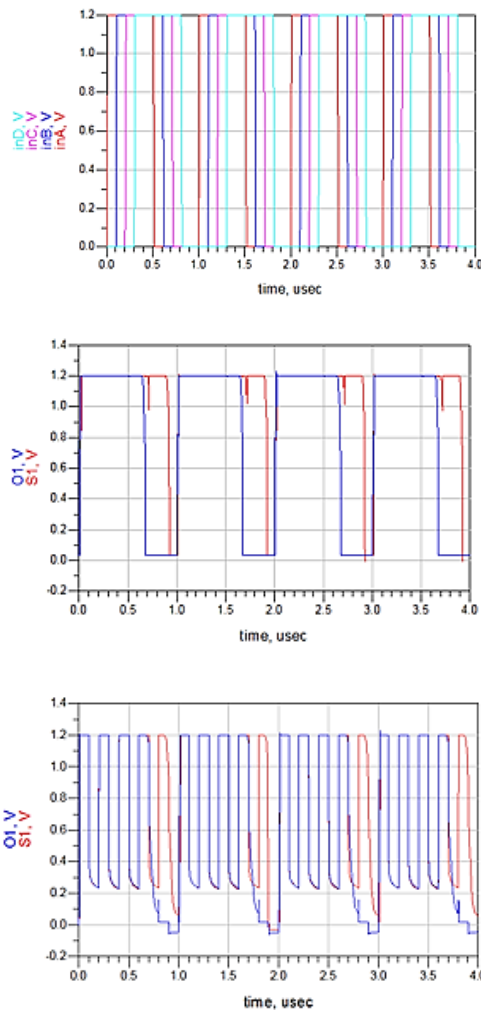
۳-۲- طراحی کمپروسور تقریبی ۴:۲

در این بخش طراحی کمپروسور تقریبی ۴:۲ با روش مبتنی بر آدیباتیک پیشنهادی MTJ/CMOS مطرح شده است. طرح‌ها با اعمال تغییراتی در نحوه اتصالات گیت‌ها با کمترین تعداد ترانزیستور و با استفاده از روابط محاسبات پیشنهادی ارائه می‌شود. جدول درستی مدل پیشنهادی کمپروسور تقریبی ۴:۲ در جدول (۱) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در این جدول تنها یک خطا برای مدل دقیق تعریف می‌شود. بر اساس ساده‌سازی جدول درستی با کمک مدل کارنو، دو خروجی کمپروسورهای تقریبی بر اساس (۳-۴) تعریف می‌شود:

$$Sum = (A \text{ or } B) + (C \text{ xor } D); \quad (3)$$

$$Carry = (A \text{ or } B) \quad (4)$$

جدول (۲) ساختار کارنو خروجی‌های منطق پیشنهادی را نمایش داده است. در این جدول برای ساده‌سازی مدل دقیق به مدل تقریبی ما بعضی از ارقام را حذف یا اضافه می‌کنیم. در این جدول بلوک‌های سبز رنگ معرف مقادیر حذف شده و بلوک‌های قرمز رنگ موارد اضافه شده به سیستم می‌باشد. اما بلوک زرد همان مقادیر دقیق می‌باشد. شکل (۶) طراحی کمپروسور تقریبی پیشنهادی را در سطح گیت نمایش می‌دهد. در شکل (۷) ساختار مدار نهایی نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی خروجی مدار را در شکل (۸) می‌توان مشاهده کرد. صحت نتایج شبیه‌سازی کمپروسور براساس جدول (۱) تایید می‌شود. مطابق نتایج شبیه‌سازی بر اساس ورودی‌های مختلف با پالس‌های ولتاژ اعمال شده است. مقدار ولتاژهای خروجی محاسبه شده از اعمال جریانهای sum و carry در شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل (۸): نتایج شبیه‌سازی کمپرسور تقریبی ۴:۲ مبتنی بر آدیباتیک پیشنهادی MTJ/CMOS

۳-۳- مطالعه موردی مربوط به ضرب‌کننده ۸×۸

در ادامه می‌خواهیم از نحوه تأثیرگذاری کمپرسورهای دقیق و تقریبی پیشنهادی در مد جریان با به‌کارگیری آن‌ها جهت طراحی یک مدار ضرب‌کننده تقریبی مد جریان ۸ بیتی دادا، مقایسه‌ای داشته باشیم. ضرب‌کننده تقریبی پیشنهادی، مبتنی بر ضرب‌کننده تقریبی معرفی شده در [۳۱] پیشنهاد شده‌است. در این ضرب‌کننده، به دلیل اهمیت کمتر بیت‌های کم‌ارزش در خروجی، چهار ستون کم‌ارزش برای ساده‌سازی کوتاه شده‌اند. در قسمت میانی، برای تقریبی‌سازی بیشتر، ۶ ستون میانی از کمپرسورهای تقریبی استفاده می‌کنند. در ستون‌های پرارزش، به دلیل تأثیرگذاری زیاد در دقت خروجی، از کمپرسورهای دقیق استفاده شده‌است. شکل (۹) ساختار ضرب‌کننده تقریبی مد جریان نوع دوم را نمایش می‌دهد که شامل سه مرحله می‌باشد. در مرحله اول ما ارائه‌های یک تا هشت بیتی را با کمک سه نیم جمع‌کننده و دو تمام جمع‌کننده و هفت کمپرسور ۴:۲ به ارایه‌های یک تا ۴ بیتی کاهش می‌دهیم. سپس در مرحله دو، ارائه‌های به‌دست آمده با کمک ۱۰ کمپرسور ۴:۲ به دو بیت تقلیل می‌یابد. در مرحله سوم با عملیات تمام جمع‌کننده ما به مقادیر ضرب نهایی ۸ در ۸ دست می‌یابیم.

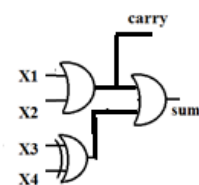
جدول (۱): جدول صحت کمپرسور تقریبی ۴:۲ پیشنهادی

Number	Input				exact		Error	approximate		Error	Real
	A	B	C	D	S	C0		S	C0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
2	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1
3	0	0	1	1	0	1	0	0	0	-2	2
4	0	1	0	0	1	0	0	1	1	2	1
5	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	2
6	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	2
7	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	3
8	1	0	0	0	1	0	0	1	1	2	1
9	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	2
A	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	2
B	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	3
C	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	2
D	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	3
E	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	3
F	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	4

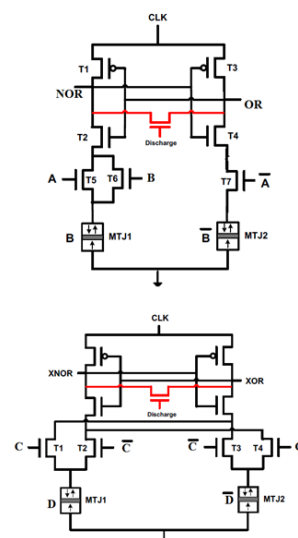
جدول (۲): نمای جدول کارنو برای خروجی‌های کمپرسور ۴:۲

S	C'D'	C'D	CD	CD'
A'B'	0	1	3	2
A'B	4	5	7	6
AB	C	D	F	E
AB'	8	9	B	A

C0	C'D'	C'D	CD	CD'
A'B'	0	1	3	2
A'B	4	5	7	6
AB	C	D	F	E
AB'	8	9	B	A



شکل (۶): کمپرسور تقریبی ۴:۲ پیشنهادی در سطح گیت



شکل (۷): پیاده‌سازی مدارهای گیت‌های کمپرسور تقریبی ۴:۲

$$NED = \frac{MED}{D} = \frac{MED}{(2^N - 1)^2} = \frac{1}{(2^N - 1)^2} \sum_{i=1}^{2^N} \frac{|ED_i|}{S_i} \quad (8)$$

• تعداد خروجی دقیق (AOC)

AOC تعداد خروجی‌های دقیق را برای کلیه ترکیبات ورودی ممکن اندازه‌گیری می‌کند.

۴-۱-۲- معیارهای کارآیی اجرایی

کمپرسورهای پیشنهادی با استفاده از فناوری CMOS-MTJ ۱۸۰ نانومتری، در فرکانس عملیاتی ۱ گیگاهرتز و ولتاژ بایاس ۰/۹ اجرا می‌شوند. معیارهای کارآیی اجرایی به خوبی طراحی پیشنهادی سخت‌افزار را بررسی می‌کند و شامل معیار تعداد ترانزیستور و تأخیر و توان و PDP می‌باشد. تعداد ترانزیستور کمتر باعث می‌شود طراحی جمع و جور شود. تأخیر به زمان انجام شده توسط یک طرح برای انجام عملکرد مورد نظر خود اشاره دارد و حداکثر سرعت کار مدار را تعیین می‌کند و توان میزان مصرف انرژی را بحث می‌کند. یک طراحی ایده‌آل باید پارامترهای بهینه‌ای مانند تعداد ترانزیستور، تأخیر و توان را برای طیف وسیعی از دقت قابل مقایسه داشته باشد.

۴-۱-۳- معیارهای عملیاتی کاربردی

ترکیب تصویر، تشخیص لبه و تیز کردن تصویر به عنوان برنامه‌هایی برای ارزیابی عملکرد ضرب‌های تقریبی و دقیق انتخاب شد. در ترکیب تصویر، دو تصویر ورودی ۸ بیتی توسط پیکسل‌ها در همان مکان ضرب شدند و نتایج به خروجی‌های ۸ بیتی بازگردانده خواهد شد. تصویر خروجی توسط دو تصویر ورودی ترکیب و ادغام شده است. نسبت سیگنال اوج به نویز^۱ و میانگین شاخص شباهت ساختاری^۲ برای ارزیابی کیفیت تصاویر خروجی استفاده شد [۳۳].

نسبت سیگنال اوج به نویز به شرح زیر محاسبه می‌شود:

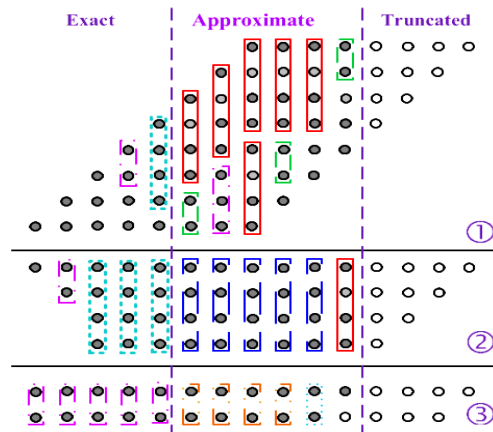
$$PSNR = 10 \log \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right) \quad (9)$$

MAX I، حداکثر مقدار در تصویر دقیق، در مقیاس خاکستری ۸ بیتی ۲۵۵ است و اصطلاحات I و K به ترتیب پیکسل‌های تصویر دقیق و تصویر خروجی را نشان می‌دهند. خطای مربع میانگین^۳ به شرح زیر تعریف شده است:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2 \quad (10)$$

خطای مربع میانگین به این بستگی دارد که پیکسل‌های تصویر دقیق و تصویر خروجی چقدر متفاوت است. اگر تصویر دقیق و تصویر خروجی یکسان باشد، خطای مربع میانگین برابر صفر می‌شود.

معیار دیگر در ارزیابی کیفیت یک تصویر، متریک میانگین شاخص شباهت ساختاری است که شباهت بین تصاویر تقریبی و دقیق را پیدا می‌کند و طبق (۱۱) محاسبه می‌شود.



شکل (۹): ساختار ضرب‌کننده تقریبی ۸ بیتی دادا نوع دوم [۳۱]

۴- نتایج شبیه‌سازی

۴-۱- معیارهای عملکردی

در این بخش معیارهای مختلف عملکردی که برای اندازه‌گیری میزان کارآیی ضرب‌کننده و کمپرسورهای تقریبی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند، معرفی شده است. معیارهای عملکردی می‌توانند به طور گسترده‌ای به معیارهای دقت و معیارهای کارآیی اجرای آن طبقه‌بندی شوند.

۴-۱-۱- معیارهای دقت

معیارهای دقت برای اندازه‌گیری میزان دقت حاصل از ضرب‌های طراحی شده با کمپرسورهای پیشنهادی و کمپرسورهای تقریبی موجود استفاده می‌شود [۳۲].

• فاصله خطا (ED)

ED به تفاوت بین خروجی کمپرسور دقیق ۴:۲ و خروجی کمپرسور تقریبی ۴:۲ اشاره دارد.

$$ED = Exactout - Approxout \quad (5)$$

• میانگین فاصله خطا (MED)

MED به میانگین ED برای همه ترکیبات ورودی ممکن اشاره دارد.

$$MED = \frac{1}{2^{2N}} \sum_{i=1}^{2^{2N}} |ED_i| \quad (6)$$

• میانگین فاصله خطای نسبی (MRED)

MRED به میانگین ED برای همه ترکیبات ورودی ممکن اشاره دارد که S مقدار حاصلضرب با کمپرسورهای دقیق است.

$$MRED = \frac{1}{2^{2N}} \sum_{i=1}^{2^{2N}} \frac{|ED_i|}{S_i} \quad (7)$$

• فاصله خطای عادی (NED)

NED میانگین ED را با حداکثر خطای ممکن در طرح پیشنهادی برای کلیه ترکیبات ورودی ممکن اندازه‌گیری می‌کند.

³ mean squared error (MSE)

¹ Peak signal-to-noise ratio (PSNR)

² Mean structural similarity index measure (MSSIM)



۳-۴- کاربرد پردازش تصویر

در این بخش، دو تصویر در متلب با استفاده از نتایج شبیه‌سازی ADS برای طراحی ضرب ۸*۸ استفاده می‌شوند. با ضرب دو عکس پیکسل به پیکسل، ضرب پیشنهادی برای ایجاد یک تصویر جدید استفاده می‌شود. بر اساس ارزیابی کیفیت تصویر، تصویر به دست آمده ارزیابی می‌شود. هنگام ارزیابی کیفیت تصویر باید چند فاکتور را در نظر گرفت که شامل: PSNR و MSSIM می‌باشد. PSNR برای ضرب تقریبی پیشنهادی شامل کمپرسور تقریبی ۴:۲ است که در جدول ۵ نشان داده شده و با تحقیقات گذشته مقایسه شده است. جدول ۵ نتایج حاصل از ضرب دو تصویر [۳۵] را از نظر شاخص‌های خطا گزارش می‌کند. PSNR بالاتر نزدیک به ۵۰ دسی‌بل عملکرد بهتر یک ضرب را نشان می‌دهد. شکل ۱۰ یک تصویر معیار ایجاد شده توسط انواع مختلف ضرب دقیق و تقریبی دو تصویر ماه و فیلمبردار را نشان می‌دهد [۳۵].

جدول (۳): مقایسه عملکرد کمپرسورهای تقریبی ۴:۲ شبیه‌سازی

شده از نظر توان، تاخیر، تعداد خطا، تعداد ترانزیستور و PDP

کمپرسورهای پیشنهادی	توان (μW)	حداکثر تاخیر (ps)	تعداد کل ترانزیستور	تعداد خطا	PDP (ns× μW)
کمپرسور ۴:۲	۰/۱۷۴	۲۷۵	24 T + 6 MTJ	۹/۱۶	۱۰۴۷۸۵
[۱۴]	۱۳/۷۷	۳۱/۰۳	۵۰	--	۴۴۳۹۷
[۳۸]	۵۳/۹۶۹	۴۱/۰۶۷	۳۹	۳/۱۶	۱/۳۱۴۲

جدول (۴): مقایسه ضرب‌کننده‌های تقریبی پیشنهادی مد جریان ۸

بیتی دادا با معماری پیش رو

توان (μW)	حداکثر تاخیر (ns)	PDP (ns× μW)	ضرب‌کننده پیشنهادی
۲/۳۴۲	۰/۲۱۴	۰/۵۰۱۲	ضرب‌کننده پیشنهادی
۸/۱	۰/۵۶۵	۴/۵	[۳۶]
۱۰/۰۹	۰/۶۲۵	۶/۳	[۳۷]
۵۱/۱	۰/۳۳	۱۶/۸۳	[۱۹]

جدول (۵): مقایسه PSNR و MSSIM برای ضرب‌های مختلف

Ref	MSSIM (%)	PSNR	MED	MRED	NED	AOC
[۳۶]	۶۳	--	۲۸۸۸	۰/۳۰۰۲	۰/۳۰۰۲	۲۳۱۳
[۳۷]	۸۴	۳۶/۱۹	۱۲۴۵	۰/۸۱۰۷	۰/۰۳۸۶	۳۱۳۰
[۱۹]	۸۸	--	۵۷۳/۴	۰/۰۴۸۷	۰/۰۰۲۷	۷۷۸۲
تحقیق موجود	۷۹/۲۶	۵۲۸/۸۱۵	۱۶۱۹۴	۰/۹۸۷۵	۰/۲۴۹	۲۱۹۳

$$MSE = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M SSIM(I_j, K_j) \quad (11)$$

که در آن محتویات تصویر در پنجره محلی I_j و K_j نشان داده می‌شود. I و K به ترتیب تصاویر ضرب دقیق و تقریبی را نشان می‌دهند. و تعداد کل پنجره‌های محلی برابر با M است.

۲-۴- مقایسه نتایج طراحی ضرب‌کننده و

کمپرسورهای تقریبی مد جریان ۵:۲ و ۴:۲

جدول درستی بیت‌های ورودی و خروجی و فاصله خطای کمپرسورهای تقریبی پیشنهادی در جدول (۱) نشان داده شده‌است. در معماری طرح‌های کمپرسور، طرحی مد نظر بوده است که خطای کمتری داشته باشد. معمولاً برای طراحی کمپرسورها، احتمال رخداد همه حالت‌های ورودی را باهم برابر در نظر می‌گیرند. تعداد کلی خطا، تعداد کل ترانزیستورها، توان مصرفی، تاخیر و حاصل‌ضرب توان در تأخیر کمپرسورهای تقریبی مد جریان پیشنهادی در جدول (۳) گزارش شده‌است. در این جدول می‌توان مشاهده کرد که کمپرسور تقریبی پیشنهادی از نظر توان و تاخیر و تعداد ترانزیستور و تعداد خطا نسبت به سایر کمپرسورهای تقریبی مقالات مد جریان برتری دارند. ارزیابی مدارهای ضرب‌کننده تقریبی مطرح شده با استفاده از شبیه‌ساز ADS2009 صورت گرفته است.

مقایسه ضرب‌کننده پیشنهادی در جدول (۴) ارائه شده‌است. در این جدول توان مصرفی، تاخیر و PDP ضرب‌کننده پیشنهادی، با سایر مقالات، مقایسه شده‌اند. کاهش تعداد کمپرسورها و معماری پیشنهاد شده در این مقاله باعث شد که این استراتژی از لحاظ توان، تاخیر و PDP بهترین گزینه برای انتخاب کمپرسور در طراحی ضرب‌کننده تلقی شود. با توجه به این جدول می‌توان مشاهده کرد که به ترتیب استفاده از کمپرسورهای تقریبی و کوتاه‌سازی، دو عامل موثر در کاهش توان مصرفی ضرب‌کننده به شمار می‌روند. کوتاه‌سازی ستون‌های کم‌ارزش مهم‌ترین عامل در کاهش توان، تاخیر و انرژی است. از این رو کوتاه‌سازی یکی از اقدامات لازم در جهت بهینگی ضرب‌کننده از لحاظ انرژی و سرعت به‌شمار می‌رود.

از آنجایی که برای کمپرسور تقریبی از کمپرسور مبتنی بر CML استفاده شده است و معماری پیشنهادی از تعداد کمپرسور کمتری تشکیل شده است، ضریب کمترین تاخیر را به دلیل استفاده از مسیر مستقیم ایجاد خواهد کرد. ضریب پیشنهادی کمترین مقدار را در مقایسه PDP دارد، و آن را در هنگام بررسی مصرف انرژی (با در نظر گرفتن توان و تاخیر همزمان) جایگزین مناسبی برای سایر ضرایب می‌کند. با این حال، کاهش خطا و پیچیدگی سخت‌افزاری این ضریب وجود دارد. ضریب پیشنهادی در مثلث سازش توان-تاخیر-خطا عملکرد مؤثرتری نسبت به ضریب سایر وظایف نشان می‌دهد.



مشخص شده، سیستم پیشنهادی دقت قابل قبولی را نشان می‌دهد. بنابراین، تکنیک پیشنهادی دارای نرخ خطای مطلوبی است و MED را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد. این کمپرسور که پیچیدگی سخت‌افزار، تأخیر و توان مصرفی را با انعطاف‌پذیری در معیارهای دقت به حداقل رسانده است، در مقاله برای عملیات ضرب پیشنهاد شده است. با استفاده از شبیه‌ساز ADS، این معماری آدیاباتیک در سطح ترانزیستور با استفاده از فناوری MTJ/CMOS در ۱۸۰ نانومتر طراحی و ساخته شد. لازم به ذکر است که شاخص میانگین شاخص شباهت ساختاری و نسبت سیگنال اوج به نویز به ترتیب با مقادیر ۷۹/۲۶ و ۵۲/۱۵ این ضریب با ضریب‌های تقریبی پیچیده‌تر قابل رقابت هستند. با استفاده از متلب، پتانسیل ساختارهای پیشنهادی برای استفاده در برنامه‌های کاربردی مقاوم در برابر خطا مانند پردازش تصویر مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که در مقایسه با تلاش‌های قبلی، ضریب پیشنهادی برای ضرب تصویر از نظر دقت، سرعت و مصرف توان رضایت‌بخش عمل می‌کند. هدف ما این است که در آینده با استفاده از معماری حالت جریان دیفرانسیل و کمپرسورهای ۵:۲ با فناوری MTJ، ضریب‌های چند برابری عرضه کنیم. ما همچنین عملکرد ضریب را ارزیابی خواهیم کرد و اطمینان حاصل می‌کنیم که برنامه‌ها به پردازش دقیق داده‌ها ادامه می‌دهند.

مراجع

- [1] R. Reis, Y. Cao, and G. Wirth, *Circuit design for reliability*: Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4078-9>
- [2] S. Mittal, "A survey of techniques for approximate computing," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 48, pp. 1-33, 2016. <https://doi.org/10.1145/2893356>
- [3] M. Pedram and J. M. Rabaey, *Power aware design methodologies*: Springer Science & Business Media, 2002. <https://doi.org/10.1007/b101914>
- [4] Y. Zhang, W. Zhao, J.-O. Klein, W. Kang, D. Querlioz, Y. Zhang, et al., "Spintronics for low-power computing," in *2014 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 2014, pp. 1-6.
- [5] W. C. Athas, L. J. Svensson, J. G. Koller, N. Tzartzanis, and E. Y.-C. Chou, "Low-power digital systems based on adiabatic-switching principles," *IEEE Transactions on very large scale integration (VLSI) systems*, vol. 2, pp. 398-407, 1994. DOI: 10.1109/92.335009
- [6] S. Matsunaga, J. Hayakawa, S. Ikeda, K. Miura, H. Hasegawa, T. Endoh, et al., "Fabrication of a nonvolatile full adder based on logic-in-memory architecture using magnetic tunnel junctions," *Applied Physics Express*, vol. 1, p. 091301, 2008. DOI: [10.1143/APEX.1.091301](https://doi.org/10.1143/APEX.1.091301)
- [7] E. Deng, Y. Zhang, J.-O. Klein, D. Ravelsona, C. Chappert, and W. Zhao, "Low power magnetic full-adder based on spin transfer torque MRAM," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 49, pp. 4982-4987, 2013. DOI: [10.1109/TMAG.2013.2245911](https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2245911)
- [8] S. Venkataramani, S. T. Chakradhar, K. Roy, and A. Raghunathan, "Approximate computing and the quest for computing efficiency," in *Proceedings of the 52nd Annual Design Automation Conference*, 2015, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1145/2744769.275116>
- [9] B. K. Mohanty and A. Choubey, "Efficient design for radix-8 booth multiplier and its application in lifting 2-D



(الف) ضرب‌کننده تقریبی پیشنهادی

(ب) ضرب‌کننده‌های تقریبی مقالات

شکل (۱۰): مقایسه ضرب تصاویر فیلمبردار و ماه با استفاده از ضرب 8×8 پیشنهادی با ضرب دقیق و کارهای موجود.

شاخص میانگین شاخص شباهت ساختاری بر اساس این واقعیت است که سیستم بینایی انسان بیشترین تطابق را با اطلاعات ساختاری استخراج شده دارد [۳۴]. شاخص شباهت ساختاری بدون در نظر گرفتن روشنایی و کنتراست، الگوی هر پیکسل را در یک تصویر تشخیص می‌دهد. جدول (۵) همچنین مقادیر میانگین شاخص شباهت ساختاری تصاویر به دست آمده توسط ضرب‌کننده‌های مختلف را برای چندین طرح از مقالات و همچنین طرح‌های پیشنهادی ارائه می‌کند. این جدول نشان می‌دهد که طرح حاضر با میانگین شاخص شباهت ساختاری برابر ۸۶/۴٪ بالاترین مقدار را در میان سایر موارد دارد. از این رو، در کاربردهای کم‌مصرف و سرعت بالا، طرح پیشنهادی به طور کلی قابل قبول‌تر است. ضرب‌کننده [۳۶] دارای کوچکترین PDP و ضرب‌کننده [۱۹] دارای کوچکترین NED است. اما ضرب‌کننده پیشنهادی را می‌توان برای کاربردهایی که نیاز به دقت و سرعت بالا و توان مصرفی کمی دارند، استفاده کرد. برای صرفه‌جویی در مصرف برق با عملکرد بهتر، این ضرب‌کننده پیشنهاد می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک طراحی جدید کمپرسور نادقیق ۴:۲ با سادگی چشمگیر پیشنهاد شده است. این طرح طراحی مبتنی بر ساختار آدیاباتیک جدید MTJ/CMOS را برای کاهش مسائل مربوط به مصرف انرژی با توجه به کاربردهای مختلف اتخاذ می‌کند. با نرخ خطای

- area-matched MTJ design," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 63, pp. 678-682, 2016. DOI: [10.1109/TCSII.2016.2532099](https://doi.org/10.1109/TCSII.2016.2532099)
- [24] B. Behin-Aein, J.-P. Wang, and R. Wiesendanger, "Computing with spins and magnets," *MRS Bulletin*, vol. 39, pp. 696-702, 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1411.6960>
- [25] W. Zhao, E. Belhaire, C. Chappert, and P. Mazoyer, "Spin transfer torque (STT)-MRAM--based runtime reconfiguration FPGA circuit," *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, vol. 9, pp. 1-16, 2009. <https://doi.org/10.1145/1596543.1596548>
- [26] R. K. Yadav, A. K. Rana, S. Chauhan, D. Ranka, and K. Yadav, "Adiabatic technique for energy efficient logic circuits design," in *2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology*, 2011, pp. 776-780. DOI: [10.1109/ICETECT.2011.5760223](https://doi.org/10.1109/ICETECT.2011.5760223)
- [27] P. Hasini and T. K. Murthy, "A Novel high-speed transistorized 8x8 Multiplier using 4-2 Compressors," *International Journal of Engineering Research and General Science*, vol. 3, pp. 359-365, 2015.
- [28] [H. Qi, Y.-B. Kim, and M. Choi, "A high speed low power modulo $2^n + 1$ multiplier design using carbon-nanotube technology," in *2012 IEEE 55th international midwest symposium on circuits and systems (MWSCAS)*, 2012, pp. 406-409. DOI: [10.1109/MWSCAS.2012.6292043](https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2012.6292043)
- [29] C.-H. Chang, J. Gu, and M. Zhang, "Ultra low-voltage low-power CMOS 4-2 and 5-2 compressors for fast arithmetic circuits," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 51, pp. 1985-1997, 2004. DOI: [10.1109/TCSI.2004.835683](https://doi.org/10.1109/TCSI.2004.835683)
- [30] E. Deng, Y. Zhang, J.-O. Klein, D. Ravelsona, C. Chappert, and W. Zhao, "Low power magnetic full-adder based on spin transfer torque MRAM," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 49, pp. 4982-4987, 2013. DOI: [10.1109/TMAG.2013.2245911](https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2245911)
- [31] F. Sabetzadeh, M. H. Moaiyeri, and M. Ahmadinejad, "A majority-based imprecise multiplier for ultra-efficient approximate image multiplication," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 66, pp. 4200-4208, 2019. DOI: [10.1109/tcsi.2019.2918241](https://doi.org/10.1109/tcsi.2019.2918241)
- [32] O. Akbari, M. Kamal, A. Afzali-Kusha, and M. Pedram, "Dual-quality 4: 2 compressors for utilizing in dynamic accuracy configurable multipliers," *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 25, pp. 1352-1361, 2017. DOI: [10.1109/TVLSI.2016.2643003](https://doi.org/10.1109/TVLSI.2016.2643003)
- [33] A. G. M. Strollo, E. Napoli, D. De Caro, N. Petra, and G. Di Meo, "Comparison and extension of approximate 4-2 compressors for low-power approximate multipliers," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 67, pp. 3021-3034, 2020. DOI: [10.1109/TCSI.2020.2988353](https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.2988353)
- [34] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity," *IEEE transactions on image processing*, vol. 13, pp. 600-612, 2004. DOI: [10.1109/TIP.2003.819861](https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861)
- [35] U. SIPI, "The USC-SIPI image database," ed, 2016.
- [36] D. Esposito, A. G. M. Strollo, E. Napoli, D. De Caro, and N. Petra, "Approximate multipliers based on new approximate compressors," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 65, pp. 4169-4182, 2018. DOI: [10.1109/TCSI.2018.2839266](https://doi.org/10.1109/TCSI.2018.2839266)
- [37] Y. J. Chang, Y. C. Cheng, Y. F. Lin, S. C. Liao, C. H. Lai, and T. C. Wu, "Imprecise 4-2 compressor design used in image processing applications," *IET Circuits, Devices*
- DWT," *Circuits, Systems, and Signal Processing*, vol. 36, pp. 1129-1149, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00034-016-0349-9>
- [10] S. Tabrizchi, N. Azimi, and N. Keivan, "Design a novel ternary half adder and multiplier based on carbon nanotube field effect transistors (CNTFETs)," *Frontiers*, vol. 1, pp. 423-433, 2016. <https://doi.org/10.1631/FITEE.1500366>
- [11] P. Aliparast, Z. D. Koozehkanani, and F. Nazari, "An ultra high speed digital 4-2 compressor in 65-nm CMOS," *International Journal of Computer Theory and Engineering*, vol. 5, p. 593, 2013. DOI: [10.7763/IJCTE.2013.V5.756](https://doi.org/10.7763/IJCTE.2013.V5.756)
- [12] F. Sharifi, Z. Saifullah, and A.-H. Badawy, "Design of adiabatic MTJ-CMOS hybrid circuits," in *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, 2017, pp. 715-718. DOI: [10.1109/MWSCAS.2017.8053023](https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2017.8053023)
- [13] M. Ahmadinejad and M. H. Moaiyeri, "Energy-efficient magnetic 5: 2 compressors based on SHE-assisted hybrid MTJ/FinFET logic," *Journal of Computational Electronics*, vol. 19, pp. 206-221, 2020. DOI: [10.1007/s10825-019-01441-0](https://doi.org/10.1007/s10825-019-01441-0)
- [14] M. Maleknejad, S. M. Mirhosseini, and S. Mohammadi, "A CNFET-based PVT-tolerant hybrid majority logic 4: 2 compressor design for high speed energy-efficient applications," *Microprocessors and Microsystems*, p. 104031, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2021.104031>
- [15] L. Maddisetti, R. K. Senapati, and J. Ravindra, "Accuracy evaluation of a trained neural network by energy efficient approximate 4: 2 compressor," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 92, p. 107137, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107137>
- [16] B. Fang, H. Liang, D. Xu, M. Yi, Y. Sheng, C. Jiang, et al., "Approximate multipliers based on a novel unbiased approximate 4-2 compressor," *Integration*, vol. 81, pp. 17-24, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2021.05.003>
- [17] M. M. D. Savio, T. Deepa, P. D. Dharshini, K. Sonali, and O. Singh, "Design of High speed Multiplier using Input Scrambled 5-3 compressor for Error Tolerant image processing," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, p. 012044. DOI: [10.1088/1742-6596/2335/1/012044](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2335/1/012044)
- [18] R. G. Shankar and D. Ananthi, "Approximate Booth Multipliers using Compressors and Counter," in *2023 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, 2023, pp. 1658-1662. DOI: [10.1109/ICICT57646.2023.10134198](https://doi.org/10.1109/ICICT57646.2023.10134198)
- [19] P. J. Edavoor, S. Raveendran, and A. D. Rahulkar, "Approximate multiplier design using novel dual-stage 4: 2 compressors," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 48337-48351, 2020. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.2978773](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2978773)
- [20] N. Srinivas and Y. R. Rao, "Design of High Speed 5: 2 Compressor for Fast Arithmetic Circuits," *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, vol. 6, 2017.
- [21] K. M. Reddy, M. Vasantha, Y. N. Kumar, and D. Dwivedi, "Design and analysis of multiplier using approximate 4-2 compressor," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 107, pp. 89-97, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.05.021>
- [22] J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong, and R. Meservey, "Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions," *Physical review letters*, vol. 74, p. 3273, 1995. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.3273>
- [23] R. Zand, A. Roohi, S. Salehi, and R. F. DeMara, "Scalable adaptive spintronic reconfigurable logic using



& Systems, vol. 13, pp. 848-856, 2019. DOI: [10.1049/iet-cds.2018.5403](https://doi.org/10.1049/iet-cds.2018.5403)

- [38] M. Sam Daliri, K. Navi, R. Faghih Mirzaee, S. Sam Daliri, and N. Bagherzadeh, "A new approach for designing compressors with a new hardware-friendly mathematical method for multi-input XOR gates," *IET Circuits, Devices & Systems*, vol. 11, pp. 46-57, 2017. <https://doi.org/10.1049/iet-cds.2016.0041>



Islamic Azad University , Shiraz Branch

نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis

sanad.iau.ir/journal/jcdsa



Resistance Load production for Testing Systems Emergency Diesel Generators

Seyed Hamed Hosseini nejad¹, Mozhde Heydarianasl^{*2}

¹ Department of Electrical Engineering, Dashtestan Branch, Islamic Azad University, Dashtestan, Iran
ahanzard@gmail.com

² Department of Electrical Engineering, Dashtestan Branch, Islamic Azad University, Dashtestan, Iran
heydarianasl23@yahoo.com

Abstract: Resistive load is used to test diesel generators, eliminating wet-stacking phenomenon in diesel generators and also to check the full and efficient performance of generators under rated load. In present paper, the design and fabrication of a controllable load resistor laboratory is investigated to ensure the correct and effective performance of diesel generators in the South Pars Third Refinery. The function of the device will be that by implementing a resistor load, it will place an artificial load on the generator. Scheduled test operations and loads increase gradually. As the load increases, the device will begin to measure and record diesel generator parameters including generator output voltage, current, frequency, power, temperature and oil pressure in the diesel engine at a specified interval. With the help of recorded data, it can be assured that the diesel generator is capable of increasing its power proportional to the load and also the ability of the diesel generator to continue operating at the highest possible level for a sustained period of time.

Keywords: Resistance Load, Emergency Diesel Generators, Refinery, Power, Output Voltage.

JCDSA, Vol. 2, No. 4, Winter 2025

Received: 2024-10-21

Online ISSN: 2981-1295

Accepted: 2025-01-12

Journal Homepage: <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa>

Published: 2025-03-20

CITATION

Hosseini nejad,S.h., Heydarianasl, M., "Resistance Load production for Testing Systems Emergency Diesel Generators", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 2, No. 4, pp. 14-23, 2025.

DOI: 00.00000/0000

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

1- Introduction

Diesel generators are among the most important and excellent in medical, industrial, and other service centers. The most important purpose of using diesel generators in refineries is to provide a reliable power source for emergency needs when the gas power plants of the refinery go out of the circuit and are no longer able to supply the required energy. Also, in parts of the refinery where the power grid is not available, diesel generators must be used to supply the required power for the maintenance or operating groups. For offline testing and ensuring the correct operation of diesel generators, it is necessary to use a resistance load test device. Resistive load test includes checking and evaluating the diesel generator and confirms that all the primary components of the generator are in working and operational condition. In fact, the resistance load test device provides an artificial load for the generator and brings the diesel engine of the generator to the temperature and oil pressure in operating conditions. Additionally, emergency diesel generators (EDG) are intended to feed the necessary and vital loads when the GTGs are out of operation, and these generators are also used for Black Start. Black Start is so-called when there is no electrical energy in the refinery and even UPSs are not able to perform services. (Just like the initial start conditions of the refinery).

In phases 4 and 5 of South Pars, two EDG devices with output power of 4500 KVA, voltage of 6 KV, frequency of 50 Hz, power factor of 0.8 and rotor speed of RPM 1500 have been installed to feed essential and vital loads. Each EDG is equipped with a UCP (generator unit control panel) which is located in Sub-station 1 and also has a LCP (local control panel) which is placed inside the EDG package. Considering that EDG can be started both manually and automatically, so in case of voltage drop and loss of the main network, first EDG-A after 30 seconds and then EDG-B after 5 seconds and synchronizing with EDG-A enters the circuit. Finally, after the network is stabilized, EDGs can be removed from the circuit in two ways, manual and automatic.

2- Methodology

As mentioned, resistive load is used to test diesel generators, eliminate the phenomenon of moisture accumulation and incomplete combustion in diesel generators, and also to check the complete and efficient operation of generators under rated load. Due to importance of the matter, in this article, the design and construction of a controllable resistive load laboratory sample has been investigated to ensure the correct and effective operation of the emergency diesel generators of the third refinery in South Pars.

In the current research, a resistive load device has been designed and built using the method of controlling the firing angle of power thyristors, and then it has been tested on a 25 kVA diesel generator. The function of the device will be that by implementing a resistive load, an artificial load will be placed on the generator. The test operation is timed and the load increases gradually. As the load increases, the device will start to measure and record the parameters of the diesel generator. Using the recorded data, it is possible to ensure that the diesel generator can increase the power capacity with the load as well as the use of the diesel generator to continue working at the highest possible level for a sustained period of time. Since the electrical power of the diesel generator is discharged through resistance, hence in this research, a cylindrical resistance element made of ceramic is used. It is necessary to explain that the element wire is wrapped around the ceramic ring.

3- Results and discussion

After the test is completed, this device will provide a complete report of the diesel generator components, including generator output voltage, flow capability, frequency, active power, temperature and oil pressure of the diesel engine in a specific time frame, stable and proportional to the increase in load. In addition, the construction of domestic load bank due to the extremely high importance and many applications of alternating current and direct current load banks in industries, emergency diesel generators, uninterrupted power supplies for testing batteries and also in order to prevent foreign exchange from leaving the country, it is strongly needed. In the current research, after the design of the prototype, circuit simulation was done by MATLAB software, and after achieving the desired results, the circuit schematic was drawn using Altium Designer software and implemented on printed circuit fiber. Finally, the assembly of the parts for the use of the device was done well.

4- Conclusion

In general, the circuit has three layers, including command, Optodiag and power. The command floor is responsible for controlling the circuit. The Optodiag layer, which is the second layer of the circuit, connects the two layers of command and power, and since the Optodiag communicates through light, noise does not transfer between these two layers. Therefore, this type of Optodiag performance can be mentioned as its advantage. The power class, which is the third circuit class, has a different arrangement depending on the type of load. As a result, due to the fact that the maintenance and repair program of diesel generators is necessary and unavoidable, periodic and regular tests are necessary and important in addition to the test that is performed immediately after the installation of the diesel generator.





ساخت بار مقاومتی جهت تست دیزل ژنراتورهای اضطراری سامانه ها

سید حامد حسینی نژاد^۱، مؤده حیدریان اصل^{۲*}

۱- گروه مهندسی برق، واحد دشتستان، دانشگاه آزاد اسلامی، دشتستان، ایران (ahanzard@gmail.com)

۲- گروه مهندسی برق، واحد دشتستان، دانشگاه آزاد اسلامی، دشتستان، ایران (heydarianas123@yahoo.com)

چکیده: بار مقاومتی به منظور تست دیزل ژنراتورها، حذف پدیده انباشت رطوبت و احتراق ناقص در دیزل ژنراتور و همچنین جهت بررسی عملکرد کامل و کارآمد ژنراتورها در زیر بار نامی بکار برده می شود. در این مقاله طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی بار مقاومتی قابل کنترل، جهت اطمینان از عملکرد صحیح و مؤثر دیزل ژنراتورهای اضطراری پالایشگاه سوم پارس جنوبی بررسی گردیده است. عملکرد دستگاه به این صورت خواهد بود که با پیاده سازی یک بار مقاومتی، یک بار مصنوعی روی ژنراتور قرار خواهد گرفت. عملیات تست زمان بندی شده و بار به صورت تدریجی افزایش پیدا می کند. با افزایش بار، دستگاه شروع به اندازه گیری و ثبت پارامترهای دیزل ژنراتور شامل ولتاژ خروجی ژنراتور، جریان، فرکانس، توان، دما و فشار روغن در موتور دیزل در یک بازه مشخص، خواهد نمود. به کمک داده های ثبت شده می توان از توانایی دیزل ژنراتور در افزایش توان متناسب با بار و همچنین توانایی دیزل ژنراتور به ادامه کار در بالاترین سطح ممکن برای یک دوره زمانی پایدار، اطمینان حاصل نمود.

واژه های کلیدی: بار مقاومتی، دیزل ژنراتورهای اضطراری، پالایشگاه، توان، ولتاژ خروجی

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰

[۳]. همچنین رویه کار و استاندارد برای انجام تست در مراجع استاندارد داخلی وجود ندارد. در حال حاضر روش غیراستاندارد و غیرایمن ظرف آب نمک به منظور تست بار مقاومتی دیزل ژنراتورها در صنایع کشور مورد استفاده قرار می گیرد [۴ و ۵]. روش مذکور به اینصورت است که سه فاز خروجی دیزل ژنراتور را به صورت مستقیم وارد ظرف آب نمک می کنند که به علت عدم ایمنی، خطرات زیادی به همراه دارد و همچنین مقدار جریان به سختی قابل کنترل است. در صنایع رو به رشد از یک روش جدید که شامل یک مجموعه بار اهمی است، استفاده می گردد. در این روش توسط کلید یا کنتاکتور مقدار مقاومت را بصورت پله ای تغییر می دهند و بدین وسیله امکان ایجاد توان های مختلف از خروجی دیزل ژنراتور در طول تست فراهم می گردد. لذا در مدت زمان تست، مقدار ولتاژ و جریان دیزل ژنراتور را کنترل می نمایند. اولین عیب روش فوق در این است که تغییرات جریان بصورت پله ای است و امکان تنظیم جریان در محدوده خاصی به کمک کلید و کنتاکتورها، غیرممکن است و یا با سختی زیاد صورت می گیرد. دومین عیب این روش، نیاز به استفاده از یک یا چند اپراتور جهت خواندن، یادداشت و ثبت اطلاعات است که معمولاً اشتباهات انسانی در روند جمع آوری اطلاعات مورد نظر، باعث ایجاد خطا در ارزیابی اطلاعات می گردد [۳].

از مهم ترین شرکت های خارجی در زمینه تست بار مقاومتی دیزل ژنراتورها شرکت های KEYPOWER و CRESTCHIC هستند [۶]. شرکت KEYPOWER با ساخت دستگاهی به نام Load Bank در

۱- مقدمه

دیزل ژنراتورها از اهمیت و حساسیت بالایی در مراکز درمانی، خدماتی، صنعتی و غیره برخوردار هستند. مهم ترین هدف استفاده از دیزل ژنراتورها در پالایشگاه ها، فراهم کردن یک منبع توان قابل اعتماد برای برطرف کردن نیازهای اضطراری در زمانی است که به طور ناگهانی نیروگاه گازی پالایشگاه از مدار خارج می شود و دیگر قادر به تامین توان مورد نیاز نمی باشد. همچنین در قسمت هایی از پالایشگاه که شبکه برق در دسترس نباشد به ناچار باید از دیزل ژنراتورها برای تامین توان مورد نیاز گروه های تعمیراتی یا بهره بردار استفاده کرد [۱]. برای تست آفلاین و اطمینان از عملکرد صحیح دیزل ژنراتورها استفاده از دستگاه تست بار مقاومتی امری ضروری می باشد. تست بار مقاومتی شامل بررسی و ارزیابی دیزل ژنراتور است و تایید می کند که همه مولفه های اولیه ژنراتور در شرایط کار و عملیاتی هستند. در واقع دستگاه تست بار مقاومتی، یک بار مصنوعی برای ژنراتور فراهم می کند و موتور دیزل ژنراتور را به دما و فشار روغن در شرایط عملیاتی می رساند. این مسئله خصوصاً برای دیزل ژنراتورهایی که حالت پشتیبان و اضطراری دارند بسیار مهم است چرا که اغلب در سرویس نیستند و یا ممکن است به طور مکرر زیر بار زیاد قرار نگیرند [۲]. اما متأسفانه به رغم اهمیت این موضوع تاکنون در داخل کشور تحقیقات و پژوهش های مکتوب و ثبت شده ای در زمینه تست بار مقاومتی دیزل ژنراتورها صورت نگرفته است



مؤثر دیزل ژنراتورهای اضطراری می‌باشد. با توجه به اینکه در حال حاضر چنین دستگاهی در داخل کشور ساخته نمی‌شود و نیاز به واردات آن از خارج کشور می‌باشد، بومی‌سازی دستگاه در داخل کشور و بی‌نیازی از واردات دستگاه و جلوگیری از خروج ارز، در راستای اجرای فرهنگ اقتصاد مقاومتی از ضرورت‌های خاص انجام این تحقیق می‌باشد. دستگاه پیشنهادی در این تحقیق قادر است با روش‌های استاندارد و بصورت کاملاً خودکار، تست بار مقاومتی را بر روی دیزل ژنراتور انجام داده و مؤلفه های ژنراتور را اندازه گیری و ثبت نماید. نتیجه این تحقیق شدیداً مورد نیاز پالایشگاه پارس جنوبی و همچنین تمام سایت‌ها، کارخانجات و مراکزی است که از دیزل ژنراتور اضطراری استفاده می‌کنند.

۲- دیزل ژنراتور

دیزل ژنراتور همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، از یک موتور دیزل و یک ژنراتور تشکیل شده است که ایجاد نیروی محرکه در سمت موتور دیزل منجر به تولید انرژی در سمت ژنراتور می‌گردد. یکی از مهم‌ترین کاربردهای دیزل ژنراتور، تأمین برق برای موارد مصرفی خاص است. اکثر اوقات هنگامی از دیزل ژنراتور استفاده می‌گردد که هزینه برق از شبکه سراسری مقرون به صرفه نباشد یا عدم وجود برق در روند کار خلل یا ایجاد ضرر می‌نماید. دیزل ژنراتور را با مقیاس کاوا (KVA) یا KW می‌سنجند. که میزان قدرت و توان دیزل ژنراتور محسوب می‌شود. بصورت کلی سه نوع کاربرد اساسی در مصارف دیزل ژنراتور شامل مصارف دائمی، مصارف اضطراری و دیزل ژنراتور تولید همزمان برق و حرارت^۲ است. در ادامه به تشریح این موارد پرداخته می‌شود:

۱. دیزل ژنراتور برای مصارف دائمی: که جهت تأمین برق به صورت تمام وقت است.
۲. دیزل ژنراتور برای مصارف اضطراری: برای تأمین برق لازم در زمان قطع شدن برق استفاده می‌گردد.
۳. دیزل ژنراتور تولید همزمان برق و حرارت: این دیزل ژنراتور برای مصارف خانگی و تجاری مناسب است؛ زیرا از برق تولید شده ژنراتور برای وسایل برقی و از گرمای حاصل از موتور دیزلی آن برای سیستم‌های گرمایشی از جمله گرم کردن آب استفاده می‌شود. [۱]

همانطور که بیان شد راه‌های مختلفی برای تولید برق وجود دارد و دلایل بسیاری وجود دارد که چرا تجهیزات تولید برق اضطراری ممکن است مورد نیاز باشد. یک ویژگی مشترک و ضروری در تجهیزات مذکور این است که دیزل ژنراتور بتواند به طور مؤثر در حداکثر توان خروجی خود، زمانی که لازم است، عمل کند. متأسفانه، این که کاملاً اطمینان حاصل شود که این مورد رخ خواهد داد آسان نیست. در بسیاری از دیزل ژنراتورها از بخش کوچکی از توان نامی آنها برای مدت زمان

مدل‌های KPLB-100، KPLB-500، KPLB-1000 قادر به انجام تست بار مقاومتی به صورت اتوماتیک بر روی دیزل ژنراتورها به ترتیب با توان ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلو وات گردیده است [۸، ۹]. سه مزیت مهم این دستگاه توسط بخش پژوهش شرکت مذکور به اینصورت بیان گردیده است: بررسی و تایید قابلیت راه‌اندازی و عملکرد صحیح و بدون ایراد دیزل ژنراتورها در زیر بار کامل، یافتن عیوب و ایرادهای دیزل ژنراتور قبل از اینکه بخواهد منجر به عیب‌های اساسی و هزینه‌های سنگین تعمیرات اساسی گردد، و ضمن جلوگیری از تشکیل انباشت رطوبت و یا احتراق ناقص در سیستم اگزوز انباشت سوخت^۱، دوده‌های ته‌نشین شده را خارج می‌کند. همانطور که قبلاً ذکر شد، مهم‌ترین هدف استفاده از دیزل ژنراتورها فراهم کردن یک منبع توان قابل اعتماد برای بر طرف کردن نیازهای اضطراری و تأمین توان مورد نیاز در زمانی است که به طور ناگهانی شبکه برق از مدار خارج می‌شود. در زمانی که دسترسی به نیروگاه پالایشگاه به هر دلیل از بین برود، باید آرامش خاطر وجود داشته باشد که منبع توان پشتیبان وارد عمل می‌شود و برق اضطراری پالایشگاه را تأمین می‌کند. اما وقتی که نیروگاه گازی از دسترس خارج می‌شود و مجموعه دیزل ژنراتورهای اضطراری، انتظارها را برآورده نمی‌کنند نتیجه می‌تواند فاجعه بار و یا بسیار پرهزینه باشد [۲]. این قاعده کلی وجود دارد که اگر دیزل ژنراتور زیر بار بالاتر از سی درصد کیلووات نامی قرار نگیرد باید تست بار مقاومتی به طور سالیانه برای آن انجام شود. تست بار مقاومتی این تضمین را می‌دهد که در مواقع بحرانی که به برق اضطراری نیاز است دیزل ژنراتور عملکرد صحیح و بدون خطا داشته باشد و در شرایط مذکور کاملاً قابل اعتماد است و می‌توان به آن تکیه کرد. اگر از یک دیزل ژنراتور به طور مکرر استفاده نشود و یا فقط زیر بارهای سبک استفاده شود، می‌تواند مستعد برای تجربه احتراق ناقص و تشکیل دوده در اگزوز که اصطلاحاً به آن انباشت سوخت می‌گویند، باشد. در حالتیکه چنین اتفاقی می‌افتد دیزل ژنراتور عملکرد ضعیفی خواهد داشت و ادامه کار با این وضعیت می‌تواند خطر آتش سوزی داشته باشد و یا حتی منجر به آسیب کامل به موتور دیزل ژنراتور شود. در طول تست بار مقاومتی به ژنراتور این اجازه داده می‌شود که زیر بار کامل کار کند که این باعث از بین رفتن انباشت سوخت می‌شود. بنابراین استفاده از دستگاه تست بار مقاومتی دیزل ژنراتورها برای تست آفلاین و اطمینان از عملکرد صحیح دیزل ژنراتورها امری ضروری می‌باشد. دستگاه تست بار مقاومتی وسیله‌ای کاملاً ضروری در طرح تعمیراتی پیشگیرانه ژنراتورهاست که می‌توان با آن ژنراتورها را به صورت سالیانه ارزیابی کرد. تست بار مقاومتی کمک می‌کند تا مطمئن شویم که ژنراتورهای اضطراری پالایشگاه کاملاً قابل اعتماد و عملیاتی هستند و به طور کامل قادر به تأمین حداکثر بار پیش‌بینی شده در شرایط اضطراری و بحرانی می‌باشند.

هدف اصلی این تحقیق طراحی و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی دستگاه تست بار مقاومتی اتوماتیک جهت اطمینان از عملکرد صحیح و

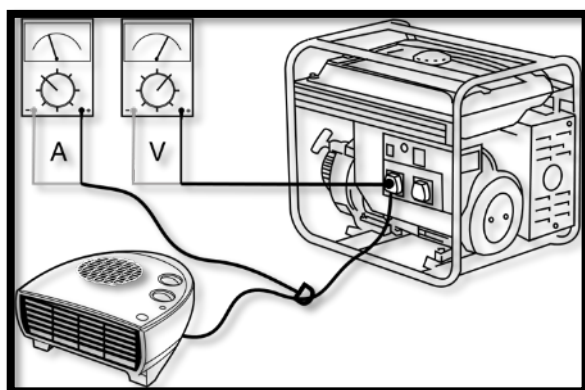
¹ wet-stacking

² Combined Heat & Power (CHP)

مجهز به یک UCP (تابلوی کنترل واحد ژنراتور) که در Sub-station قرار دارد و یک LCP (تابلوی کنترل محلی) که درون پکیج EDG قرار دارد، است. EDG می‌تواند به دو صورت دستی و اتوماتیک راه‌اندازی شود در صورت افت ولتاژ و از دست دادن شبکه اصلی، ابتدا EDG-A پس از ۳۰ ثانیه و سپس EDG-B پس از ۵ ثانیه و سنکرون شدن با EDG-A وارد مدار می‌شود. پس از پایدار شدن شبکه، می‌توان EDG ها را به دو صورت دستی و اتوماتیک از مدار خارج کرد. در حالت اتوماتیک سیستم کنترل ابتدا بار EDG را به کمتر از ۵۰۰ KW رسانده و پس از باز کردن کلید قدرت EDG را خاموش می‌کند. در حالت دستی، ابتدا قدرت ژنراتور را توسط گاورنر و کم کردن سوخت به کمتر از ۵۰۰ KW رسانده و پس از باز کردن کلید قدرت فرمان خاموش شدن را به EDG می‌دهند. سیستم تهویه همزمان با استارت EDG توسط سیستم کنترل راه‌اندازی می‌شود. زمانی که ژنراتور مراحل اولیه راه‌اندازی را سپری می‌کند، دریچه‌های پکیج ژنراتور توسط یک موتور تنظیم می‌شود. در صورت وجود گاز و یا آتش‌سوزی این دریچه‌ها به طور کامل بسته می‌شوند. هر EDG مجهز به یک Fire And Gas Panel می‌باشد. در صورت فعال شدن یکی از سنسورها، ابتدا اعلام هشدار شده و اگر هر دو سنسور فعال شوند آلامر تأیید آتش بوجود آمده و سیستم کنترل فرمان از مدار خارج شدن سریع ژنراتور (Fast Shut Down) را صادر می‌کند و دریچه‌های تهویه هوای ورودی و خروجی بسته می‌شوند. در این زمان گاز CO₂ بطور اتوماتیک به درون پکیج EDG تزریق می‌شود. لازم به ذکر است که دو ست چهارتایی کپسول گاز دی‌اکسید کربن CO₂ برای هر EDG موجود می‌باشد.



شکل (۱): دیزل ژنراتور



شکل (۲): سیستم تست خروجی ژنراتور

طولانی استفاده می‌شود و بعضی دیگر تنها در شرایط اضطراری به کار گرفته می‌شوند که ممکن است این شرایط اضطراری به ندرت رخ دهد. در هر دو مورد، تنها راه برای اطمینان از اینکه تجهیزات تولید برق قادر به ارائه عملکرد مورد نیاز می‌باشند، به طور منظم، با حداکثر توان نامی خود تحت آزمایش بار مقاومتی قرار می‌گیرند. مقامات مختلف نظارتی و سایر طرف‌های ذینفع مانند شرکت‌های بیمه از این موضوع آگاهی دارند و آزمایش دیزل ژنراتورها در بسیاری از کشورها اجباری است. در بسیاری از موارد همچنین نیاز به آزمایش منظم برای تجهیزات موجود، به ویژه آنهایی که دارای منبع تغذیه اضطراری یا آماده به کار هستند، ضروری است. لذا تست دوره ای دیزل ژنراتورها جهت اطمینان از عملکرد صحیح آنها مورد نیاز است. به منظور تست دیزل ژنراتورها، ابتدا یک بار که برابر با حداکثر خروجی ژنراتور است به دیزل ژنراتور اعمال می‌گردد. سپس ژنراتور راه‌اندازی و همه پارامترهای خروجی آن اندازه گیری و ثبت می‌گردد. اندازه‌گیری دقیق پارامترهای خروجی ژنراتور، هر گونه مشکلی در رابطه با توانایی آن برای برآوردن مشخصات بار مشخص می‌کند. پس از تعمیرات و یا اصلاحات انجام شده، با انجام مجدد تست رفع عیب احتمالی بررسی می‌گردد [۳].

شکل (۲) شماتیک کلی از سیستم تست یک ژنراتور ساده را نشان می‌دهد. این شکل چهار عنصر اساسی مورد نیاز برای آزمایش یک مجموعه تولید شامل عناصر گرمادهی بخاری، فن بخاری، ولت متر و آمپر متر را در بر می‌گیرد. بخاری یک بار الکتریکی است که به اندازه کافی بزرگ است تا اطمینان حاصل شود که ژنراتور با ظرفیت کامل کار می‌کند. فن بخاری باعث از بین بردن مقدار قابل توجهی از حرارت تولید شده در حین آزمون می‌گردد. ولت متر و آمپر متر ابزاری را ارائه می‌دهند که می‌توانند نتایج آزمون را تحت نظارت قرار دهد. البته این تنظیمات می‌تواند تنها یک آزمایش ساده برای یک ژنراتور کم قدرت ارائه دهد و توانایی آن برای مطابقت دقیق آن با خروجی ژنراتور بسیار محدود است. همان‌طور که خروجی ژنراتور افزایش می‌یابد، تجهیزات کابل کشی، تابلو و کنترل مورد نیاز برای این امر به طور فزاینده‌ای سنگین تر و پیچیده تر می‌شوند. علاوه بر این، به دلیل حجم زیادی از حرارت تولید شده در حین آزمایش، موضوع نحوه انجام آزمایش با مسائل ایمنی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد [۳].

۲-۱- دیزل ژنراتورهای اضطراری پالایشگاه سوم

پارس جنوبی

دیزل ژنراتورهای اضطراری (EDG) جهت تغذیه بارهای ضروری و حیاتی در زمانی که GTG ها از مدار خارج شوند در نظر گرفته شده‌اند و همچنین این ژنراتورها برای زمان Black Start مورد استفاده قرار می‌گیرند. Black Start اصطلاحاً به زمانی گفته می‌شود که هیچگونه انرژی الکتریکی در پالایشگاه موجود نباشد و حتی UPS ها را از دست داده باشیم. (درست مانند شرایط استارت اولیه پالایشگاه). در فازهای ۴ و ۵ پارس جنوبی دو دستگاه EDG با توان خروجی ۴۵۰۰ KVA، ولتاژ ۶KV، فرکانس ۵۰Hz ضریب توان ۰/۸ و دور روتور ۱۵۰۰ RPM جهت تغذیه بارهای ضروری و حیاتی نصب شده‌اند. هر EDG

۲-۲- بار مقاومتی

همگانی به هر دلیل نتواند توان را تامین کند، ژنراتور شروع به کار می‌کند و تا زمانی که تامین‌کننده همگانی تعمیر شود توان سایت را تامین می‌کند [۱۱، ۱۲].

همانطور که بیان شد، مثالی از یک سیستم تصحیح بار سایت در شکل (۴) نشان داده شده است. بانک بار هنگامی راه‌اندازی می‌شود که ژنراتور شروع به کار کند و مدار کنترل آن شروع به نظارت بر جریان خروجی می‌کند. اگر این جریان کمتر از نقطه تنظیم خاص باشد، بانک بار به آرامی بار اضافی را برای تولید بیشتر ژنراتور در محدوده مطلوب اعمال می‌کند. اگر جریان در پاسخ به افزایش بار سایت افزایش یابد، بانک بار، شروع به کم کردن بار می‌کند. بانک بار می‌تواند این کار را به سرعت در پاسخ به تغییرات ناگهانی بار سایت، از قبیل راه‌اندازی بالابر یا موتور پمپ، انجام دهد. اصلاح بار سایت یک برنامه تخصصی برای یک بانک بار است و نیاز به تنظیم دقیق دارد. به کمک سیستم کنترلی می‌توان تعداد زیادی بانک بار را به هم متصل و از یک ترمینال واحد کنترل نمود. این بدان معنی است که بانک‌های بار چندگانه می‌توانند به طور خاص به مجموعه‌های تولیدی بزرگ متصل شوند یا اینکه ترکیبی از بارهای مقاومتی، خازنی یا القایی را می‌توان برای آزمایش‌های خاص یا آزمایش‌های یکپارچه ترکیب کرد.

۲-۳- طراحی و ساخت بار مقاومتی به منظور تست

دیزل ژنراتور

مراحل طراحی و ساخت دستگاهی که برای انجام تست بار مقاومتی اتوماتیک دیزل ژنراتور می‌باشد در ادامه نشان داده شده است. دستگاه مورد نظر از دو قسمت عمده تشکیل می‌گردد:

۱. قسمتی که به دیزل ژنراتور وصل می‌شود و مؤلفه‌های دیزل ژنراتور را بصورت مستقل ثبت و ضبط می‌نماید. این بخش از دستگاه را بخش مونیتورینگ می‌نامیم.
 ۲. قسمتی که کنترل جریان را به عهده دارد و بخش کنترل جریان نام‌گذاری شده است. در این قسمت از یک بار اهمی استفاده شده که با استفاده از مدارات الکترونیک صنعتی و آتش کردن ترستورهای قدرت [۱۱-۱۳] مقدار مقاومت اهمی کنترل شده و در نتیجه جریان بار کنترل خواهد شد.
- قدم اول در ساخت این دو بخش از دستگاه، طراحی و تست مدار اولیه است. قلب اصلی، یک میکروکنترلر ARM یا AVR خواهد بود که برنامه‌نویسی آن توسط زبان برنامه‌نویسی C به کمک نرم‌افزار Code Vision AVR یا Keil انجام می‌گیرد. برای تغذیه بردهای الکترونیکی، منبع تغذیه سوئیچینگ مطمئن و فیلتر شده جهت کاهش نویز طراحی شد [۱۴-۱۶]. مدار اولیه در شکل (۵) نشان داده شده که کلیه قطعات سخت‌افزاری شامل برد کنترلی میکرو، ترانس‌های جریان و ولتاژ، برد مدار واسط و ترستورهای قدرت است، را نشان می‌دهد. بعد از طراحی نمونه اولیه مدار، مدار توسط نرم‌افزارهای شبیه سازی مانند MATLAB یا PROTEUS شبیه‌سازی می‌شود.

به منظور آزمایش استاندارد دیزل ژنراتورها مهم است که یک بار مطابق با خروجی ژنراتور ارائه شود. این بار باید قابلیت تغییر و تکرارپذیری در آزمایش را داشته باشد تا آزمون بتواند با دقت اندازه‌گیری و ثبت شود. همچنین این سیستم باید بتواند میزان زیادی از گرما که در طول آزمایش تولید می‌شود را از بین ببرد. از طرف دیگر بسیار مهم است که این آزمایش، سیستم برق سایت را در معرض خطر قرار ندهد. برای رسیدن به این اهداف یک مورد خاص از تجهیزات مانند بانک بار استاندارد مورد نیاز است. این بانک بار شامل یک مجموعه‌ای از عناصر بار با یک سیستم کنترل است و طوری طراحی شده که اطمینان حاصل کند که بار به طور دقیق و در ایمنی کامل می‌تواند استفاده گردد [۱۰-۱۲]. کاربرد اصلی یک بانک بار، استفاده در آزمایشات ژنراتور است. با این حال، بانک بارها دستگاه‌هایی چند منظوره و دارای تعدادی برنامه با کاربردهای مفید هستند که می‌توانند در طول نصب، راه اندازی و عملیات بهره‌برداری ژنراتور مورد استفاده واقع گردند. شکل (۳) طراحی یک بانک بار به منظور فراهم کردن امکانات مورد نیاز برای انجام یک آزمایش ایمن در کمترین زمان ممکن و ارائه یک آزمایش قابل اعتماد برای اطمینان از صحت تجهیزات تولید برق با خروجی تا چند مگاوات، را نشان می‌دهد.

یک آزمایش استاندارد نیاز به کنترل دقیق بار اعمال شده به ژنراتور و اندازه‌گیری دقیق زمان و ثبت داده‌های خروجی ژنراتور دارد. برای دستیابی به این هدف، بانک بار به یک سیستم کنترل بار مجهز شده است. این واحد یک سیستم کنترلی و ابزار دقیق مبتنی بر ریزپردازنده است. این واحد، کنترل دقیق بر عملکرد هر عنصر بار را در طی آزمون فراهم می‌کند در حالی که همزمان نتایج را اندازه‌گیری می‌کند. این واحد همچنین مانیتورینگ، ایمنی و اینترلاک‌ها را انجام می‌دهد [۱۲]. در بسیاری از سایت‌های صنعتی یک ژنراتور ممکن است برای دوره‌ای طولانی با بار کم یا بدون بار استفاده شود. برای یک ژنراتور دیزل این بدان معنا است که ممکن است موتور دیزل به دمای عملیاتی بهینه خود نرسد و این امر می‌تواند یک مشکل را که گاهی اوقات به عنوان انباشت سوخت نامیده می‌شود، ایجاد کند زیرا سوخت مصرف نشده می‌تواند به دوده در اگزوز منتهی شود. این می‌تواند به مشکلات تعمیر و نگهداری جدی، از جمله سطح بالای فرسودگی سیلندر، مصرف بیش از حد سوخت و میزان بالای انتشار آلاینده‌گی، منجر شود. یک بانک بار استاندارد یک تابع شناخته شده به عنوان اصلاح بار سایت^۱ ارائه می‌دهد که یک راه‌حل خودکار برای مشکل مذکور را فراهم می‌کند. این جایی است که بانک بار به صورت اتوماتیک بار را اضافه و یا حذف می‌کند تا ژنراتور را در دمای مطلوب نگه دارد. برنامه‌های زیادی برای اصلاح بار سایت وجود دارد. شکل (۴) یک سناریوی نمونه را نشان می‌دهد که در آن یک سایت که توسط تامین‌کننده همگانی^۲ تامین می‌شود، از یک ژنراتور پشتیبان هم استفاده می‌کند. سیستم طوری طراحی شده است که اگر تامین‌کننده

¹ Site Load Correction (SLC)

² utility supply



عملی تست شده و پارامترهای مورد نظر از قبیل جریان، ولتاژ، فرکانس و... اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند و با کمک این داده‌ها بعد از اتمام زمان تست، می‌توان از عملکرد صحیح دیزل ژنراتور اطمینان حاصل نمود [۱۸، ۱۹].

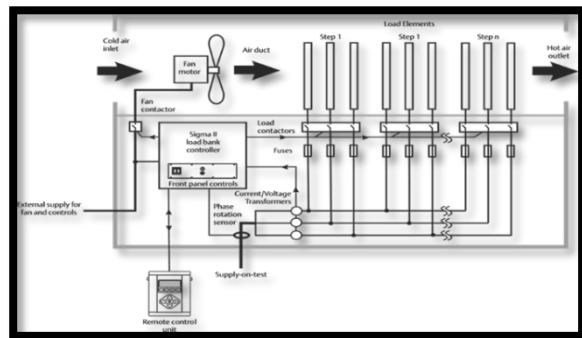
شکل (۹) مدار شبیه‌سازی شده توسط نرم افزار Proteus را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، مدار شامل سه بلوک می‌باشد. بلوک ۱، وظیفه کنترل عملکرد مدار را دارد و طبقه فرمان نامیده می‌شود. بلوک ۲، از یک اپتودیپاک تشکیل شده است که بوسیله نور دو طبقه فرمان و قدرت را به هم متصل می‌نماید. این طبقه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. بزرگترین مزیت استفاده از اپتودیپاک ارتباط از طریق نور می‌باشد که مانع انتقال نویز از طبقه قدرت به طبقه فرمان می‌گردد. بلوک ۳، طبقه قدرت است که در این طبقه بسته به نوع بار (اهمی، اهمی - خازنی و اهمی - سلفی) آرایش و نوع قطعات متفاوت می‌باشد. به طور کلی وظیفه میکرو، کنترل زاویه آتش تراپاک هست؛ اتفاقی که در میکرو می‌افتد به این صورت است که پالس‌های گذر از صفر به پایه INTO (وقفه خارجی) می‌رود و تابع وقفه صدا زده می‌شود و در این تابع خروجی پالس برابر صفر می‌گردد و پس از طی کردن زمان انتظار به ۱ (۵ ولت) تغییر می‌یابد. میزان برش سیگنال با کم و زیاد کردن زمان انتظار میکرو صورت می‌گیرد.

۳- نتایج شبیه‌سازی و بررسی عملکرد دستگاه

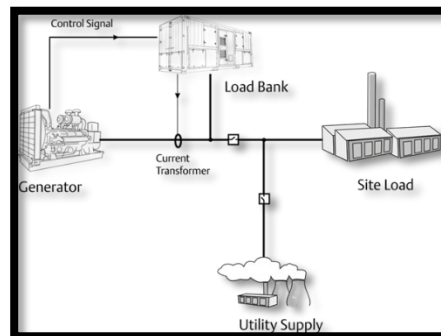
پیشنهادهی

توان الکتریکی دیزل ژنراتور در مقاومت تلف می‌شود. از آنجایی که این مدار بایستی ولتاژهای ۳۸۰ را تخلیه نماید مقاومت با سطح ولتاژ ۰ تا ۳۸۰ ولت را انتخاب می‌نماییم. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، المنت مقاومتی پیشنهادی در این مدار از نوع المنت سرامیکی بصورت استوانه‌ای بوده که سیم المنت آن بصورت حلقوی به دور سرامیک پیچیده شده است. با موازی کردن ۲۰ المنت می‌توان توان‌ها و جریان‌های بالاتر را بدست آورد. شکل ۱۱، بانک بار مقاومتی ساخته شده در این مقاله که شامل ۲۰ المنت موازی است، را نشان می‌دهد. نحوه اتصال برد الکترونیکی و ماژول‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

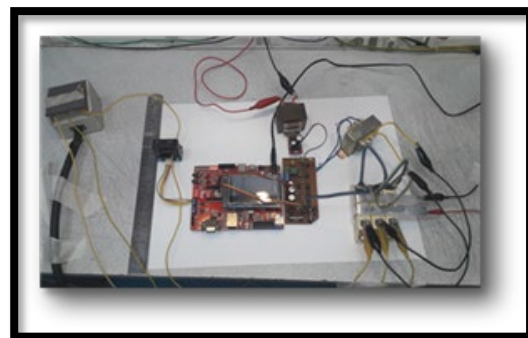
این دستگاه بر روی یک دیزل ژنراتور ۲۵ کیلوولت آمپر تست شد. دیزل ژنراتور ۲۵ کیلو ولت آمپر استفاده شده در آزمایش تست بار مقاومتی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. دستگاه پیشنهادی موفق به ثبت و نمایش مقادیر ولتاژ و جریان و توان ظاهری و توان اکتیو و فرکانس در فواصل زمانی یک دقیقه مطابق جدول ۱ گردید. در این جدول یک گزارش کامل از مؤلفه‌های دیزل ژنراتور در یک بازه زمانی مشخص و متناسب با افزایش بار ارائه گردیده است. داده‌های ثبت شده اطمینان از توانایی دیزل ژنراتور در افزایش توان متناسب با بار و همچنین ادامه کار در بالاترین سطح ممکن برای یک دوره زمانی پایدار را نشان می‌دهند.



شکل (۳): اجزای اصلی بانک بار [۱]



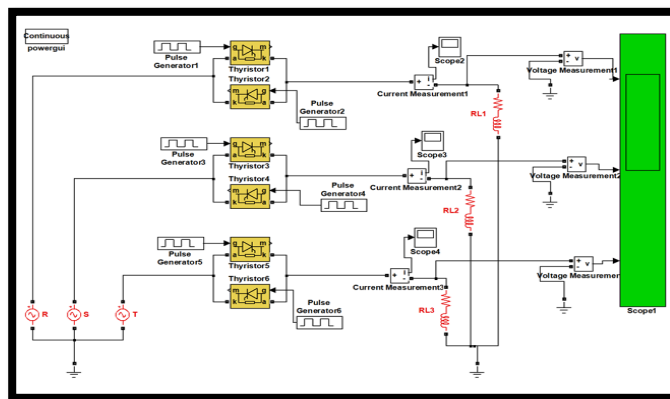
شکل (۴): تصحیح بار سایت [۵]



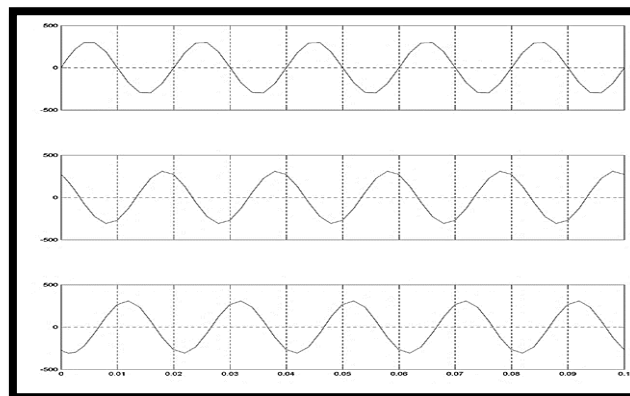
شکل (۵): قطعات و برد مورد استفاده در تحقیق

شکل (۶) مدار شبیه‌سازی شده یک مبدل ولتاژ سه فاز را نشان می‌دهد که با استفاده از قسمت سیمولینک نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. ورودی مبدل یک ولتاژ سه فاز متقارن است. با استفاده از تغییر زاویه آتش تریستورها می‌توان ولتاژ خروجی مبدل را تنظیم نمود. ولتاژ ورودی و ولتاژ خروجی مبدل شبیه سازی شده به ترتیب در شکل (۷-۸) نشان داده شده است. بعد از رفع اشکالات احتمالی و اصلاح معایب طراحی، توسط نرم‌افزار Altium Designer شماتیک مدار رسم می‌شود و در نهایت فایل مدار چاپی دستگاه تهیه می‌گردد. سپس قطعات مورد نیاز تهیه شده و مونتاژ مدار انجام می‌گیرد. در قدم بعدی، با کمک دستگاه‌های اندازه‌گیری از قبیل اسیلوسکوپ، سیگنال ژنراتور و...، قسمت‌های مختلف دستگاه تست شده و بخش‌های اندازه‌گیری دستگاه تنظیم و کالیبره می‌گردد [۱۶، ۱۷]. نحوه کالیبراسیون به این نحو خواهد بود که مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر خولنده شده از دستگاه‌های اندازه‌گیری دقیق، که تاییدیه کالیبراسیون سالیانه از آزمایشگاه‌های مرکزی زیر نظر سازمان استاندارد دریافت کرده‌اند مقایسه و تنظیم می‌شود. در نهایت دستگاه بصورت





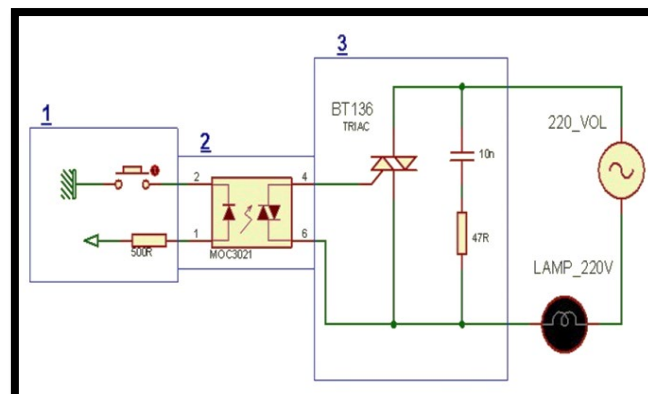
شکل (۶): مدار شبیه سازی شده یک مبدل ولتاژ تریستوری سه فاز



شکل (۷): شکل موج ولتاژ ورودی مبدل فازهای R,S,T



شکل (۸): شکل موج کل ولتاژ خروجی مبدل فازهای R,S,T



شکل (۹): مدار شبیه سازی شده با نرم افزار Proteus

جدول (۱): ثبت و نمایش مقادیر ولتاژ و جریان و توان ظاهری و توان اکتیو و فرکانس در فواصل زمانی مشخص

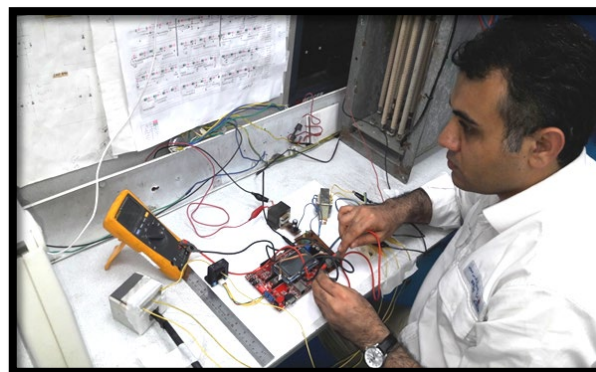
Time(s)	۶۰	۱۲۰	۱۸۰	۲۴۰	۳۰۰	۳۶۰	۴۲۰	۴۸۰	۵۴۰	۶۰۰
v line	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰
v line	۳۷۹	۳۷۹	۳۷۹	۳۷۹	۳۷۹	۳۷۹	۳۷۹	۳۷۹	۳۷۹	۳۷۹
v line	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰
current	۱۶	۵۴	۹۳	۱۳۵	۱۵۵	۱۹۸۱	۲۳۵	۲۶۸	۳۰	۳۳۵
current	۱۵	۵۳	۹۲	۱۳۴	۱۵۴	۱۹۷۹	۲۳۴۵	۲۶۷۴	۲۹۹	۳۳۴
current	۱۷	۵۵	۹۴	۱۳۶	۱۵۵	۱۹۸۵	۲۳۶	۲۶۸۶	۳۰۱	۳۳۶
Power Factor	۰.۹۷	۰.۹۷	۰.۹۷	۰.۹۷	۰.۹۷	۰.۹۷	۰.۹۷	۰.۹۷	۰.۹۷	۰.۹۷
Frequency	۴۹.۹	۴۹.۹	۵۰	۵۰	۵۰	۴۹.۹	۴۹.۹	۴۹.۹	۵۰	۵۰
Actual Power	۱۰۱۱	۳۳۹۵	۵۸۳۹	۸۴۳۹	۹۷۳۸	۱۲۴۱۶	۱۴۷۴۴	۱۶۷۹۲	۱۸۷۹۸	۲۰۹۹۱
Apparent Power	۱۰۴۳	۳۵۰۰	۶۰۲۰	۸۷۰۰	۱۰۰۴۰	۱۲۸۰۰	۱۵۲۰۰	۱۷۳۱۲	۱۹۳۸۰	۲۱۶۴۱



شکل (۱۰): المنت مقاومتی پیشنهادی



شکل (۱۱): بانک بار مقاومتی ساخته شده



شکل (۱۲): تست و راه اندازی دستگاه

شکل (۱۳): دیزل ژنراتور ۲۵ کیلو ولت آمپر استفاده شده در آزمایش تست بار مقاومتی

آخرین تحقیقات انتشار یافته در سال ۲۰۲۳ در راستای بانک بارها به منظور کنترل عملکرد دیزل ژنراتورهای اضطراری [۱۲، ۱۴، ۱۹] نشان می‌دهند که نوسازی عملیات بانک بار در تنظیمات صنعتی نیاز به ارائه یک راه حل عملی دارد و همچنین برای تحویل بار کنترل شده به ژنراتورهای دیزلی به منظور جلوگیری از انباشتگی رطوبت ژنراتور نیاز به تنظیم پارامترهای فیزیکی است. مقایسه نتایج تست‌های صورت گرفته در تحقیق جاری با نتایج پژوهش‌های اخیر، حاکی از آنست که فرمت مقادیر الکتریکی ثبت شده برای نمایش گرافیکی، تجزیه و تحلیل کیفیت منبع تغذیه و همچنین پایداری سیستم تحت سناریوهای بار مختلف تطبیق داده شده است و نشان می‌دهند که بانک‌های بار با نیازهای متغیر سازگاری دارند و بدین ترتیب بانک‌های بار را با تقاضاهای در حال تحول دینفعان صنعت همسو می‌نماید.



۴- نتیجه

علاوه بر تستی که بلافاصله پس از نصب ژنراتور باید انجام گردد، انجام آزمایش‌های منظم به عنوان بخشی از برنامه تعمیر و نگهداری دیزل ژنراتورها ضروری است. این امر مخصوصاً برای تامین منابع اضطراری که ممکن است در یک دوره طولانی مورد بهره‌برداری قرار نگیرند، مهم است. در این تحقیق نمونه آزمایشگاهی بارمقاومتی جهت تست دیزل ژنراتورهای پالایشگاه سوم پارس جنوبی با روش کنترل زاویه آتش تریستورهای قدرت ساخته و بر روی یک دیزل ژنراتور ۲۵ کیلوولت آمپر تست شد. دستگاه موفق به ثبت و نمایش مقادیر ولتاژ و جریان و توان ظاهری و توان اکتیو و فركانس در فواصل زمانی مشخص و پایدار مطابق جدول ۱ گردید. با توجه به اهمیت و کاربردهای زیاد بانک بارهای جریان متناوب و جریان مستقیم در صنعت از جمله در تست و راه‌اندازی دیزل ژنراتورها و همچنین در منابع تغذیه بدون وقفه برای تست باتری‌ها و از آنجاییکه بانک بار با روش توضیح داده شده در پژوهش جاری تاکنون در کشور ساخته نشده است، پیشنهاد همکاری دانشگاه و صنعت در ارتقاء نمونه آزمایشگاهی ساخته شده و تبدیل آن به نمونه صنعتی داده می‌شود.

مراجع

- vol. 6, pp. 41458-41489, 2018. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2838563.
- [12] M. Rosić and M. Bjekić, "Load Bank System Modification for Appropriate Diesel Generator Testing by Programmable Resistive Load," *International Journal of Electrical Engineering and Computing*, vol. 7, pp. 1-8, 2023. DOI: <https://doi.org/10.7251/IJEEC2301001R>.
- [13] N. Prapurt and C. Lothongkam, "Design and Development of the 20 kW Load Bank Set for Performance Testing of Standby Generators," in *2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2022, pp. 1-5. DOI:10.1109/ICEMS56177.2022.9982929.
- [14] R. Knuts, "Improvement Suggestions for a Load Bank Control System," 2023.
- [15] M. Adamski, A. Barkalov, and M. Wegrzyn, "Design of digital systems and devices," vol. 79: Springer Science & Business Media, 2011.
- [16] V. M. Cardenas, "Digital control in power electronics," in *2006 IEEE International Power Electronics Congress*, 2006, pp. xii-xii. DOI: 10.1109/CIEP.2006.312139.
- [17] S. Buso and P. Mattavelli, *Digital control in power electronics*: Morgan & Claypool Publishers, 2015.
- [18] A. Jackson, N. Pallo, R. S. Bayliss, and R. C. Pilawa-Podgurski, "A Modular Multi-Phase Actively Controlled Resistive Load Bank with Zero-Current Switching Capability and Integrated Snubbers," in *2021 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, 2021, pp. 1-6. DOI:10.1109/PECI51586.2021.9435213.
- [19] R. Raj, T. Vishnukumar, and R. Murugan, "Automating Load Banks for Enhanced Testing Efficiency," in *2023 3rd International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET)*, 2023, pp.01-05, DOI:10.1109/ICEFEET59656.2023.10452182.
- [۱] کامینز، پاور، راهنمای دیزل ژنراتور، چشم‌ارو، ترجمه میثم، قدیری، ویراسته فاطمه، چاپ اول، ۷۴۰۷-۲-۶۰۰-۹۷۸، گروه توسعه صنعتی اطلس کامپیوتر، انتشارات مترجم، ۱۳۹۶.
- [۲] اترپلا، ایندوس، سرویس‌های دوره‌ای دیزل ژنراتورها، نجیمی، ترجمه حسن، انتشارات مترجم، ۱۳۹۶.
- [۳] خوش باطن، محمد، مرجع کامل میکروکنترلرهای ARM به زبان C سری ۱۷LPC، ویراست دوم، ۷۷۲۴۶۳۷-۹۷۸۶۰۰، انتشارات نیاز دانش، ۱۳۹۵.
- [۴] مارتی، براون، اصول و راهنمای منبع تغذیه سوئیچینگ، نیکخواه، ترجمه مهدی، ۷، ۹۷۸۹۶۴۸۳۸۴۱۰۹، انتشارات شایگان تهران، ۱۳۹۲.
- [۵] اوپنهایم، آلن، ویلسکی، آلن، نواب، حمید، آفت سیگنال سیستم، چاپ اول، ۲۳۰-۹۷۸۹۳۳۲۵۵، انتشارات کتابیران، ۱۳۹۵.
- [۶] رشید، محمد، الکترونیک قدرت مدارها، عناصر و کاربردها، افجه‌ای، ترجمه سیدابراهیم، مهاجر، ترجمه مجید، چاپ اول، ۹۷۸۶۰۰۶۴۸۱۹۲۰، انتشارات نیاز دانش، ۱۳۹۳.
- [۷] موهان، ند، آندلند، تورام، رابینز، ویلیام پی، الکترونیک قدرت، سلطانی، ترجمه جعفر، رستگار فاطمی، ترجمه محمد جلال، ابجدی ترجمه نوید رضا، چاپ دوم، ۹۷۸۶۰۰۶۴۸۱۶۶۱، انتشارات نیاز دانش، ۱۳۹۴.
- [8] H. J. Sira-Ramirez and R. Silva-Ortigoza, *Control design techniques in power electronics devices*: Springer Science & Business Media, 2006.
- [9] V. V. Das, *Advances in Power Electronics and Instrumentation Engineering Second*: Springer, 2011. Part of the book series: Communications in Computer and Information Science (CCIS, volume 148).
- [10] O. I. Specification, "Object management group," Needham, MA, USA, vol. 2, 2006.
- [11] M. N. I. Sarkar, L. G. Meegahapola, and M. Datta, "Reactive power management in renewable rich power grids: A review of grid-codes, renewable generators, support devices, control strategies and optimization algorithms," *IEEE Access*,



A survey on intrinsic motivation models in machine learning

Saeed Jamali¹, Saeed Setayeshi^{2*}, Mohsen Jahanshahi³, Sajjad Taghvaei⁴

¹ Department of Computer Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Saeed.Jamali.eng@iauctb.ac.ir

² Department of Medical Radiation Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Setayeshi@aut.ac.ir

³ Department of Computer Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

mjahanshahi@iauctb.ac.ir

⁴ Department of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

sj.Taghvaei@shirazu.ac.ir

Abstract: Intrinsic motivation has garnered significant attention in recent years, empowering both living beings and robots to learn autonomously and cumulatively, even without extrinsic motivation (rewards from the environment). This concept, drawing inspiration from psychology and neuroscience, has opened up new avenues in artificial intelligence. Algorithmic architectures for intrinsic motivation facilitate exploration and the effective acquisition of motor skills in scenarios where environment rewards are sparse or absent. This is particularly relevant for many real-world problems, where large portions of the environment offer no explicit rewards. Consequently, intrinsic motivation holds not only theoretical significance for enhancing artificial intelligence algorithms, particularly in exploration tasks, but also practical implications for real-world or near-real-world applications. In this paper, we delve into the significance of intrinsic motivation, providing a brief overview of its origins in psychology. We then systematically categorize and examine research on intrinsic motivation in artificial intelligence. Additionally, we discuss the reinforcement learning method as a successful approach for incorporating intrinsic motivation. Finally, we explore the practical applications, limitations, and future intrinsic motivation research.

Keywords: Cognitive science, Intrinsic motivation, Machine learning, Reinforcement learning, Sparse environment, Search

JCDSA, Vol. 2, No. 4, Winter 2025

Received: 2024-07-02

Online ISSN: 2981-1295

Accepted: 2024-12-14

Journal Homepage: <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa>

Published: 2025-03-20

CITATION

Jamali, S., Setayeshi, S., Jahanshahi, M., Taghvaei, S., " A survey on intrinsic motivation models in machine learning", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 2, No. 4, pp. 24-53, 2025.
DOI: 00.00000/0000

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

1- Introduction

Intrinsic motivation is a foundational concept in the realm of artificial intelligence, inspired by human cognition and behavioral sciences. Unlike extrinsic motivation, which relies on explicit rewards from the environment, intrinsic motivation propels agents to engage in exploration and learning for the sake of curiosity and novelty. This quality is particularly crucial in environments where external rewards are sparse or non-existent, challenging traditional artificial intelligence models to learn effectively. Recent developments have incorporated intrinsic motivation into machine learning, aiming to enhance adaptability and autonomous problem-solving. This paper aims to delve into the role of intrinsic motivation within artificial intelligence, tracing its origins, evaluating existing models, and discussing its practical implications. Furthermore, intrinsic motivation facilitates continuous learning and adaptation, allowing agents to refine their decision-making capabilities autonomously. This approach is increasingly being explored in unsupervised and reinforcement learning scenarios to stimulate exploratory behavior that leads to better generalization and task performance. The integration of such models has potential applications across a range of fields, including robotics, complex system navigation, and cognitive modeling.

Of course, examining the position of intrinsic motivation in psychology and intrinsic motivation in reinforcement learning is also among the objectives of this review paper. The structure of this paper is as follows: In Section 2, we show that motivation is a response to the question of why behavior occurs. Section 3 discusses the different types of motivation. Next, the position of intrinsic motivation in psychology and various related theories are reviewed in Section 4. In Section 5, the diverse research in this field is categorized, and each study is analyzed and evaluated. Given the importance and effective performance of reinforcement learning algorithms in intrinsic motivation, Section 6 introduces this method and the intrinsic motivation in reinforcement learning algorithm. Section 7 examines the limitations, applications, and future work in this domain. Finally, the conclusion is presented in Section 8.

2- Methodology

The methodology section provides an in-depth examination of how intrinsic motivation is modeled and implemented in artificial intelligence systems. This involves categorizing existing algorithmic frameworks that simulate intrinsic motivation through predictive models, curiosity-driven mechanisms, and novelty-based exploration strategies. Key methodologies include the use of self-supervised learning techniques, which enable agents to build internal representations of their environment and use prediction errors as intrinsic rewards. The research also reviews various computational approaches such as reinforcement learning algorithms

embedded with intrinsic motivation. These algorithms use auxiliary tasks and prediction models to drive learning, even in the absence of external feedback. The evaluation focuses on the impact of these models on learning efficiency, task performance, and scalability. Theoretical concepts are combined with empirical results to illustrate how these models contribute to more effective exploratory strategies.

3- Results and discussion

Our findings indicate that intrinsic motivation significantly enhances exploratory learning, particularly in tasks where external rewards are infrequent or sparse. Through experiments involving various intrinsic motivation frameworks, we observed marked improvements in task performance and learning rates when compared to models driven solely by extrinsic rewards. For instance, models utilizing novelty detection and prediction error as intrinsic signals demonstrated superior adaptation capabilities in complex and unfamiliar environments.

The discussion extends to compare intrinsic and extrinsic motivation models, noting that while intrinsic motivation fosters better initial exploration, it may require balanced integration with external incentives for optimal task completion. Challenges such as computational overhead and fine-tuning for real-world applications are also addressed. The results underscore the practical implications of applying intrinsic motivation in artificial intelligence, particularly in fields that require adaptability and independent learning, such as autonomous robotics and cognitive simulations.

4- Conclusion

The integration of intrinsic motivation into artificial intelligence systems has proven to be a powerful tool for fostering exploration and learning in environments where explicit guidance is minimal. This paper has highlighted the key methodologies and impacts of intrinsic motivation in enhancing machine learning models. While promising, the approach still faces challenges, including the computational cost of training and ensuring alignment with specific task goals. Future research should aim to develop more efficient and scalable models, as well as explore how intrinsic and extrinsic motivations can be effectively balanced to enhance performance in real-world scenarios.

The potential applications of intrinsic motivation span from robotics to interactive systems, signaling a promising frontier for adaptive and human-like learning processes in artificial intelligence. By addressing current limitations and focusing on advancements in algorithm design and computational efficiency, intrinsic motivation can continue to shape the evolution of artificial intelligence, making it more robust, adaptable, and capable of learning autonomously.





مروری بر مدل های انگیزش درونی یادگیری ماشین

سعید جمالی^۱، سعید ستایشی^{۲*}، محسن جهانشاهی^۳، سجاد تقوایی^۴

۱- گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
(Saeed.Jamali.eng@iauctb.ac.ir)

۲- دانشکده مهندسی فیزیک و انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران (Setayesh@aut.ac.ir)

۳- گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
(m.Jahanshahi@iauctb.ac.ir)

۴- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران (sj.Taghvaei@shirazu.ac.ir)

چکیده: امروزه انگیزش، توجه فزاینده ای را به خود جلب کرده است؛ زیرا که به موجود زنده و ربات اجازه می دهد در فقدان راهنمایی انگیزش بیرونی (پاداش از محیط)، دانش و مهارت را به صورت تجمعی و کاملاً خودمختار اخذ نماید. علاوه بر روان شناسی و علوم اعصاب، این مدل ها چشم انداز جدیدی را در هوش مصنوعی ایجاد کرده اند. معماری های الگوریتمی انگیزش درونی در اکتشاف، امکان اخذ مهارت های حرکتی مؤثری را در مسائل به وجود می آورند. از طرفی بسیاری از مسائل دنیای واقعی دارای چنین خصوصیتی هستند که در بخش های زیادی از محیط، پاداشی از محیط وجود ندارد. در نتیجه، این موضوع نه تنها از لحاظ نظری اهمیت بسزایی در بهبود الگوریتم های هوش مصنوعی مخصوصاً در بحث اکتشاف دارد، بلکه به لحاظ کاربردی و عملی نیز می تواند در کاربردهای واقعی و یا نزدیک به واقعیت مورد استفاده قرار گیرد. این مقاله به اهمیت انگیزش درونی پرداخته و نگاه کوتاهی به جایگاه آن در روان شناسی دارد. سپس تحقیقات پیرامون انگیزش درونی در هوش مصنوعی دسته بندی شده و مورد بررسی قرار گرفته اند. همچنین، روش یادگیری تقویتی به عنوان رویکردی موفق در ترکیب انگیزش درونی بررسی شده است. در نهایت، به برخی از کاربردهای عملی انگیزش درونی، محدودیت ها و تحقیقات آینده اشاره شده است.

واژه های کلیدی: علوم شناختی، انگیزش درونی، یادگیری ماشین، یادگیری تقویتی، محیط های خلوت (اسپارس)، جستجو

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: مروری

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۳

۱- مقدمه

(رشدی) حوزه ی علمی است که به مطالعه مکانیزم ها، معماری و محدودیت هایی می پردازد که اجازه می دهد یادگیری مهارت های جدید و دانش در ماشین های مجسم به صورت مادام العمر و بی پایان صورت گیرد [۴،۵]. این موضوع باعث می شود تا قابلیت های بهبود ادراکی، استدلال، برنامه ریزی، اجتماعی، استخراج دانش و مهارت های تصمیم گیری در ماشین های مجسم به وجود آید [۶]. علم پایه ای برای رباتیک شناختی توسعه ای از درک و دریافت ما از فرایند رشد کودک نشئت می گیرد. این رشد با توسعه نگاشت حسی - حرکتی جنینی در رحم آغاز شده و از طریق نمایش بدن، توسعه مهارت های حرکتی و ادراک فضایی به سمت توسعه رفتارهای اجتماعی پیشرفت کرده است. در نتیجه، یک برنامه توسعه ای تعاملات بلادرنگ را با محیط داخلی و خارجی خود به وسیله استفاده از حسگرها و اثرگذارهایش برقرار می کند. در کودکان، پیشرفت تجمعی و تدریجی باعث افزایش پیچیدگی می شود [۴]. این یادگیری خود راهبر، ریشه در انگیزش درونی^۲ (ذاتی، اندرونی) دارد. انگیزش

شناخت به وسیله یک موجود زنده عموماً به توانمندی آن برای پردازش اطلاعات ادراکی و متعاقب آن دست کاری رفتارش معنا می یابد. شناخت انسان شامل یک مجموعه ی بزرگ از فرایندهای موجود در ذهن انسان است. توانایی شناختی انسان ها به طور کلی در خودآگاهی، ادراک، یادگیری، دانش، استدلال، برنامه ریزی و تصمیم گیری ظاهر می شود [۱]. در کنار هم قرار دادن همه این توانمندی ها در یک عامل مصنوعی یا یک ربات یکی از بزرگ ترین چالش های عصر حاضر است. رویکردهای مختلف به این موضوع، تحت عنوان «رشد ذهنی خودمختار» معرفی شده اند که حوزه های تحقیقاتی آن دو هدف اصلی را دنبال می کنند: الف) بهبود توانایی سیستم های مصنوعی ب) پیشرفت درک ما از ریشه های اساسی هوش در سیستم های طبیعی [۲]. منظور از هوش، توسعه خودمختار و یادگیری مادام العمر و بی پایان است [۳]. در نتیجه رباتیک توسعه ای

* نویسنده مسئول

² Intrinsic motivation (IM)



مشوق‌های محیطی‌ای هستند که باعث می‌شوند فرد به انجام عمل خاصی روی آورده یا از آن اجتناب کند. مشوق‌ها قبل از رفتار واقع می‌شوند. آن‌ها عاملی هستند که فرد را به سمت رویدادهای بیرونی که حاصل آن تجربیات خوشایند است، می‌کشاند یا او را از رویدادهای بیرونی که باعث تجربیات ناخوشایند می‌شوند، دور می‌کنند [۷].

۳- انگیزش بیرونی و درونی

تجربه به ما یاد داده است که دو راه برای لذت‌بردن از یک فعالیت وجود دارد: به‌صورت درونی یا بیرونی. در واقع، هر فعالیتی را می‌توان با انگیزش درونی یا انگیزش بیرونی یا ترکیبی از هر دو انجام داد [۲۱]. انگیزش بیرونی از علت محیطی برای آغاز کردن یک عمل ناشی می‌شود. انگیزش بیرونی برای هدایت یادگیری رفتارهایی استفاده می‌شود که مرتبط با نیازهای اولیه موجود زنده باشد. منظور از نیازهای اولیه، نیازهایی است که در ارتباط با بقا و تولیدمثل است [۲۲]. رویدادهای محیطی تاندازه‌ای انگیزش بیرونی به وجود می‌آورند که وابستگی «وسیله برای هدف» را در ذهن فرد ایجاد کنند که به‌موجب آن، وسیله، رفتار است و هدف پیامدی جالب است. بررسی انگیزش بیرونی بر سه مفهوم مهم مشوق‌ها، تقویت‌کننده‌ها (مثبت و منفی) و تنبیه‌کننده‌ها استوار است [۷]. از طرفی انگیزش درونی، گرایش فطری پرداختن به تمایلات و به‌کاربردن توانایی‌ها و جستجوکردن چالش‌های بهینه و تسلط یافتن بر آن‌ها در انجام کار است [۲۳]. انگیزش درونی به طور خودانگیخته از نیازهای روان‌شناختی، کنجکاوی و تلاش‌های فطری برای رشد، حاصل می‌شود. البته باید اشاره نمود، تمایزی سخت و سریع بین سیگنال پاداش درونی^{۱۰} و بیرونی وجود ندارد [۲۲]. انگیزش درونی از احساس شایسته بودن و خودمختار بودن در حین انجام‌دادن یک فعالیت، حاصل می‌شود.

۴- انگیزش درونی در روان‌شناسی

ظرفیت یادگیری تجمعی خودمختاری که به‌وسیله ارگانسیم‌هایی همچون پستانداران به‌ویژه انسان‌ها نشان داده می‌شود، بسیار حیرت‌انگیز است. ریشه این ظرفیت در انگیزش درونی قرار دارد. انگیزشی که مستقیماً به پاداش‌های بیرونی از قبیل غذا یا روابط جنسی ارتباط مستقیمی ندارد، اما می‌توان گفت به چیزی که موجودات می‌دانند (کنجکاوی، تازگی، شگفتی) یا می‌توانند انجام دهند (شایستگی، توان) مرتبط است. روان‌شناسان برای انسان‌ها و حیوانات مدارکی یافتند که انگیزش درونی نقش مهمی در رفتار و یادگیری آن‌ها بازی می‌کند [۲۴]. قبل از بررسی تحقیقات اصلی انگیزش درونی در حوزه روان‌شناسی باید به دو نکته مهم توجه کرد: ابتدا اینکه هر محقق یا تیم‌های تحقیقاتی از زاویه دید خود به بررسی این حوزه پرداخته و از جنبه‌های مختلفی بدان پرداخته‌اند، لذا ما با تنوع دیدگاه و دسته‌بندی مواجه هستیم که

درونی به‌عنوان یک مکانیسم اساسی به‌گونه‌ای عمل می‌کند که یادگیری و اکتشاف انسان در محیط پیرامونش را هدایت کند. هدف اصلی این مقاله، مروری بر تحقیقات انگیزش درونی در حوزه هوش مصنوعی^۱ است. باتوجه به تنوع و حجم بالای کارهای تحقیقاتی، دسته‌بندی پیشنهادی برای انواع این تحقیقات نیز ارائه شده و سپس به بررسی ایده اصلی، مزایا و معایب و الگوریتم پایه مورداستفاده آن‌ها پرداخته شده است. البته بررسی جایگاه انگیزش درونی در روان‌شناسی و یادگیری تقویتی انگیزش درونی^۲ نیز از سایر اهداف این مقاله مروری است. ساختار این مقاله بدین صورت است که: در قسمت ۲، نشان می‌دهیم که انگیزش پاسخی به چرایی رفتار است. قسمت ۳، به انواع انگیزش می‌پردازد. سپس جایگاه انگیزش درونی در روان‌شناسی و نظریه‌های مختلف پیرامون آن در قسمت ۴ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در قسمت ۵ تحقیقات بسیار متنوع این حوزه دسته‌بندی شده و هر تحقیق مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به اهمیت و عملکرد مناسب الگوریتم یادگیری تقویتی^۳ در انگیزش درونی، قسمت ۶ به معرفی این روش و الگوریتم یادگیری تقویتی انگیزش درونی می‌پردازد. قسمت ۷ محدودیت‌ها، کاربردها و کارهای آینده در این حوزه را بررسی می‌کند. نهایتاً نتیجه‌گیری در قسمت ۸ ارائه شده است.

۲- رفتار و انگیزش

فصل مشترک و زیربنای علوم‌شناختی، هوش مصنوعی و رباتیک را می‌توان در بررسی چرایی به‌وجود آمدن رفتار خلاصه نمود. پاسخ به دو سؤال کلیدی می‌تواند در درک ما از رفتار بسیار کمک‌کننده باشد. چه چیزی موجب رفتار می‌شود؟ و چرا شدت رفتار تغییر می‌کند؟ [۷] پاسخ این سؤالات در انگیزش نهفته است. انگیزش یک ساختار روانی یکپارچه مبتنی بر سیستم پیچیده است که فرد را به انجام انواع فعالیت‌ها ترغیب می‌کند و به شیوه خاصی بر رفتار انسان تأثیر می‌گذارد [۲۷]. انگیزش، در طول زمان نوسان داشته و با تغییر آن، رفتار نیز تغییر می‌کند [۷]. انگیزش حالت مجزا یا ثابتی نیست، بلکه فرایندی پویا بوده و همیشه تغییر می‌کند. شماری از نظریه‌پردازان انگیزش معتقدند که انگیزش انواع مختلفی دارد [۸]. برای مثال انگیزش بیرونی^۴ با انگیزش درونی تفاوت دارد [۹]. نظریه‌های مختلف و متنوعی پیرامون انگیزش ارائه شده است، از جمله آن‌ها می‌توان به گزینه [۱۰]، سابق^۵ [۱۱، ۱۲]، انگیزش پیشرفت [۱۳]، ناهمگونی شناختی^۶ [۱۴]، انگیزش کارایی [۱۵]، غوطه‌وری (جریان)^۷ [۱۶]، تعیین هدف [۱۷]، درماندگی آموخته شده^۸ [۱۸]، احساس کارایی [۱۹] و طرح‌واره خویشتن^۹ [۲۰] اشاره کرد.

نیازها، شناخت‌ها، و هیجان‌ها تجربیات درونی‌ای هستند که انگیزه می‌تواند از آن‌ها نشئت بگیرد. انگیزش رفتار را نیرومند و هدایت می‌کند. از طرفی رویدادهای بیرونی نیز چنین توانایی را دارند. آن‌ها در نقش

⁶ Cognitive dissonance

⁷ Flow

⁸ Learned helplessness

⁹ Self-schemas

¹⁰ Intrinsic reward (IR)

¹ Artificial intelligence (AI)

² Intrinsically motivated reinforcement learning (IMRL)

³ Reinforcement learning (RL)

⁴ Extrinsic motivation (EM)

⁵ Drive



طبقه‌بندی این پژوهش‌ها خود از موضوعات باز تحقیقاتی است. نکته دیگر اینکه در کنار بررسی این حوزه، به زاویه دید محققان حوزه هوش مصنوعی توجه شده است، چرا که این دیدگاه‌ها پایه و اساس مدل‌های پیشنهادی محاسباتی خواهد بود که در بخش بعدی مورد کنکاش قرار می‌گیرد. بر اساس دیدگاه دسی^۱ و ریان^۲ انگیزش درونی به معنای انجام فعالیتی برای رضایت ذاتی است و نه نتایجی جدا [۹]. وقتی فردی به‌صورت درونی انگیزه‌مند می‌شود، اعمالی را برای سرگرم‌شدن یا غلبه بر چالش انجام می‌دهد و نه برای به‌دست‌آوردن محصولات، فشارها و پاداش خارجی. این موضوع در کودکان با تلاش برای گرفتن، پرتاب‌کردن، گازگرفتن و له کردن اشیای جدید به‌وضوح قابل‌مشاهده است. حتی در بزرگسالان با تلاش برای حل جدول، خواندن رمان، دیدن

فیلم یا نقاشی کشیدن نیز کاملاً مشهود است [۲۵]. برای درک بهتر این موضوع باید تفاوت انگیزش درونی را با انگیزش بیرونی موردتوجه قرار داد. انگیزش بیرونی ساختاری است که هر زمان فعالیتی انجام می‌شود به‌منظور دستیابی به نتایجی جداگانه صورت می‌گیرد اما انگیزش درونی اشاره به انجام فعالیت به صورتی ساده برای لذت‌بردن از فعالیت خود، به‌جای ارزش‌های ابزاری، دارد [۹]. روان‌شناسان تلاش کرده‌اند درباره اینکه چه ویژگی‌هایی از فعالیت‌ها برای برخی مردم (نه همه مردم) در برخی زمان‌ها، انگیزش درونی تولید می‌کند، تئوری‌هایی ارائه دهند. آن‌ها مطالعاتی درباره چگونگی پیاده‌سازی عملکردی در یک ارگانیسم و به طور خاص انسان‌ها انجام داده‌اند. در جدول (۱) مهم‌ترین دیدگاه‌ها در مورد انگیزش درونی به همراه توضیحات مختصری آورده شده است.

جدول (۱): برخی از نظریه‌های مختلف انگیزش درونی

دیدگاه	مفهوم	توضیحات
سابق‌هایی برای دست‌کاری و اکتشاف	برای تطبیق نظریه هال ^۳ بر پدیده‌هایی از قبیل حل پازل مکانیکی توسط میمون‌های ریزوس ^۴ بدون دریافت پاداش، این مفاهیم ایجاد شد [۲۵].	نظریه هال: رفتار حیوانات به‌وسیله سابق‌هایی (مانند تشنگی و گرسنگی) تحریک می‌شود که به‌عنوان نقص فیزیولوژیکی موقتی محسوب شده و ارگانیسم به‌منظور دستیابی به تعادل حیاتی، برای کاهش آن تلاش می‌کند [۲۵].
کاهش ناهمگونی شناختی	ارگانیسم‌ها برای کاهش ناهمگونی شناختی انگیزه‌مند می‌شوند [۲۵].	ناهمگونی بین ساختارهای شناختی داخلی و شرایطی که در حال حاضر دریافت می‌کند. جستجوی شکل‌هایی از بهینگی بین شرایط کاملاً نامعلوم و شرایط کاملاً معلوم [۲۵].
ناسازگاری بهینه	انسان در جستجوی ناسازگاری بهینه است [۲۵].	محرك‌هایی جالب‌توجه هستند که بین سطح درک شده و سطح استاندارد اختلافی وجود داشته باشد [۲۵] (پریاداش‌ترین شرایط: وجود سطح متوسطی از تازگی).
شایستگی، خودمختاری، ارتباط	بر اساس نظریه خود تصمیم‌گیری: سه نیاز مرکزی انسان‌ها شامل: احساس‌های شایستگی، خودمختاری و ارتباطات اجتماعی [۲۱] است.	خودمختار: تمایلات، ترجیحات، خواسته‌ها و فرایند تصمیم‌گیری را برای انجام‌دادن یا انجام‌ندادن فعالیتی خاص، هدایت کند. شایستگی: نیازمند مؤثربودن در تعامل با محیط که بیانگر میل به‌کاربردن استعدادها و مهارت‌ها بوده و دنبال حل‌کردن چالش‌های بهینه و تسلط یافتن بر آن‌ها است. ارتباط: نیاز به برقراری پیوندها و دلبستگی‌های عاطفی با دیگران است [۷].
کنجکاوی، تازگی و علاقه	انسان‌ها رفتار را بر اساس کنجکاوی که احساس علاقه را از طریق ارزیابی تازگی - پیچیدگی و قابلیت فهم استنباط شده تنظیم می‌کند، انجام می‌دهند [۲۶].	ایجاد علاقه‌مندی: موضوع تازه و/یا به‌اندازه کافی پیچیده تا باعث کنجکاوی شود، اما نه اینکه به طور غیرقابل‌فهم تازه و پیچیده باشد [۲۶]. کنجکاوی در زمینه‌های متنوعی مورداستفاده قرار می‌گیرد درحالی‌که علاقه، مشغول‌شدن به یک حوزه خاص است [۲۹].
غوطه‌وری	مردم به فعالیت‌های چالش‌برانگیزی جذب می‌شوند که نه خیلی آسان و نه خیلی سخت باشند [۲۸].	غوطه‌وری: شامل زیرمؤلفه‌های کشف، نقش‌گذاری ^۵ ، شخصی‌سازی و گریزگری ^۶ [۲۶] اثرات غوطه‌وری می‌تواند دارای سطوح مختلفی باشد [۳۰].
سلطه	انگیزش، برداری پنج‌بعدی است: دستاورد، اکتشاف، معاشرت‌پذیری، غوطه‌وری و سلطه [۲۶].	تنها مؤلفه جدید نسبت به نظریه خود تصمیم‌گیری، سلطه است [۲۶]. همپوشانی جزئی با خودمختاری نظریه خود تصمیم‌گیری (خودمختاری: تحت تسلط دیگران نبودن اما نه به معنی نفوذ به دیگران) [۲۶]
دانش، شایستگی	سیستم‌های IM مبتنی بر دانش (ظرفیت پیش‌بینی) یا مبتنی بر شایستگی (ظرفیت انجام کار) هستند.	مبتنی بر دانش: به‌کارگیری معیارهایی مرتبط با پتانسیل سیستم و مدل‌سازی محیط مبتنی بر شایستگی: بهره‌برداری از معیارهایی مرتبط با توانایی سیستم در داشتن اثرات خاص بر روی محیط [۳۱].
تنظیم هدف	تلاش افراد برای رسیدن به اهداف: متمرکزکردن توجه افراد بر ناهمخوانی سطح موجود دستاورد، با سطح ایده‌آل دستاورد او [۳۴].	هدف: هر چیزی که فرد سعی دارد به آن برسد [۱۷]. هدف‌ها همیشه عملکرد را افزایش نمی‌دهند، فقط هدف‌های دشوار و روشن عملکرد را افزایش می‌دهند [۷]. اهداف آسان و مبهم، انگیزش تولید نمی‌کنند [۳۴].

⁴ Rhesus monkey

⁵ Role-playing

⁶ Escapism

¹ Deci

² Ryan

³ Hull



۵- انگیزش درونی در هوش مصنوعی

به طور خلاصه می‌توان گفت، اکتشاف آنچه شما را غافلگیر می‌کند. علی‌رغم دشواری هماهنگی سیگنال‌های IR و پاداش بیرونی با محیط-های داخلی و خارجی موجود زنده، محیط داخلی می‌تواند نقش بزرگ‌تر و یا حداقل نقش متفاوتی در تولید سیگنال‌های پاداش مرتبط با انگیزش درونی را بازی کند [۲۲]. به‌عنوان مثال، یک محرک برجسته‌ی خارجی ممکن است پاداشی را به میزان غیرمنتظره‌ای تولید کند، درحالی‌که انتظارات به وسیله‌ی فرایندهایی در محیط داخلی و اطلاعات ذخیره شده آن، ارزیابی می‌شوند. تازگی، غافلگیری، ناسازگاری و سایر ویژگی‌هایی که بر پایه انگیزش درونی فرض شده‌اند، همگی بستگی به چیزی که تاکنون عامل یاد گرفته و تجربه کرده است، دارند یعنی، خاطرات، باورها و وضعیت دانش داخلی که همه آن‌ها اجزای وضعیت محیط داخلی موجود زنده هستند. در نتیجه باید اشاره کرد، تمایز واضحی بین انواع سیگنال‌های پاداش نمی‌باشد: به‌جای آن، بازه‌ای پیوستار از کاملاً بیرونی به کاملاً درونی وجود دارد [۲۲]. محققان حوزه هوش مصنوعی و رباتیک تلاش کرده‌اند تا نظریه‌های معمول در روان‌شناسی را در قالب مدل‌های محاسباتی به حوزه خود وارد کرده و از آن‌ها بهره ببرند.

مدل‌های محاسباتی زیادی تاکنون ارائه شده‌اند که پژوهشگران سعی کرده‌اند تا از جنبه‌های مختلفی این مدل‌ها را دسته‌بندی نمایند. در این مقاله، هفت دسته مختلف برای طبقه‌بندی تحقیقات پیشنهاد شده است که عبارت‌اند از: (۱) مدل‌های مبتنی بر دانش (۲) مدل‌های مبتنی بر شایستگی (۳) تازگی (نوآوری) (۴) توانمندسازی، قدرت و کنترل (۵) تنهایی، وابستگی اجتماعی (۶) هدف (۷) غافلگیری، کنجکاوی، (عدم) قطعیت. البته باید خاطر نشان کرد که این دسته‌بندی‌ها از لحاظ مفهومی، همپوشانی‌هایی با هم دارند و نمی‌شود مرز بسیار دقیق بین آن‌ها کشید. بعلاوه یک کار تحقیقاتی می‌تواند به بیش از یک دسته اختصاص داده شود، منتها در این مقاله مروری سعی شده است که هر تحقیق در دسته-ای قرار گیرد که بیشترین شباهت را به آن داشته و علاوه بر آن، بیان و دیدگاه و تلقی نویسندگان مقاله به آن دسته‌بندی انگیزش درونی خاص نزدیک‌تر باشد. باید توجه داشت توسعه انگیزش درونی در هوش مصنوعی از طریق چندین نقطه عطف مهم پیشرفت کرده است. در شکل (۱) خلاصه‌ای از تحقیقات کلیدی و پیشرفت‌های این حوزه، همراه با منابع، ارائه شده است.

جدول ۲: مدل‌های محاسباتی IM مبتنی بر دانش

سال انتشار و مرجع	ایده اصلی	مزایا	معایب/چالش‌ها	روش یا الگوریتم
۲۰۱۸ [۵۱]	ارائه سیستمی که ترکیبی از تکنیک‌های برنامه‌نویسی منطقی قیاسی با اکتشاف خودکار مفاهیم و RL با IM به‌منظور کشف مفاهیم، وضعیت‌ها و اقدامات جدید و سیاست رفتاری برای حل مسائل	کشف خودکار مفاهیم، یادگیری رفتارها با استفاده از مفاهیم کشف شده، امکان تغییر توصیف حالت در حین یادگیری، سیستم‌های هوش مصنوعی انعطاف‌پذیرتر و توانمندتر با	احتمال کشف مفاهیم اضافی و غیرضروری، کندی فرایند یادگیری با یادگیری مفاهیم و IM، نیاز به طراحی روش‌های کارآمد برای فیلتر کردن مفاهیم غیرمرتبط	ترکیب تکنیک‌های برنامه‌نویسی منطقی قیاسی با اختراع مسند و RL با IM

¹ Synergy

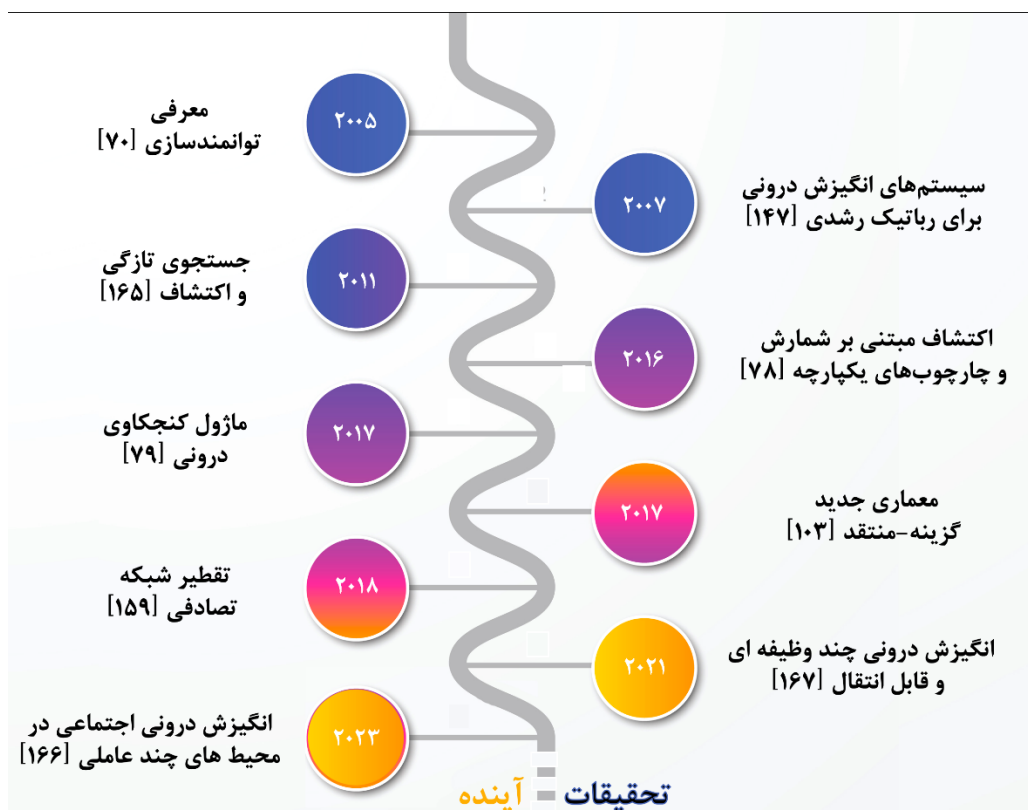
² Central pattern generators



		هدایت فرایند یادگیری توسط خود عامل	
۲۰۱۹ [۵۵]	روشی جدید برای آموزش دادن به یادگیرنده‌ها با IM برای کاوش در محیط. این روش بر به حداکثر رساندن کارایی کاوش تمرکز دارد و منجر به یادگیرنده‌هایی می‌شود که می‌توانند به طور کامل محیط را کاوش کرده و در عین حال زمان لازم برای دستیابی به آن کاوش را به حداقل برسانند.	کاوش کارآمدتر در مدت زمان کمتر و پوشش بخش بیشتری از محیط	طراحی اهداف جانشین مؤثر که به طور دقیق کارایی کاوش را به تصویر می‌کشند، نیاز به تحقیقات بیشتر برای تأیید اثربخشی آن در سناریوهای مختلف دنیای واقعی دارد.
۲۰۲۱ [۲۹]	بررسی IM در عامل مصنوعی به طوری که این عامل بدون نیاز به پاداش‌های بیرونی قادر به اکتشاف محیط خود و کسب مهارت‌های مفید باشند. هدف، یادگیری کلی و فشرده‌ای که عامل را به کاهش آنتروپی بازدهی‌های حالت‌های خود تشویق می‌کند.	توانایی عامل در اکتشاف و کنترل محیط‌های پیچیده و پویا بدون نیاز به پاداش‌های بیرونی، یادگیری رفتار پیچیده و کاهش عدم قطعیت	نیاز به تحقیقات بیشتر برای رسمی‌سازی ارتباط بین ترمودینامیک و نظریه اطلاعات و محدودیت‌های مدل‌های فضای حالت نهفته در مدل‌سازی صحیح باورها
۲۰۲۱ [۳۰]	ارائه روشی جدید برای کشف در RL آنلاین از طریق حداکثر کردن انحراف از مناطق کاوش شده با اضافه کردن یک تنظیم‌کننده تطبیقی به هدف استاندارد RL که تعادلی بین اکتشاف و بهره‌برداری از تجربیات ایجاد می‌کند.	بهبود کارایی نمونه‌ها، سازگاری با روش‌های مختلف یادگیری تقویتی، و اجرای آسان. بهبود عملکرد روش‌های پاداش UCB ^۱ سنتی بدون نیاز به محاسبات پیچیده	محدودیت در استفاده از نمایش‌های ساده حالت‌ها و نیاز به ارتقای برای استفاده از نمایش‌های فشرده‌تر. عملکرد پایین‌تر در محیط‌های با تغییرات غیرقابل پیش‌بینی
۲۰۲۲ [۳۵]	بررسی و ارائه روش‌های RL سلسله‌مراتبی برای توسعه مهارت‌های حل مسئله پیشرفته در عامل مصنوعی با الهام از مکانیسم‌های سلسله‌مراتبی مشاهده شده در حیوانات و انسان‌ها	بهبود توانایی حل مسئله با استفاده از یادگیری سلسله‌مراتبی، انتقال دانش از یک وظیفه به وظایف جدید و مشابه و توانایی برنامه‌ریزی تصمیم‌گیری در زمان واقعی	دشواری یکپارچه‌سازی مکانیسم‌های شناختی زیستی به یک معماری واحد، پیچیدگی محاسباتی و تحقق عملی این روش‌ها در عامل‌های مصنوعی
۲۰۲۲ [۴۶]	اهمیت استفاده از غیرمارکوفی بودن در بهینه‌سازی اکتشاف حداکثر آنتروپی حالت‌ها با وجود تعداد نمونه‌های محدود	بهبود کارایی نمونه‌ها در RL آنلاین و اکتشاف یکنواخت‌تری در فضای حالت در هر تجربه واحد	یافتن سیاست غیرمارکوفی بهینه برای حداکثر آنتروپی حالت نمونه محدود، به‌طور کلی مشکل NP-hard است.
۲۰۲۳ [۴۸]	معرفی یک تکنیک اکتشافی جدید به نام «حداکثرسازی آنتروپی حالت وابسته به ارزش». این تکنیک به طور جداگانه آنتروپی حالت را که بر اساس ارزش تخمین زده شده هر حالت است، محاسبه و سپس میانگین آنها را حداکثر می‌کند تا مشکل توزیع نامتوازن در روش‌های اکتشاف قبلی را حل کند.	تسریع آموزش الگوریتم‌های RL، بهبود کارایی نمونه‌گیری، و حل مشکل توزیع نامتوازن حالات بارزش بالا و پایین	نبود درک نظری کامل از نحوه عملکرد آنتروپی حالت وابسته به ارزش، محدودیت در استفاده از تخمین‌گر آنتروپی حالت غیرپارامتریک و نیاز به توسعه روشی که بدون نیاز به پاداش وظیفه فضاهای حالت را به زیر فضاهای معنادار تقسیم کند.
۲۰۲۳ [۴۹]	پیشنهاد الگوریتمی به نام حداکثرسازی آنتروپی محدود شده برای حل مشکلات اکتشاف ایمن بدون توجه به وظایف خاص. این الگوریتم با استفاده از یک تخمین‌گر آنتروپی K نزدیک‌ترین همسایه برای ارزیابی کارایی اکتشاف و به طور هم‌زمان کاهش هزینه‌های ایمنی، به یادگیری یک سیاست که آنتروپی حالت را تحت محدودیت‌های ایمنی حداکثر می‌کند، می‌پردازد.	دستیابی به یک سیاست اکتشافی ایمن در محیط‌های پیچیده، بهبود کارایی نمونه‌گیری برای وظایف هدف و ارائه یک روش عملی و تقریباً همگرا برای اکتشاف ایمن بدون توجه به وظایف خاص	پیچیدگی محاسباتی تخمین آنتروپی حالت در دامنه‌های پیچیده، چالش‌های ایجاد تعادل مناسب بین اکتشاف و ایمنی، و نیاز به تنظیم دقیق وزن‌های ایمنی در محیط‌های واقعی
۲۰۲۴ [۵۲]	ارائه سیستم یادگیری که می‌تواند با استفاده از مقدار کمی داده‌های دنیای واقعی، یک مدل شبیه‌سازی را بهبود بخشد و سپس یک استراتژی کنترل دقیق طراحی کند که در دنیای واقعی قابل اجرا باشد. این سیستم از طریق یک فرایند اکتشاف فعال در دنیای واقعی، داده‌های باکیفیت بالا جمع‌آوری کرده و از آنها برای شناسایی پارامترهای فیزیکی استفاده می‌کند.	نیاز به مقدار کمی داده‌های دنیای واقعی برای بهبود مدل شبیه‌سازی، امکان انتقال موفق از شبیه‌سازی به دنیای واقعی و کاهش نیاز به تنظیم دستی پارامترهای شبیه‌سازی	پیچیدگی فرایند شناسایی سیستم، نیاز به اجرای دقیق اکتشاف فعال و محدودیت در توانایی مدل شبیه‌سازی در بازسازی صحیح محیط‌های پیچیده

^۱ Upper Confidence Bound





شکل ۱: خلاصه‌ای از تحقیقات کلیدی و پیشرفت‌های انگیزش درونی به همراه منابع

۵-۱- مدل‌های مبتنی بر دانش

سیستم‌های IM مبتنی بر دانش (ظرفیت پیش‌بینی)، برای هدایت یادگیری بر اساس سطح یا تغییرات دانش مناسب هستند [۴۲]. بیشتر مدل‌های پیشنهادی IM مبتنی بر دانش هستند و به محرک دریافت شده به وسیله سیستم یادگیری وابسته هستند و نه به مهارت‌های سیستم. در مدل مبتنی بر دانش، جالب بودن به مقایسه بین جریان پیش‌بینی شده از مقدار حسگر حرکتی، بر اساس یک مدل داخلی درونی، با جریان واقعی مقدارها بدست می‌آید. چنانچه مدل آموخته شود، این مدل به طور خاص منجر به انگیزه سازگاری می‌شود (انگیزه سازگاران به مکانیزمی اشاره دارد که سطوح مختلفی از علاقه به یک موقعیت/فعالیت را با توجه به لحظه خاص رشد (توسعه) که در آن قرار می‌گیرد، تعیین می‌کند). اولین رویکرد محاسباتی به IM براساس معیارهای ناسازگاری (یا رزونانس^۱) بین وضعیت‌های تجربه شده با دانش و انتظارات ربات در مورد این شرایط، تعریف می‌شود. این امر به عنوان یک فعالیت فعال که در آن ربات اعمالی را انجام می‌دهد و خروجی واقعی اعمال خود را با دانش و انتظاراتش از نتیجه این اعمال مقایسه می‌کند

[۲۵]، محسوب می‌شود. از اولین تحقیقات می‌توان به مقالات اشمیدهور^۲ اشاره کرد [۴۳، ۴۴]. مبنای هر دو مقاله بر اساس کمینه کردن عدم قطعیت یا خطای عامل در پیش‌بینی اش می‌باشد. الگوریتم پایه هر دو روش بر اساس الگوریتم RL است. البته پیاده‌سازی پیچیده، نیاز به محاسبات زیاد و تنظیم پارامترها از چالش‌های این تحقیقات بود. روی^۳ و مک‌کالم^۴ رویکردی مبتنی بر بیزین برای یادگیری فعال بهینه با استفاده از تخمین مونت کارلو ارائه نمودند که با چالش نیاز به نمونه برداری دقیق از توزیع پسین بیزین مواجه بود [۴۵]. اودیرو^۵ با تمرکز روی مفهوم پیشرفت یادگیری، مکانیزمی به نام «کنجکاوی هوشمند و سازگار» معرفی کرد که محرکی درونی برای ربات ایجاد می‌کند تا بر روی موقعیت‌هایی تمرکز کند که پیشرفت یادگیری او را به حداکثر می‌رساند [۴۷]. او نیز ایده اش را بر روی الگوریتم RL پیاده‌سازی کرد. مریک^۶ و ماهر^۷ مدل محاسباتی انگیزش برای عامل یادگیری برای تحقق یادگیری چند وظیفه‌ای و سازگار در محیط‌های پیچیده و پویا معرفی کردند. این مدل برای وظایفی که نمی‌تواند به طور کامل قبل از یادگیری پیش‌بینی شود، با استفاده از الگوریتم‌های RL ارائه شد. البته مقیاس پذیری آن برای وظایف پیچیده تر و شکست در این شرایط به علت عدم

¹ Resonances

² Schmidhuber

³ Roy

⁴ McCallum

⁵ Oudeyer

⁶ Merrick

⁷ Maher

تضمین باقی ماندن در یک رویداد به اندازه کافی جالب، از چالش های اصلی این پژوهش می باشد. در جدول ۲ برخی از پژوهش های مرتبط اخیر با این بخش آورده شده است. علاوه بر ارائه ایده اصلی مقاله، مزایا، معایب یا چالش های پیش رو، روش یا الگوریتم پایه آن نیز آورده شده است.

۵-۲- مدل های مبتنی بر شایستگی

سیستم های انگیزش درونی مبتنی بر شایستگی (ظرفیت انجام کار) برای هدایت یادگیری بر اساس سطح یا بهبود شایستگی به کار برده می شوند [۵۶]. مدل های مبتنی بر شایستگی، سیستم های مصنوعی هستند که یادگیری آن ها به وسیله شکل های مختلفی از انگیزش درونی مبتنی بر شایستگی هدایت می شود. در مدل های مبتنی بر شایستگی، جالب بودن به مقایسه بین اهداف خودساخته (که پیکربندی های خاصی در فضای حسگر حرکتی هستند)، و میزانی که در عمل به آن بر اساس یک مدل معکوس داخلی که ممکن است آموخته شود، پرداخته می شود. بدین ترتیب، این مقایسه ها درجه عملکرد/شایستگی عامل را مشخص می کنند و اگر مدل نیز آموخته شود، به طور معمول منجر به انگیزه تطبیقی می شود. این رویکرد مستقیماً از تئوری های منطقی روانشناسی الهام گرفته شده است. این تئوری ها عبارتند از: تأثیرگذاری [۲۴]، علیت فردی [۳۲]، شایستگی، خودتصمیم گیری [۲۵] و غوطه وری [۳۳]. مرکز بحث در اینجا مفهوم «چالش» است. این مفهوم مرتبط با اندازه گیری دشواری به عنوان اندازه گیری بهره وری واقعی می باشد. «چالش» در اینجا هر پیکربندی حسگر حرکتی یا هر مجموعه از مشخصات حسگر حرکتی است که هر فرد خودش تنظیم کرده و تلاش می کند از طریق عمل به این هدف دست یابد.

بارتو^۱ و همکاران [۳۷] با ارائه چارچوبی برای یادگیری تقویتی انگیزش درونی یکی از اساسی ترین و پایه ای ترین چارچوب ها را ارائه کردند. ایده اصلی آن ها بررسی یادگیری مبتنی بر انگیزش درونی در عامل های مصنوعی است تا بتوانند سلسله مراتبی از مهارت های قابل استفاده مجدد را بسازند و توسعه دهند که برای خودمختاری مؤثر لازم است. آن ها با الهام از مفهوم انگیزش درونی در روان شناسی، معماری را ارائه کردند که عامل رفتارهایش را به خاطر خودش انجام می دهد، نه به عنوان گامی در حل مشکلات عملی. عامل های مصنوعی می توانند مهارت های قابل استفاده مجددی را یاد بگیرند که برای طیف وسیعی از چالش ها مفید هستند، بدون نیاز به تنظیم دستی برای هر وظیفه خاص. البته چارچوب پیشنهادی برای ایجاد IR پیچیده تر که بتواند انواع مختلفی از کاوش و دست کاری را پوشش دهند، کافی نبوده است.

در [۵۸] محققان تلاش کردند با استفاده از الگوریتم یادگیری تقویتی عامل - منتقد به همراه شبکه عصبی، یک مدل نوین یادگیری تقویتی انگیزش درونی را توسعه دهند که ربات ها قادر باشند به طور خودکار از IR استفاده کرده و مهارت های عمومی ساخته شده را به طور

خودکار ترکیب کرده تا وظایف خاص متعددی را حل کنند. انعطاف پذیری و خودکارسازی در کشف تقویت کننده های درونی، قابلیت استفاده در محیط های رباتیک واقعی و توانایی مقابله با محیط های پیوسته و نویزی، عملکرد و استحکام بهتر نسبت به سایر معماری های استاندارد از مزایای این تحقیق است. معرفی الگوریتم تولید هدف خودتنظیمی توسط بارانس^۲ و همکاران [۶۰] باعث شده است که فضای فعال یادگیری حرکتی هوشمند و قدرتمند به عنوان یک مکانیسم بررسی هدف برای ربات ها امکان یادگیری معکوس کینماتیکی را فراهم کند. همچنین امکان کاوش و یادگیری مهارت های پیچیده تر را فراهم می کند. چالشی که این الگوریتم با آن سروکار دارد مسئله مقیاس پذیری در محیط های حسگر - موتور متنوع است. ایده جالب دیگری که توسط هانگل^۳ و همکاران [۶۱] ارائه شده است، یادگیری مهارت های جدید توسط ربات ها با استفاده از بازی فعال و خلاقیت است که باعث می شود ربات بتواند مهارت های جدید را برای محیط های خاصی یاد بگیرد و از آن ها برای حل وظایف مشابه استفاده کند. این ایده با استفاده از ترکیب الگوریتم یادگیری تقویتی مبتنی بر مدل و بدون مدل پیاده سازی شده است. مشکل این روش، طولانی شدن زمان یادگیری در مواجهه با تعداد زیادی مهارت است که برای رفع آن نیاز به مدل های پیچیده تری است. در جدول ۳ سایر پژوهش های اخیر مرتبط شامل ایده اصلی مقاله، مزایا، معایب یا چالش های پیش رو و روش یا الگوریتم پایه آن ها نشان داده شده است.

۵-۳- تازگی (نوآوری)

تشخیص تازگی عامل مهمی برای کارکرد مؤثر و درازمدت ربات های هوشمند است که برای کشف، تکامل و تصمیم گیری بر اساس دانش و تجربیات تجمعی، طراحی شده است. تشخیص تازگی و انگیزش درونی به شدت به هم مرتبط هستند و نقش مهمی در روند یادگیری تجمعی ایفا می کنند. تازگی به عنوان فرایند تشخیص محرک های جدید که «متفاوت از هر چیزی که تاکنون شناخته شده است، جدید، جالب و کمی عجیب به نظر می رسد» می توان در نظر گرفت [۶۵]. در دسته بندی تشخیص تازگی یکی از اولین پژوهش ها توسط مارسلند^۴ و همکاران [۶۶] صورت گرفت. آن ها با استفاده از نقشه خودسازمانده، الگوریتمی برای شناسایی ویژگی های جدید یا غیرعادی در محیط به وسیله یک ربات متحرک را معرفی کردند که با استفاده از اسکن های سونار یک مدل داخلی از «عادی بودن» ایجاد می کند و با ارزیابی جدید بودن هر اسکن سونار، ویژگی های جدید را شناسایی می کند. توانایی شناسایی ویژگی های جدید در زمان واقعی، کاهش نیاز به پردازش بیش از حد داده های حسی و قابلیت استفاده در محیط های پویا و تغییرپذیر از مزایای این تحقیق است. اما شناسایی نادرست محرک های جدید به عنوان آشنا، و نیاز به بررسی و بهبود سیستم های حسی اضافی از معایب این تحقیق محسوب می شود.

³ Hangl
⁴ Marsland

¹ Barto
² Baranes



جدول ۳: مدل‌های محاسباتی IM مبتنی بر شایستگی

سال انتشار و مرجع	ایده اصلی	مزایا	معایب/چالش‌ها	روش یا الگوریتم
۲۰۱۸ [۶۲]	یادگیری مهارت‌های اجتماعی شبیه به انسان توسط ربات‌ها با استفاده از چارچوب IMRL	یادگیری مهارت‌های اجتماعی شبیه به انسان بدون نیاز به پاداش‌های مستقیم و توانایی تصمیم‌گیری انسانی‌تر توسط ربات	نیاز به داده‌های آموزشی فراوان برای یادگیری و محدودیت در فضای عملیاتی ربات به چهار عمل	یادگیری تقویتی عمیق (DRL) ^۱ با IM شامل شبکه پیش‌بینی کنش - شرطی (Pnet) و شبکه سیاستی (Qnet)
۲۰۱۹ [۶۴]	چارچوبی جدید برای برنامه‌ریزی حرکت آنلاین احتمالاتی با سازوکار تطبیق آنلاین کارآمد بر اساس شبکه عصبی بازگشتی تصادفی. ربات قادر می‌شود از تعاملات فیزیکی کم، یاد گرفته و با محیط‌های جدید به سرعت سازگار شوند.	تطبیق سریع آنلاین، یادگیری کارآمد از تعاملات کم، عدم نیاز به تعریف وظایف یادگیری توسط کارشناسان و قابلیت استفاده در محیط‌های واقعی	نیاز به تعاملات بیشتر برای یادگیری سیگنال‌های محلی، مشکلات مقیاس‌پذیری به فضای با ابعاد بالاتر و بهبود کدگذاری برای کاربردهای پیچیده‌تر	شبکه عصبی بازگشتی تصادفی با سیگنال‌های IM و استراتژی تکرار ذهنی ترکیب شده تا یادگیری و تطبیق آنلاین را انجام دهد.
۲۰۲۰ [۵۳]	ارائه روش‌های جدید برای کاهش پیچیدگی نمونه‌برداری در یادگیری مدل ربات‌ها به صورت آنلاین. این روش‌ها از طریق سیگنال IM جدید که عناصر مبتنی بر دانش و شایستگی را ترکیب می‌کند، اکتشاف را هدایت می‌کنند. همچنین از تکرار ذهنی اپیزودیک آنلاین برای تسریع یادگیری و افزایش کارایی استفاده می‌شود.	کاهش قابل توجه پیچیدگی نمونه‌برداری، تسریع یادگیری آنلاین، کاهش سایش و پارگی در ربات‌ها، و امکان یادگیری هم‌زمان چندین مدل با استفاده از یک مجموعه داده تجربی، کارایی بالا و قابلیت استفاده در دنیای واقعی.	نیاز به تنظیم دقیق پارامترها برای عملکرد بهینه و پیچیدگی در پیاده‌سازی روش‌ها در محیط‌های واقعی، تعمیم روش‌ها به ربات‌های با درجه آزادی بسیار بالا.	استفاده از تکنیک GB ^۲ که به ربات اجازه یادگیری مهارت‌های خود را به صورت آنلاین و از ابتدا می‌دهد. از سیگنال IM جدید و تکرار ذهنی اپیزودیک آنلاین برای بهبود کارایی و سرعت یادگیری استفاده می‌کند.
۲۰۲۱ [۵۴]	ارائه شمای یادگیری ترکیبی IM - EM برای ربات‌های توسعه‌ای شامل ترکیب IM با یادگیری از مشاهده برای تسریع فرایند یادگیری ربات. چهار عنصر اصلی عبارت‌اند از: سیگنال IM احتمالاتی، سیگنال انگیزش بیرونی احتمالاتی، تشخیص نوآوری و اندازه‌گیری درجه نوآوری.	افزایش سرعت یادگیری، افزایش کارایی در کاهش تعداد نمونه‌های موردنیاز برای یادگیری مدل و توانایی تصمیم‌گیری مستقل ربات در مورد زمان و چگونگی اکتشاف است.	پیچیدگی در پیاده‌سازی شمای یادگیری در محیط‌های واقعی، نیاز به تنظیم دقیق پارامترها و مدیریت تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری از تجربیات، نیاز به داده‌های انسانی دقیق برای یادگیری مشاهده‌ای	شمای یادگیری ترکیبی از IM و انگیزش که از تشخیص نوآوری، اندازه‌گیری درجه نوآوری، سیگنال IM احتمالاتی و سیگنال انگیزش بیرونی احتمالاتی برای هدایت اکتشاف و یادگیری ربات استفاده می‌کند.
۲۰۲۲ [۵۷]	عامل یادگیری تقویتی سلسله‌مراتبی (HRL) ^۳ جدید که مهارت‌های گسترش یافته موقتی را با یک مدل پیشرو در انتزاع نمادین حالت محیط برای برنامه‌ریزی، ترکیب می‌کند. مهارت‌های متنوعی را از طریق IM به صورت یادگیری بدون نظارت می‌آموزد و از این مهارت‌ها به عنوان اقدامات نمادین استفاده می‌کند.	توانایی حل وظایف پیچیده‌ای که نیاز به کنترل پیوسته و برنامه‌ریزی بلندمدت دارند. این روش در مقایسه با عامل RL مسطح و سلسله‌مراتبی پایه، عملکرد بهتری دارد.	پیچیدگی در تعریف انتزاع حالت، نیاز به مقیاس‌پذیری برنامه‌ریزی جستجوی اول عرض برای عمق‌های زیاد راه‌حل و دشواری در یادگیری تمام مهارت‌های ممکن در محیط‌های پیچیده	عامل HRL به نام SEADS به همراه انتزاع نمادین حالت و یک مدل پیشرو برای یادگیری مهارت‌های گوناگون
۲۰۲۳ [۵۹]	معرفی و بررسی معماری REAL-X که برای ایجاد سیستم‌های رباتیک با قابلیت یادگیری خودکار و پایان‌ناپذیر از طریق تعامل با محیط. این تعامل با استفاده از IM برای اکتشاف و رویکردهای برنامه‌ریزی که به طور پویا انتزاع را افزایش می‌دهند، صورت می‌گیرد.	توانایی یادگیری خودکار و پایان‌ناپذیر بدون وابستگی به وظایف یا پاداش‌های از پیش تعریف شده، افزایش سطح انتزاع به طور پویا، و قابلیت سازگاری با شرایط مختلف محیطی	یادگیری از سطح صفر بدون داشتن هرگونه دانش پیشین، پیچیدگی در تنظیم اهداف و وظایف خودمختار، مشکلات ناشی از نادر بودن پاداش‌ها در مراحل ابتدایی یادگیری، تعامل هم‌زمان با چندین شیء	معماری با طراحی ماژولار شامل سه جزء اصلی: انتزاع‌کننده، کاوشگر، و برنامه‌ریز. این اجزاء به ترتیب مسئول انتزاع ورودی‌های حسی، تولید تجربیات حرکتی برای یادگیری اهداف و اقدامات، و تدوین و اجرای برنامه‌های عملیاتی برای دستیابی به اهداف خارجی
۲۰۲۴ [۶۳]	استفاده از RL و یادگیری مبتنی بر برنامه درسی برای دستیابی به کنترل حرکتی در وظایف پیچیده دست‌کاری اشیاء. استفاده از شبیه‌سازهای عضلانی - اسکلتی و الگوریتم‌های یادگیری قدرتمند	ارائه رویکردی کارآمد برای شبیه‌سازی کنترل حرکتی پیچیده، توانایی تحلیل سیاست‌های یادگیری و ارائه بینش‌های جدید در مورد کنترل موتور بیولوژیکی.	هزینه محاسباتی بالا برای ترکیب شبیه‌سازهای عضلانی - اسکلتی با RL و مشکلات بهینه‌سازی مدل‌ها	الگوریتم RL خاصی به نام PPO ^۴ [۱۵۳] با معماری بازگشتی شامل لایه‌های LSTM ^۵

^۴ Proximal Policy Optimization

^۵ Long short-term memory

^۱ Deep Reinforcement Learning

^۲ Goal Babbling

^۳ Hierarchical Reinforcement Learning



۲۰۲۴ [۷۴]	رویکردی جدید برای کشف مهارت‌ها به نام SLIM که از منتقدان متعدد در چارچوب عامل - منتقد استفاده می‌کند. بهبود کشف مهارت‌های متغیر پنهان در زمینه‌ی دست‌کاری رباتیک	کشف مهارت‌های متنوع و ایمن، بهبود HRL و برنامه‌ریزی، و توانایی انجام آزمایش‌های گسترده برای نشان‌دادن مزایای رویکرد چند منتقد	فرض طراحی آسان پاداش‌های اضافی، نیاز به بررسی بیشتر تداخل بین پاداش‌ها و مشکلات بالقوه در پیاده‌سازی به‌صورت شبیه‌سازی تا واقعیت	RL سلسله‌مراتبی با استفاده از رویکرد چند منتقد و ترکیب پاداش‌ها بهبود یافته
--------------	--	---	--	---

جدول ۴: مدل‌های محاسباتی IM مبتنی بر تازگی

سال انتشار و مرجع	ایده اصلی	مزایا	معایب/چالش‌ها	روش یا الگوریتم
۲۰۱۷ [۶۸]	معرفی چارچوبی برای برنامه‌ریزی حرکتی آنلاین و یادگیری مبتنی بر شبکه‌های عصبی بازگشتی تصادفی بیولوژیکی است که از سیگنال‌های IM و یک استراتژی بازپخش ذهنی برای انطباق آنلاین و به طور کارآمد نمونه‌گیری استفاده می‌کند.	انطباق آنلاین و بهبود یافته، نمونه‌گیری کارآمد و بی‌درنگ، قابلیت استفاده از تعداد کمی از تعاملات فیزیکی برای یادگیری، و قابلیت استفاده مدل در محیط‌های مختلف	نیاز به تجربه کارشناسی، پایین آوردن دانش متخصص و مشکلات مرتبط با اکتساب مدل‌های جدید برای محیط‌های ناشناخته است.	شبکه‌های عصبی بازگشتی تصادفی بیولوژیکی به همراه سیگنال‌های IM.
۲۰۱۹ [۶۹]	ایده اصلی این مقاله معرفی یک روش تشخیص نوآوری مبتنی بر انتظار است که از روش‌های شبکه‌های عصبی بازگشتی آنلاین استفاده می‌کند تا ساختار شبکه را به طور پویا یاد بگیرد و با تغییرات در داده‌ها ساختار خود را تطبیق دهد.	توانایی یادگیری آنلاین و پویا، تطبیق ساختار با تغییرات در داده، و امکان شناسایی نوآوری‌های محلی همراه با انتظارات است.	محدودیت‌هایی در تشخیص داده‌های نوآور، از دست‌دادن جزئیات کوچک در داده‌های حسی و نیاز به بهبود سیستم تشخیص نوآوری به‌منظور در نظر گرفتن ویژگی‌های محلی جالب است.	شبکه‌های عصبی بازگشتی آنلاین است که بر اساس انتظارات و پیش‌بینی داده‌های بعدی ساختار شبکه را پویا یاد می‌گیرد.
۲۰۲۰ [۹۰]	پیشنهاد یک روش جدید برای هدایت جستجوی نوآوری در RL است که با استفاده از رمزگذار خودکار به جای استفاده از روش‌های مبتنی بر فاصله برای ارزیابی نوآوری، به ارزیابی رفتارهای عامل‌ها می‌پردازد. این روش به دنبال بهبود مقیاس‌پذیری و قابلیت تعمیم روش‌های جستجوی نوآوری در مسائل پیچیده است.	بهبود مقیاس‌پذیری و قابلیت تعمیم، کاهش نیاز به ارزیابی‌های متعدد سیاست‌ها، و توانایی تشویق کاوش مؤثرتر در فضای رفتارهای کمتر دیده شده	پیچیدگی در مدل‌سازی یا یادگیری ویژگی‌های رفتاری مناسب و نیاز به تحقیقات بیشتر در یادگیری نمایش‌های رفتارهای کارآمد با استفاده از معماری‌های دنباله به دنباله است.	ترکیبی از روش‌های جستجوی نوآوری ^۱ و RL با استفاده از رمزگذار خودکار برای ارزیابی نوآوری رفتارهای عامل‌ها است.
۲۰۲۱ [۹۱]	بررسی رفتار انسان‌ها در مواجهه با محیط‌های با پاداش خلوت و تغییرات ناگهانی، نویسندگان نشان می‌دهند که نظریه‌های کلاسیک RL نمی‌توانند رفتار انسان‌ها را در غیاب پاداش خارجی یا در زمان تغییرات محیطی توضیح دهند. به همین دلیل، آن‌ها پیشنهاد می‌کنند که تئوری‌های RL باید شامل مفاهیم تعجب و نوآوری باشند، هر کدام با نقش‌های جداگانه.	توانایی تبیین بهتر رفتار اکتشافی و تطبیقی انسان‌ها است. این روش نشان می‌دهد که چگونه انسان‌ها از نوآوری برای اکتشاف و از تعجب برای به‌روزرسانی سریع مدل‌های داخلی و پاسخ‌های عادت شده استفاده می‌کنند.	پیچیدگی در تفکیک دقیق نقش‌های نوآوری و تعجب در یادگیری و تصمیم‌گیری است. همچنین، تعیین دقیق تأثیر هر کدام بر رفتار انسان و اندازه‌گیری آن‌ها در سیگنال‌های EEG ^۲ نیاز به تحقیق و توسعه بیشتر دارد.	مدل ^۳ SurNoR است که یک الگوریتم RL ترکیبی است که شامل تعجب، نوآوری و پاداش می‌شود. این مدل برای توضیح رفتار انسان‌ها و سیگنال‌های EEG در وظایف تصمیم‌گیری توالی عمیق طراحی شده است.
۲۰۲۱ [۱۱۷]	توسعه یک چارچوب جدید با استفاده از چندین فیلتر تشخیص نوآوری برای یادگیری یک مدل از دید ربات است. سپس از این مدل برای برجسته‌کردن درک‌های غیرمشابه هنگام کاوش ربات در یک محیط استفاده می‌شود. هدف اصلی ترکیب چندین فیلتر نوآوری این است که هر فیلتر در تشخیص انواع خاصی از نوآوری‌ها خوب عمل می‌کند؛ بنابراین، یک چارچوب جدید پیشنهاد می‌شود که نشان می‌دهد چگونه می‌توان چندین فیلتر تشخیص نوآوری مختلف	تشخیص نوآوری‌های قوی و قابل اعتماد، عملکرد بهتر در مقایسه با فیلترهای نوآوری مبتنی بر انتظار و ظاهر به‌صورت جداگانه. این سیستم کاملاً آنلاین و در زمان واقعی است که برای کاربردهای رباتیک موبایل بسیار مهم است.	فیلترهای نوآوری زیر سطح دارای ضعف‌هایی هستند که می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد کلی داشته باشد. سرعت پاسخ فیلتر نوآوری می‌تواند کندتر از زمانی باشد که فقط ویژگی‌های محلی به فیلتر نوآوری ارائه شود. پیچیدگی اجرای ترکیب چندین فیلتر تشخیص نوآوری.	استفاده از دو مدل تشخیص نوآوری: مدل تشخیص نوآوری مبتنی بر انتظار با استفاده از شبکه عمیق MobileNetV2 و مدل تشخیص نوآوری مبتنی بر ظاهر با استفاده از ویژگی‌های SURF ^۴

¹ Novelty Search

² Electroencephalogram

³ Surprise-Novelty- Reward

⁴ Speeded Up Robust Feature



			را ترکیب کرد تا وضعیت کلی نوآوری را بر روی ویژگی‌های بصری قوی‌تر نماید.	
۲۰۲۳ [۱۱۸]	بررسی اینکه آیا انسان‌ها در مواجهه با محرک‌های تصادفی و بدون پاداش، مانند الگوریتم‌های IMRL، دچار حواس‌پرتی می‌شوند. همچنین بررسی کند که آیا این حواس‌پرتی به‌مرور زمان از بین می‌رود یا پایدار می‌ماند.	سادگی محاسباتی نسبت به روش‌های دیگر و توانایی مدل‌سازی دقیق‌تر رفتارهای کنجکاوی انسان، این روش می‌تواند به طور کیفی و کمی رفتار انسان‌ها را در مواجهه با محرک‌های تصادفی بدون پاداش پیش‌بینی کند.	رفتار انسان‌ها به طور کامل توسط مدل‌های موجود توضیح داده نمی‌شود و نیاز به مطالعات بیشتر برای درک بهتر نقش تازگی و پاداش در رفتارهای اکتشافی انسان‌ها وجود دارد.	الگوریتم‌های IMRL که بر اساس IM مانند تازگی، شگفتی و افزایش اطلاعات طراحی شده‌اند.
۲۰۲۴ [۱۱۹]	معرفی یک مدل محاسباتی جدید برای IM در RL است که بر محدودیت‌های کاوش‌های مبتنی بر شگفتی غلبه می‌کند. پاداش به‌جای شگفتی، از تازگی شگفتی محاسبه می‌شود.	کاهش حواس‌پرتی ناشی از مشاهدات غیرقابل‌پیش‌بینی یا نویزی، بهبود رفتارهای اکتشافی و افزایش عملکرد نهایی در محیط‌های با پاداش کم.	پیچیدگی محاسباتی مرتبط با پیاده‌سازی و آموزش شبکه حافظه و نیاز به تنظیم دقیق مدل‌های مختلف پیش‌بینی شگفتی است.	سیستم حافظه شگفتی ^۱ است که شامل حافظه انجمنی خود رمزگذار و حافظه اپیزودیک مبتنی بر توجه برای محاسبه تازگی شگفتی است.
۲۰۲۴ [۱۲۰]	معرفی روشی جدید و مؤثر برای کاوش هماهنگ چندعاملی در RL غیرمتمرکز که از طریق اشتراک تازگی محلی و استفاده از IR مبتنی بر تازگی و اطلاعات متقابل وزنی، به عامل‌ها کمک می‌کند تا به‌صورت هماهنگ کاوش کنند.	بهبود عملکرد در محیط‌های چندعاملی با پاداش‌های خلوت، کاهش کاوش‌های تکراری و افزایش هماهنگی بین عامل‌ها، عملکرد خوب باوجود محدودیت‌های ارتباطی	نیاز به شبکه ارتباطی کاملاً متصل برای اشتراک تازگی بین عامل‌ها و پیچیدگی محاسباتی مرتبط با اندازه‌گیری اطلاعات متقابل وزنی	سیستم MACE ^۲ که شامل اشتراک تازگی محلی و IR مبتنی بر اطلاعات متقابل وزنی برای هدایت کاوش هماهنگ عامل‌ها.

۵-۴- توانمندسازی، قدرت، کنترل

توانمندسازی نشان‌دهنده درجه‌ی آزادی است که یک عامل بر محیط دارد. یک عامل توانمند ترجیح می‌دهد که وضعیت‌ها جایی باشند که او بیشترین کنترل را داشته باشد و همچنین بتواند این کنترل را حس کند. کلابوبین^۶ و همکاران [۷۰] معیاری جدید برای اندازه‌گیری کنترل در عامل‌های هوش مصنوعی که به آن «تقویت» یا «توانمندسازی» گفته می‌شود، ارائه کردند. این توانمندسازی بر مبنای تأثیرگذاری عامل‌ها در محیط خود تعریف می‌شوند. چالش اصلی، پیچیدگی مفهومی معیار توانمندسازی و نیاز به محاسبات پیچیده برای ارزیابی آن است. پیشینه‌سازی جریان اطلاعات بالقوه می‌تواند به‌عنوان یک تابع سودمندی سراسری برای هدایت و بهینه‌سازی رفتار جمعی در سیستم‌های چندعامله عمل کند. [۷۱] با تمرکز بر افزایش جریان اطلاعات درون‌گروهی، می‌تواند هماهنگی، تطبیق‌پذیری و عملکرد کلی بهتری داشته باشد. دشواری در تعریف و کمی‌سازی جریان اطلاعات در سناریوهای عملی، و مشکلات مقیاس‌پذیری بالقوه در زمان اعمال به سیستم‌های بسیار بزرگ چالش‌هایی است که این تحقیق با آن مواجه است.

روش جدیدی برای شناسایی نوآوری در زمان واقعی با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی افزایشی^۳ [۶۷] ارائه شده است و عملکرد آن را با تکنیکی بر اساس شبکه عصبی GWR^۴ مقایسه کرده‌اند. این روش باعث عملکرد بهتر در شناسایی نوآوری، کاهش ابعاد داخلی داده‌ها، توانایی بازسازی خوب و ارزیابی ویژگی‌های یاد گرفته شده توسط سیستم شده است. نیاز به کاهش ابعاد داده‌ها قبل از پردازش با شبکه GWR و ارزیابی شباهت بین ورودی‌ها در ابعاد کاهش‌یافته، مشکلاتی است که این الگوریتم با آن‌ها مواجه است. بررسی نقش شناسایی نوآوری به‌عنوان یک انگیزش درونی در یادگیری انباشته ربات‌ها توسط [۶۵] انجام شده است. همچنین روش‌های مختلف شناسایی نوآوری برای عملکرد مؤثر و بلندمدت ربات‌های هوشمند طراحی شده بر اساس دانش و تجربه‌ی انباشته بررسی شده است. این روش مبتنی بر «خوگیری»^۵ از ساختارهای یادگیری پویا و افزایشی برای شناسایی نوآوری و انجام عملکردهای یادگیری در زمان بلندمدت استفاده می‌کند. مشکلات مربوط به تصمیم‌گیری در مورد آموزش و توسعه بیشتر، و پیچیدگی‌های مربوط به پردازش داده‌های نویزی از چالش‌های این روش است. در جدول ۴ سایر روش‌ها با جزئیات بیشتری ارائه شده‌اند.

¹ Surprise Memory

² Multi-Agent Coordinated Exploration

³ IncrementalPCA

⁴ Grow-When-Required

⁵ habituation

⁶ Klyubin



جدول ۵: مدل‌های محاسباتی IM: توانمندسازی، کنترل، قدرت

سال انتشار و مرجع	ایده اصلی	مزایا	معایب/چالش‌ها	روش یا الگوریتم
۲۰۱۹ [۷۵]	بررسی استفاده از توانمندسازی در حضور یک سیگنال پاداش بیرونی با این فرض که توانمندسازی می‌تواند عامل‌های RL را به‌وسیله تشویق به‌سوی وضعیت‌های توانمند هدایت کرده تا به راه‌حل‌های رفتاری اولیه خوبی برسند.	عمومی‌سازی اصل بهیمنی ^۱ و گسترش‌های اخیر اطلاعاتی به آن.	نبود داده‌های تجربی برای تأیید اثربخشی و محدودیت در استفاده از این روش در دامنه‌های پیچیده و بزرگ‌تر.	هدایت RL بر اساس توانمندسازی
۲۰۲۰ [۱۲۱]	ارائه یک الگوریتم آنلاین و کارآمد برای محاسبه توانمندسازی به‌عنوان نوعی IM در RL. این روش با کاهش پیچیدگی نمونه و محاسبه، و بهبود پایداری آموزشی نسبت به روش‌های موجود، به آموزش سیاست‌های بهینه بدون نیاز به دانش خاص حوزه و دخالت دستی کمک می‌کند.	کاهش پیچیدگی محاسباتی و نمونه، بهبود پایداری آموزشی، عدم نیاز به دانش خاص حوزه و کاهش نیاز به تنظیمات دستی، امکان آموزش در شرایط واقعی بدون نیاز به بازنشانی‌های مکرر.	نیاز به تنظیم دقیق شبکه‌های عصبی برای محاسبه توانمندسازی و پیچیدگی‌های مرتبط با بهینه‌سازی کانال‌های گوسی، نیاز به بهبود بیشتر در محیط‌های با ابعاد بالا	RL مستقل از مدل
۲۰۲۱ [۱۲۲]	ارائه یک چارچوب به نام «تقویت یادگیری هدف‌محور متغیر» که یادگیری مهارت‌های خودنظارتی مبتنی بر توانمندسازی متغیر را با RL هدف‌محور ترکیب می‌کند. این چارچوب نشان می‌دهد که چگونه می‌توان از یادگیری نمایشی و الگوریتم‌های توانمندسازی برای کشف مهارت‌ها و رسیدن به اهداف استفاده کرد.	امکان یادگیری مهارت‌های متنوع بدون نیاز به طراحی پیچیده پاداش‌ها، بهبود کیفیت اهداف نهان کشف شده، پایداری بیشتر الگوریتم‌ها و امکان استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی محبوب مانند بازیخش تجربه بازنگری شده	پیچیدگی محاسباتی و نیاز به تنظیم دقیق پارامترها برای بهبود کیفیت نمایشی و مهارت‌ها، نیاز به ارزیابی دقیق‌تر و گسترده‌تر در محیط‌های مختلف.	ترکیبی از RL هدف‌محور و توانمندسازی متغیر ^۲ است که از حداکثرسازی اطلاعات متقابل ^۳ و یادگیری نمایشی برای کشف مهارت‌ها و اهداف نهان استفاده می‌کند.
۲۰۲۲ [۱۲۳]	مطالعه رفتار کاوشی انسان‌ها در یک محیط پیچیده و ساختارمند. نویسندگان بررسی می‌کنند که چگونه بازیکنان بازی آنلاین «Little Alchemy 2» با ایجاد عناصری که امکان ایجاد عناصر بیشتر را فراهم می‌کنند، به دنبال توانمندسازی خود هستند. آنها نشان می‌دهند که این نوع کاوش به‌عنوان یک منبع IM می‌تواند در محیط‌های پیچیده که سیگنال‌های پاداش صریحی ندارند، مؤثر باشد.	فراهم کردن یک محیط پیچیده و ساختارمند برای مطالعه رفتار کاوشی انسان‌ها، ارائه دیدگاه‌های جدید درباره IM و امکان استفاده از داده‌های بزرگ برای تجزیه و تحلیل دقیق‌تر رفتار کاوشی	پیچیدگی محاسباتی مدل‌ها، نیاز به داده‌های بزرگ و متنوع و احتمال تأثیر ساختارهای از پیش تعریف شده بازی بر رفتار کاوشی بازیکنان	مدل کاوش به‌عنوان توانمندسازی که ترکیبی از استراتژی‌های کاوش مبتنی بر عدم قطعیت و ایجاد عناصر است که امکان ایجاد عناصر بیشتر را فراهم می‌کند.
۲۰۲۳ [۱۲۴]	ارائه یک رویکرد IM مبتنی بر توانمندسازی برای وظایف دست‌کاری رباتیک با پاداش‌های پراکنده است. این رویکرد با ادغام توانمندسازی و کنجکاوی، به ربات‌ها کمک می‌کند تا مهارت‌های مفید دست‌کاری را باوجود پاداش‌های خارجی محدود یاد بگیرند و در مقایسه با سایر روش‌های پیشرفته کاوش درونی، عملکرد بهتری نشان دهند.	امکان یادگیری مهارت‌های دست‌کاری باوجود پاداش‌های پراکنده، بهبود کارایی کاوش و نرخ موفقیت وظایف، و قابلیت ادغام آسان با هر الگوریتم یادگیری تقویتی، توانایی ترکیب با سایر استراتژی‌های کاوش در جهت عملکرد بهتر.	پیچیدگی محاسباتی ناشی از به حداکثر رساندن اطلاعات متقابل شرطی با متغیرهای تصادفی پیوسته و با ابعاد بالا، نیاز به ترکیب با روش‌های کاوش مبتنی بر کنجکاوی در ابتدای فرایند یادگیری برای ارائه تخمین‌های معقول از مقادیر توانمندسازی.	الگوریتم یادگیری تقویتی با رویکرد IM مبتنی بر توانمندسازی با استفاده از حداکثر رساندن وابستگی متقابل بین اعمال و وضعیت‌ها
۲۰۲۳ [۱۲۵]	رفتار اکتشافی انسان‌ها در محیط‌های پیچیده‌تر از آنچه که مطالعات قبلی نشان داده‌اند، غنی‌تر است. به‌خصوص، این مقاله بر IM انسان‌ها برای توانمندسازی و خلق اشیایی که به ایجاد اشیای جدیدتر منجر می‌شوند، تمرکز دارد.	مطالعه رفتارهای اکتشافی پیچیده در محیط‌های غنی و معنادار، ارائه مدل‌های بهتر از IM انسان، و امکان بررسی استراتژی‌های اکتشافی انسانی در سناریوهای واقعی‌تر.	پیچیدگی مدل‌سازی رفتارهای اکتشافی، محدودیت‌های ناشی از طراحی بازی توسط یک فرد و نیاز به بررسی بیشتر برای مقایسه مدل‌های مختلف اکتشافی در محیط‌های دیگر.	استفاده از مدل‌های اکتشافی هدایت‌شده توسط عدم قطعیت و مدل اکتشاف به‌عنوان توانمندسازی که ترکیبی از درک معنایی و IM برای ایجاد اشیای جدید است.

¹ Bellman

² variational empowerment

³ Mutual information



۲۰۲۳ [۱۲۶]	معرفی یک معیار جدید برای اکتشاف در عامل‌های خودمختار با این هدف که عامل‌ها در غیاب یک وظیفه مشخص، اقداماتی را انجام دهند که بیشترین اطلاعات را برای بهبود برآورد توانمندی‌شان فراهم کند. این معیار به‌صورت ترکیبی از جستجوی نوآوری، به حداکثر رساندن تعجب و پیشرفت در یادگیری طراحی شده است.	توانایی ادغام چندین معیار اکتشافی به یک فرمول واحد، کمک به عامل‌ها در شناسایی توانمندی‌هایشان برای تعامل با محیط و جلوگیری از به دام افتادن در مناطق با میزان تصادفی بودن بالا یا محدودیت‌های کنترل	پیچیدگی محاسباتی معیار افزایش توانمندی و نیاز به تقریب‌های هوشمند برای مقیاس‌پذیری به سناریوهای پیچیده‌تر	افزایش توانمندسازی به‌عنوان معیاری برای اکتشاف در عامل‌های خودمختار
۲۰۲۴ [۱۲۷]	استفاده از مفهوم «توانمندسازی انتقال» در RL چندعاملی است. این مفهوم به دنبال اندازه‌گیری تأثیر بالقوه بین اقدامات عامل‌ها است تا فرایند یادگیری را به سمت استراتژی‌های واکنشی به رفتارهای دیگر عامل‌ها هدایت کند. هدف این است که استراتژی‌هایی ایجاد شود که انعطاف‌پذیری بیشتری در برابر تغییرات رفتارهای شرکا داشته باشند.	بهبود عملکرد کلی عامل‌های همکاری‌کننده در وظایف پیچیده‌تر، افزایش انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات رفتار شرکا و عدم تداخل با بهره‌برداری از سیاست‌های خوب کشف شده.	پیچیدگی محاسباتی مفهوم توانمندسازی انتقال و نیاز به ارزیابی بیشتر برای تعمیم‌پذیری در سناریوهای مختلف، نیاز به بررسی بیشتر تأثیر این روش در سناریوهای رقابتی و یا مختلط.	روش «توانمندسازی انتقال» با استفاده از اندازه‌گیری ظرفیت کانال بین اقدامات عامل‌ها، به‌عنوان یک مکانیزم پاداش اضافی در فرایند آموزش.

اشاره نمود که تعیین روش‌های انتشار احساسات مصنوعی و نقش آن‌ها در سیستم تصمیم‌گیری ممکن است پیچیده باشد. دورنر^۲ و همکاران در [۸۲] به معرفی نظریه PSI که یک معماری محاسباتی فرمال از فرایندهای روان‌شناختی انسانی است پرداخته‌اند. این نظریه مبتنی بر معماری شناختی DARPA، بر خلاف نظریات موجود دیگر، نه تنها فرایندهای شناختی را مدل می‌کند، بلکه فرایندهای انگیزشی و احساسی و تعاملات آن‌ها را نیز مدل‌سازی می‌کند.

بهبود مکانیزم‌های پاداش در عامل RL با استفاده از عامل اجتماعی - عاطفی الهام‌گرفته از احساسات انسانی و تعاملات اجتماعی در [۸۳] صورت گرفته است. این روش به‌منظور ایجاد عامل RL انعطاف‌پذیرتر و سازگارتر با عملکرد بهتر در محیط‌های پویا و غیرقابل پیش‌بینی ارائه شده است. همچنین به کاهش نیاز به تنظیم دقیق توابع پاداش برای محیط‌های خاص به‌عنوان دیگر مزیت آن می‌توان اشاره کرد. از طرفی پیچیدگی طراحی مکانیزم‌های پاداش اجتماعی - عاطفی، نیاز به منابع محاسباتی گسترده برای شبیه‌سازی‌ها و دشواری‌های احتمالی در تعمیم این روش به همه انواع مسائل RL چالش‌هایی است که این روش با آن‌ها مواجه است. در ادامه در جدول ۶ به معرفی برخی دیگر از روش‌های مرتبط اخیر با این دسته پرداخته شده است.

۵-۶- هدف

پژوهش‌های اخیر روی به‌کارگیری انگیزش درونی برای تولید خودمختار و/یا انتخاب اهدافی که می‌توانند اخذ مهارت را هدایت کنند، تمرکز کرده‌اند [۸۴، ۸۵]. این دیدگاه مزایای متنوعی را فراهم می‌کند، برای مثال، امکان بهینه‌سازی فرآیندهای یادگیری در فضاهای عمل با ابعاد بالا با چندین ربات کنترل‌کننده [۵۴، ۵۵] فراهم می‌شود. بارانز^۳ و همکاران [۸۶] معماری «تولید هدف خود تطبیق دهنده هوشمند کنجاکو تطبیق پذیر با هدف توسعه مکانیسم فعال برای یادگیری

[۷۲] با ترکیب تکنیک‌های استنباط واریاسیونی و یادگیری عمیق، روشی مقیاس‌پذیر برای بهینه‌سازی اطلاعات متقابل به‌منظور پشتیبانی از یادگیری تقویتی انگیزش درونی معرفی کرده است. مقیاس - پذیری به مسائل با ابعاد بالا، کاهش پیچیدگی محاسباتی نسبت به روش‌های سنتی، کاربرد در تنظیمات گسسته و پیوسته، و توانایی یادگیری مستقیم از ورودی‌های بصری بدون نیاز به مدل مولد محیط از مزایای این تحقیق به شمار می‌رود. احتمال دشواری در برآورد دقیق اطلاعات متقابل در محیط‌های بسیار پیچیده، اتکا به تقریب‌هایی که ممکن است همیشه تمامی جزئیات داده را به‌درستی بازتاب ندهند، و نیاز به منابع محاسباتی زیاد برای کاربردهای یادگیری عمیق، چالش‌های این تحقیق است. گرگور^۱ و همکاران [۷۳] روش جدید یادگیری تقویتی بدون نظارت به‌منظور کشف مجموعه‌ای از گزینه‌های درونی موجود برای یک عامل را معرفی کردند که این مجموعه با حداکثر کردن تعداد حالت‌های مختلفی که یک عامل می‌تواند به طور قابل اعتماد به آن‌ها برسد، به دست می‌آید. این کار با اندازه‌گیری اطلاعات متقابل بین مجموعه‌ای از گزینه‌ها و حالت‌های پایان گزینه‌ها انجام می‌شود. ویژگی مهم این روش، مقیاس‌پذیری بالای آن است. با مراجعه به جدول ۵ می‌توان سایر روش‌های اخیر را به همراه بررسی آن‌ها مشاهده کرد.

۵-۵- تنهایی، وابستگی اجتماعی

شاید بتوان گفت نیاز به ارتباطات اجتماعی سخت‌ترین انگیزش درونی برای پیاده‌سازی به‌عنوان ارزیابی‌های محاسباتی باشد. [۸۱] رویکرد جدیدی مبتنی بر سائق‌ها را برای تولید و ترکیب احساسات مصنوعی در فرایند تصمیم‌گیری عامل‌های خودکار (فیزیکی و مجازی) ارائه کرده است. در این تحقیق هر احساس مصنوعی به طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد و این اجازه را می‌دهد که سیستم تصمیم‌گیری بر مبنای تجربیات خود به یادگیری احساسات و رفتارهای بهینه بپردازد. البته باید

¹ Gregor

² Dörner

³ Baranes



مدل‌های معکوس» در ربات‌ها که از انگیزش درونی الهام گرفته شده است، را ارائه کرده‌اند. این معماری اجازه می‌دهد تا ربات به طور فعال و بهینه توزیع مهارت‌ها/سیاست‌های پارامتری را که رویکردهای مختلف یکسانی را برای حل کردن توزیع وظایف/اهداف پارامتری مواجه می‌شوند یاد بگیرد. در نتیجه می‌تواند موثرتر و کارآمدتر از روش‌های سنتی یادگیری فعال در رباتیک باشد. البته زمان برای جمع‌آوری نمونه‌های یادگیری در دنیای واقعی محدود است و مدل‌های معکوس یادگیری باید به طور خودکار و به صورت تدریجی توسط ربات‌ها جمع‌آوری شود.

در [۵۶] معماری انگیزش درونی ارائه شده است که قادر است به طور خودکار (۱) تغییرات در محیط را کشف کند، (۲) نمایش اهداف متناظر با این تغییرات را شکل دهد، (۳) هدف را بر اساس انگیزش درونی انتخاب کند، (۴) منابع محاسباتی مناسب را برای دستیابی به هدف انتخاب شده انتخاب کند، (۵) پیگیری دستیابی به هدف انتخاب شده را انجام دهد و (۶) یک سیگنال یادگیری را خودکار تولید کند زمانی که هدف انتخاب شده با موفقیت دستیابی شود. باید اشاره کرد که نیاز به تنظیمات دقیق یکی از چالش‌های اصلی این معماری است. [۸۷] سیستمی را معرفی نموده است که با استفاده از انگیزش درونی، نتایج و مهارت‌های جدید را کشف کرده و سپس از مکانیسم‌های مبتنی بر اهداف برای دستیابی به اهداف بیرونی کاربر استفاده می‌کند. وابستگی به تکنولوژی تصویری و ماهیت مازولار مهارت‌ها مانعی است که این سیستم باید برای عبور از آن‌ها برنامه‌ریزی کند. در [۴۰] چارچوب مهمی متناسب با یادگیری چندهدفه بدون نظارت و الگوریتم‌های مبتنی بر اکتشاف هدف‌محور انگیزش درونی ارائه نمود که بعداً مورد رجوع و استفاده بسیاری از محققان دیگر قرار گرفت و توسعه‌های مختلفی بر روی آن انجام شد. ایده اصلی این تحقیق، مدل‌سازی یادگیری خودکار و پیوسته در کودکان با استفاده از فرایندهای اکتشاف هدف‌محور انگیزش درونی و یادگیری برنامه آموزشی خودکار است. امکان کشف مهارت‌های پیچیده با کمک یک برنامه آموزشی خودکار و اکتشاف فضاهای اهداف درونی مختلف، مزیت‌های مهم این روش است. محدودیت‌های زمانی، وجود نویز پیچیده و نیاز به پیاده‌سازی واقعی در دنیای رباتیک مسائلی است که این روش باید روی آن‌ها کار کند. سایر روش‌های ارائه شده در این دسته‌بندی در جدول (۷) با جزئیات بیشتری مورد کندوکاو قرار گرفته است.

۵-۷- غافلگیری، کنجکاوی، (عدم) قطعیت

غافلگیری یعنی عامل از نتیجه‌هایی که برخلاف درک او از جهان باشد، هیجان‌زده می‌شود [۷۶]. این ارزیابی باعث می‌شود عامل به دنبال تجربیات جدید باشد. به عنوان مثال، عامل می‌تواند یک پاداش اضافه را بگیرد اگر وضعیت‌های دیده نشده قبلی را ببیند، یا خروجی عملی را مشاهده کند که پیش‌بینی نشده باشد، یعنی در تضاد با آنچه تابه‌حال فهمیده است، باشد. [۷۷] روشی را برای بهبود اکتشاف در RL با استفاده از پاداش‌های اکتشافی مشتق شده از یک مدل یاد گرفته شده از

دینامیک سیستم پیشنهاد کرده است. این مدل که با یک شبکه عصبی پارامتریزه شده است، پاداش‌ها را بر اساس خطاهای پیش‌بینی اختصاص می‌دهد و عامل را به اکتشاف حالت‌های جدید که به طور قابل توجهی با پیش‌بینی‌هایش متفاوت هستند، تشویق می‌کند. اکتشاف مقیاس‌پذیر و کارآمد در وظایف پیچیده و با ابعاد بالا، عملکرد بهتر در حوزه‌های چالش‌برانگیزی مانند بازی‌های آتاری و سرعت یادگیری سریع‌تر، عملکرد بهتر نسبت به استراتژی‌های ساده‌تری مانند epsilon_greedy، کاربرد بهتر برای مسائل بزرگ مقیاس نسبت به رویکردهای بیزین از مزیت‌های این روش است. منتها این روش در مدیریت محیط‌هایی با دینامیک بسیار تصادفی جایی که خطای پیش‌بینی ممکن است به طور دقیق، تازگی را منعکس نکند، دچار چالش می‌شوند.

بلمر^۱ و همکاران [۷۸] با استفاده از الگوریتم RL، روشی را معرفی کردند که اکتشاف مبتنی بر شمارش و انگیزش درونی در RL از طریق معرفی یک شمارش کاذب مشتق شده از یک مدل چگالی ادغام شده است. این روش اکتشاف مبتنی بر شمارش را به محیط‌های غیر جدولی تعمیم می‌دهد و بهره‌وری اکتشاف را در سناریوهای پیچیده؛ مانند بازی‌های Atari 2600 بهبود می‌بخشد. این روش، بهره‌وری اکتشاف در فضای حالت‌های بزرگ و پیچیده، را بهبود بخشیده است. پیچیدگی محاسباتی برآورد مدل چگالی، مشکلات احتمالی در انتخاب مدل‌های چگالی مناسب برای محیط‌های مختلف، و نیاز به تنظیم و آزمایش گسترده چالش‌هایی است که این روش با آن‌ها مواجه است.

ارائه روشی برای اکتشاف مبتنی بر کنجکاوی در RL با استفاده از پیش‌بینی خود نظارتی توسط پاتاک^۲ و همکاران [۷۹] ارائه شده است. در این روش، کنجکاوی به عنوان خطا در پیش‌بینی نتیجه اقدامات عامل در یک فضای ویژگی‌های بصری یاد گرفته شده، فرمول‌بندی می‌شود. این رویکرد هدفش مدیریت فضای حالت‌های با ابعاد بالا مانند تصاویر است و با پاداش دادن به عامل برای خطاهای پیش‌بینی، آن را به اکتشاف تشویق می‌کند. اکتشاف کارآمد در فضای حالت‌های با ابعاد بالا، جلوگیری از نیاز به پیش‌بینی ورودی‌های حسی خام مانند پیکسل‌ها به طور مستقیم، کمک به عامل برای یادگیری مهارت‌های قابل تعمیم حتی در نبود پاداش‌های بیرونی باعث شده است که این تحقیق مورد استناد زیادی قرار گیرد. البته باید اشاره کرد که این روش ممکن است با سناریوهایی که نیاز به دنباله‌های بسیار خاصی از اعمال دارند و پیش-بینی آن‌ها دشوار است، دچار مشکل شود و اکتشاف را محدود کند.

مقاله [۷۶] پیشنهاد استفاده از شگفتی به عنوان شکلی از انگیزش درونی در DRL برای بهبود اکتشاف در محیط‌هایی با پاداش‌های کم را ارائه نموده است. این کار با محاسبه IR بر اساس KL-divergence بین احتمالات انتقال واقعی و یک مدل یاد گرفته شده انجام می‌شود که عامل را به اکتشاف حالت‌هایی که از پیش‌بینی‌هایش منحرف می‌شوند، تشویق می‌کند. اکتشاف کارآمد در وظایف کنترل با ابعاد بالا و پیوسته، مقیاس-پذیری و توانایی مدیریت محیط‌هایی با پاداش‌های بسیار کم، کاهش هزینه‌های محاسباتی در مقایسه با برخی از تکنیک‌های انگیزش درونی

² Pathak

¹ Bellemare



پیشرفته نکات مثبت این تحقیق به شمار می‌رود. منتها پیچیدگی یادگیری دقیق مدل انتقال و احتمال سربار محاسباتی در محیط‌هایی با دینامیک بسیار تصادفی چالش جدی است. همچنین ممکن است تقریب‌های استفاده شده برای KL-divergence همیشه به طور کامل شگفتی واقعی را ثبت نکنند. در جدول ۸ به معرفی برخی دیگر از روش‌های مرتبط اخیر با این دسته پرداخته شده است.

جدول (۶): مدل‌های محاسباتی IM: تنهایی، وابستگی اجتماعی

سال انتشار و مرجع	ایده اصلی	مزایا	معایب/چالش‌ها	روش یا الگوریتم
۲۰۱۸ [۱۲۹]	معرفی مدلی از احساسات مصنوعی برای تطبیق و هماهنگی ضمنی در سیستم‌های چند رباتی. احساسات مصنوعی به دو صورت مختلف عمل می‌کنند: به عنوان تنظیم‌کننده رفتار فردی و وسیله‌ای برای هماهنگی اجتماعی. پیاده‌سازی برای یک وظیفه ناوبری شده تا نشان دهد چگونه هماهنگی از طریق اضافه کردن احساسات مصنوعی به یک چارچوب ناوبری موجود به طور مؤثری به دست می‌آید.	بهبود عملکرد سیستم‌های چند رباتی در جلوگیری از بن‌بست‌ها، افزایش کارایی ناوبری در وظایف بحرانی زمانی، کمک به ربات‌های با سنسورهای خراب، عدم نیاز به تنظیمات دستی پیچیده یا تکنیک‌های مصرف‌کننده پهنای باند برای اشتراک اطلاعات	پیچیدگی در مدل‌سازی و پیاده‌سازی احساسات مصنوعی و نیاز به اعتبارسنجی در سناریوهای واقعی، تحقیقات بیشتر پیرامون ارزیابی قابلیت استفاده عمومی واژگان احساسی پیشنهاد شده	معماری کنترل سطح بالا بر اساس احساسات مصنوعی که شامل نمایندگی و دینامیک احساسات، تنظیم رفتار، و اشتراک اطلاعات برای هماهنگی است.
۲۰۲۰ [۱۳۰]	توسعه چارچوبی برای انگیزش اجتماعی در تعامل انسان - ربات که در آن یک عامل خودمختار نه تنها توسط محیط خود، بلکه بر اساس حالت ذهنی انسان که در همان محیط فعالیت می‌کند نیز پاداش می‌گیرد. این چارچوب به طور خاص در محیط‌های نیمه مشاهده شده پیاده‌سازی می‌شود که در آن تابع پاداش عامل به باور انسان بستگی دارد.	ایجاد رفتارهای انطباقی و هماهنگی مؤثر بین ربات و انسان، استفاده از انگیزش اجتماعی برای رسیدن به هماهنگی به جای استفاده از تکنیک‌های پیچیده و مصرف‌کننده پهنای باند برای اشتراک اطلاعات	مقیاس‌پذیری محدود مدل باور که برای دامنه‌های پیچیده‌تر نیاز به بهبود دارد. چالش نمایش دقیق‌تر باورها و استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی برای بهبود مقیاس‌پذیری	چارچوب فرایند تصمیم‌گیری مارکوف نیمه مشاهده شده ^۱ عمومی که برای مسئله انگیزش اجتماعی در تعامل انسان - ربات استفاده می‌شود.
۲۰۲۱ [۱۳۱]	پیشنهاد یک مدل محاسباتی تصمیم‌گیری انسانی که رفتارهای ناشی از احساسات را در بر می‌گیرد. این مدل می‌تواند یک عمل منطقی یا غیرمنطقی را بر اساس توزیع احتمالاتی تعیین کند که از ترکیب یک سیاست بهینه از فرایند تصمیم‌گیری مارکوف نیمه مشاهده شده و توزیع احتمالاتی تکامل یافته توسط دینامیک جدید احساسات به دست می‌آید.	توانایی مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتارهای انسانی ناشی از احساسات، امکان ارائه اقدامات پیشگیرانه برای جلوگیری از سناریوهای منفی مانند قتل، و بهبود سطح هوشمندی و باورپذیری شخصیت‌های هوش مصنوعی است.	نیاز به بهبود مقیاس‌پذیری مدل، ضرورت بهبود روش‌های تخمین و یادگیری پارامترهای مدل، و نیاز به اعتبارسنجی مدل با استفاده از سوابق مختلف فرایند تصمیم‌گیری انسانی	فرایند تصمیم‌گیری مارکوف نیمه مشاهده شده برای تصمیم‌گیری منطقی، معماری پویا برای محاسبه توزیع احتمالاتی ناشی از احساسات، و یک فرایند انتخاب عمل نهایی با استفاده از روش حد آستانه
۲۰۲۱ [۱۳۲]	احساسات می‌توانند به عنوان پدیده‌ای پدیدار از مکانیزم تنظیم انرژی عصبی - محاسباتی یک عامل شناختی در یک وظیفه تصمیم‌گیری در نظر گرفته شوند.	به عامل اجازه می‌دهد رفتار خود را به گونه‌ای تنظیم کند که انرژی عصبی - محاسباتی مورد نیاز را برای انجام وظیفه‌ای به حداقل برساند.	نیاز به مدل‌سازی و اندازه‌گیری دقیق احساسات	RL بدون مدل برای انتخاب بهینه اعمال
۲۰۲۳ [۱۳۳]	نمایش احساسات مبتنی بر برجسب‌ها که احساسات و شدت آن‌ها را با استفاده از یک نمایش متغیر، ارائه کرده و تغییر می‌دهد. همچنین، فرایندی برای فازی‌سازی تعریف شده که بر اساس یک جفت از مقادیر لذت و برانگیختگی، برجسب احساسی را در یک زبان خاص تعیین می‌کند؛ بنابراین، با استفاده از این مدل، عامل می‌تواند احساسات خود را با همان اصطلاحات فازی انسان‌ها ابراز کند. ادغام این مدل در معماری عامل دارای عاطفه GenIA3 تا بهبود شبیه‌سازی فرایندهای عاطفی مختلف. بررسی اینکه آیا نمایش احساسات با معرفی بعد سوم (سلطه) برای شناسایی بهتر احساساتی مانند ترس یا عصبانیت و تجزیه و تحلیل تأثیر این بعد بر رفتار اجتماعی قابل بهبود است یا خیر.	احساسات به صورت یک فضای پیوسته چندبعدی نمایش داده می‌شوند که این امکان را فراهم می‌آورد که اطلاعات بیشتری در مورد احساسات، مانند شدت و نزدیکی بین احساسات، ذخیره شود.	نیاز به انجام آزمایش‌هایی در محیط‌ها و فرهنگ‌های مختلف برای تطبیق مدل‌های احساسات	دو روش مبتنی بر منطق فازی برای نمایش و بیان احساسات

جدول ۷: مدل‌های محاسباتی IM: هدف

سال انتشار و مرجع	ایده اصلی	مزایا	معایب/چالش‌ها	روش یا الگوریتم
۲۰۱۸ [۸۸]	معرفی الگوریتم‌های اکتشاف هدف‌محور الهام‌گرفته شده از IM به‌منظور توانمند کردن ماشین‌ها به کشف مجموعه‌ای از سیاست‌ها که تنوعی از اثرات در محیط‌های پیچیده ایجاد می‌کنند.	این روش به ماشین‌ها امکان می‌دهد تا سیاست‌هایی را کشف کنند که تنوعی از اثرات را در محیط‌های پیچیده ایجاد کنند.	نیاز به نمایش‌های از قبل طراحی شده برای اکتشاف هدف‌محور	معماری اکتشاف هدفمند با IM با یادگیری بدون نظارت فضای هدف
۲۰۱۹ [۸۹]	با الهام از تنوع در تجربیات هدف در انسان‌ها، در RL چندهدفه، عامل یاد می‌گیرد چگونه با یک سیاست شرطی به هدف‌های مختلف برسد. معیار پاداش شامل بازگشت مورد انتظار و دستیابی به اهداف متنوع بیشتر است.	کمک به یافتن تنوع بیشتر در اهداف عامل هم‌زمان با بیشینه‌کردن بازگشت مورد انتظار	در حین تکرار تجربه، مسیرهای نمونه‌برداری شده نسبت به سیاست‌های رفتاری، جهت‌گیری دارند.	شبکه‌های عصبی عمیق و الگوریتم ^۱ DDPG [۱۰۶]
۲۰۱۹ [۱۳۴]	معرفی الگوریتمی نوآورانه به نام «تولید هدف از دیدگاه واپس‌نگری» که اهداف واپس‌نگری ارزشمندی را تولید می‌کند که برای یک عامل در مدت کوتاه قابل‌دستیابی هستند و همچنین در طولانی‌مدت برای راهنمایی عامل برای رسیدن به هدف واقعی مناسب هستند.	افزایش قابلیت اطمینان و کارایی در استفاده از الگوریتم‌های RL برای مسائل هدف‌گرا	پیچیدگی در یافتن اهدافی مناسب برای ایجاد سیاست برای عامل	بازپخش تجربه واپس‌نگر ^۲
۲۰۲۰ [۱۳۵]	معرفی الگوریتم جدیدی به نام «تولید هدف از دیدگاه واپس‌نگری مبتنی بر گراف» که اهداف واپس‌نگری را بر اساس کوتاه‌ترین فاصله‌ها در یک گراف جلوگیری از موانع انتخاب می‌کند که نمایانگر نمایش گسسته محیط است.	افزایش قابلیت اطمینان و کارایی در استفاده از الگوریتم‌های RL برای مسائل کنترل رباتیکی با موانع	پیچیدگی در ارزیابی عملکرد الگوریتم در محیط‌های واقعی	الگوریتم تولید هدف از دیدگاه واپس‌نگری مبتنی بر گراف (RL)
۲۰۲۱ [۱۳۶]	ارائه چارچوبی جدید برای آموزش یک سیاست سطح بالا با فضای عمل کاهش‌یافته توسط نقاط علامت زده، به نام «HRL راهنمایی شده توسط علامت‌ها»	افزایش کارایی در اکتشاف و ایجاد زیرهدف‌های معنادار برای آموزش در RL	افزایش زمان موردنیاز برای برنامه‌ریزی در هر مرحله آموزش	HRL هدف‌محور ^۳
۲۰۲۲ [۴۰]	ارائه رویکرد الگوریتمی به نام فرایندهای اکتشاف هدف IM در یادگیری خودکار برنامه‌ریزی شده	ایجاد یک سیستم یادگیری خودکار برنامه‌ریزی شده است که توانایی کاوش و یادگیری خودکار را به ماشین‌ها می‌دهد.	نیاز به سیستم درک و دریافت حسی مؤثر برای ماشین‌ها	چارچوب رسمی برای معماری الگوریتمی به نام فرایندهای اکتشاف هدفمند با RL (IMGEP ^۴)
۲۰۲۳ [۱۳۷]	این مقاله به دنبال حل چالش اکتشاف در RL در دامنه‌های بسیار بزرگ است و از رویکرد مبتنی بر هدف برای کاوش استفاده می‌کند.	امکان تعیین یک فضای پیش‌هدف بزرگ اما معنی‌دار و تبدیل آن به یک مجموعه کوچک‌تر از اهداف مفید	چالش امکان ادغام دو عنصر اصلی فضای پیش‌هدف و ارزیاب پیش‌هدف به‌صورت مؤثر	RL هدف‌محور
۲۰۲۳ [۱۳۸]	توسعه یک روش مؤثر برای یادگیری هدفمند در محیط‌هایی با تعداد بالایی از داده‌های آموزشی بدون پاداش	امکان حل وظایف با زمان طولانی، استفاده راحت از داده‌های بدون برچسب	محاسبه نادرست تابع ارزش - عمل برای وظایف با پویایی نامشخص محیط	RL هدف‌محور آفلاین
۲۰۲۴ [۱۳۹]	معرفی چارچوب نوآورانه‌ای به نام GEASD ^۵ که طراحی شده است تا الگوهای ساختاری محیط را از طریق توزیع مهارت‌های تطبیقی در طول فرایند یادگیری گرفته و بررسی کند.	بهبود کیفیت اکتشاف و پیشبرد در وظایفی که شامل پاداش‌های کم و زمان‌های طولانی است.	انعطاف‌پذیری در استفاده از مهارت‌ها در وضعیت‌های ناشناخته	توزیع مهارت‌های تطبیقی بر اساس توزیع بولتزمن از توابع ارزیابی مهارت‌ها برای تسهیل اکتشاف عمیق

¹ Deep Deterministic Policy Gradient

² Hindsight Experience Replay (HER)

³ Goal-conditioned hierarchical reinforcement learning

⁴ Intrinsically Motivated Goal Exploration Processes

⁵ Goal Exploration via Adaptive Skill Distribution



۶- یادگیری ماشین و انگیزش درونی

انگیزش درونی در یادگیری ماشین مفهومی است که از کنجکاوی انسان‌گونه الهام گرفته شده است، جایی که سیستم‌ها توسط پاداش‌های داخلی برای کاوش، یادگیری و تطبیق هدایت می‌شوند، بدون اینکه صرفاً به انگیزش‌های بیرونی متکی باشند. این رویکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین را، به‌ویژه در محیط‌هایی که پاداش‌های بیرونی خلوت یا تعریف آن‌ها دشوار است، تقویت می‌کند. با تعبیه مکانیسم‌هایی مانند تشخیص نوآوری، خطاهای پیش‌بینی یا اکتشاف مبتنی بر تعجب، مدل‌های یادگیری ماشین قادر به کاوش خودکار داده‌ها و یادگیری ویژگی می‌شوند. به‌عنوان مثال همان‌طور که اشاره شد، [۷۹] ماژول کنجکاوی ذاتی را معرفی می‌کند که اکتشاف را از طریق خطای پیش‌بینی تشویق می‌کند و به عامل‌ها اجازه می‌دهد تا استراتژی‌های جدیدی را در تنظیمات پاداش خلوت کشف کنند. این پیشرفت‌ها انگیزش درونی را به یک جنبه حیاتی در ساخت سیستم‌های یادگیری ماشین تطبیقی و قوی تبدیل می‌کند که می‌توانند در بین وظایف و محیط‌ها بهتر تعمیم یابند.

یادگیری با ناظر: نوعی از یادگیری ماشین است که در آن به الگوریتم، داده‌های ورودی و برجسب‌های خروجی صحیح مرتبط با آن داده می‌شود. هدف این روش، آموزش الگوریتم برای پیش‌بینی برجسب‌های خروجی برای داده‌های جدید و دیده نشده است. در این دسته، از انگیزش درونی برای ایجاد سیستم‌هایی استفاده می‌شود که می‌توانند به طور خودکار ویژگی‌های داده‌ای را شناسایی کنند که منجر به تعمیم و کارایی بهتر می‌شوند، بدون اینکه صرفاً به داده‌های برجسب‌دار متکی باشند. این رویکرد مدل‌ها را تشویق می‌کند تا بر یادگیری نمایش‌هایی تمرکز کنند که می‌توانند عملکرد را در وظایف مختلف بهبود بخشند، با تحریک اکتشاف مبتنی بر کنجکاوی در خود داده‌ها. به‌عنوان مثال، در طبقه‌بندی تصویر، انگیزش درونی به مدل‌ها کمک می‌کند با پیش‌بینی تحولات یا مناطق ماسک شده، همان‌طور که در مدل‌هایی مانند SimCLR [۱۵۵] دیده می‌شود، یاد بگیرند.

یادگیری بدون ناظر: در آن به الگوریتم تنها داده‌های ورودی داده می‌شود و الگوریتم باید به‌تنهایی الگوها و ساختارهای نهفته در داده‌ها را کشف کند. این نوع یادگیری برای کشف گروه‌های طبیعی داده‌ها (خوشه‌بندی)، کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی ناهنجاری‌ها کاربرد دارد. در یادگیری بدون ناظر، انگیزش درونی به مدل‌ها کمک می‌کند تا بدون نظارت خارجی داده‌ها را کاوش کنند و به آن‌ها اجازه می‌دهد تا ساختارها یا الگوهای پنهان را کشف کنند. این نوع انگیزه مبتنی بر پاداش‌های داخلی مانند نوآوری یا خطاهای پیش‌بینی است که مدل را هدایت می‌کند تا نمایش‌هایی را بیاموزد که با برجسب‌های از پیش تعریف‌شده مغرضانه نیستند؛ مانند کاربرد خودرمزگذارها یا شبکه‌های مولد متخاصم (GAN). این مدل‌ها با هدف تولید یا بازسازی داده‌ها و پالایش درک خود از توزیع‌های پیچیده داده از طریق اکتشاف مبتنی بر

کنجکاوی هدایت می‌شوند. تکنیک‌هایی مانند خودرمزگذارهای تغییرپذیر از انگیزش درونی برای تشویق یادگیری ویژگی بهتر و قابلیت‌های مولد استفاده کرده‌اند. به‌عنوان نمونه رمزگذاری پاداش عملکردی^۱، از یک خودرمزگذار تغییرپذیر مبتنی بر ترنسفورمر^۲ برای یادگیری نمایش‌های عملکردی از وظایف دلخواه از طریق رمزگذاری نمونه‌های حالت - پاداش استفاده می‌کند. این روش به عامل اجازه می‌دهد با استفاده از مجموعه‌ای از توابع پاداش بدون نظارت پیش‌آموزش شود و با حداقل داده‌های دارای برجسب پاداش به وظایف جدید انطباق پیدا کند [۱۵۶].

یادگیری خودنظارت شده: دسته‌ای از یادگیری ماشین است که در آن الگوریتم با ایجاد وظایف نظارتی از خود داده‌ها، خود را آموزش می‌دهد. به‌عنوان مثال، پیش‌بینی بخش گم‌شده یک تصویر یا پر کردن کلمات گم‌شده در یک جمله، از جمله وظایف خودنظارتی هستند. الگوریتم‌های این دسته، با استفاده از انگیزش درونی مدل‌ها را برای پیش‌بینی بخش‌های خاصی از داده‌ها از بخش‌های دیگر آموزش می‌دهد و از خود داده‌ها به‌عنوان سیگنال نظارتی استفاده می‌کند. این نوع یادگیری با انگیزش درونی مدل برای حل چالش‌های خودتنظیم هدایت می‌شود که منجر به درک عمیق‌تر از داده‌ها می‌شود. یادگیری خودنظارت‌شده در NLP با مدل‌هایی مانند BERT [۱۵۴] و GPT [۱۵۷] محبوبیت پیدا کرده است، جایی که مدل برای پیش‌بینی کلمات ماسک‌شده یا جملات بعدی آموزش داده می‌شود. این شکل از یادگیری به طور قابل‌توجهی از انگیزش درونی بهره‌مند می‌شود؛ زیرا به مدل‌ها اجازه می‌دهد وابستگی‌های داده‌ای و روابط معنایی را بدون حاشیه‌نویسی انسانی کاوش کنند.

یادگیری نیمه‌نظارت‌شده: ترکیبی از یادگیری با ناظر و بدون ناظر است. در این روش، الگوریتم هم به داده‌های برجسب‌گذاری شده و هم به داده‌های بدون برجسب دسترسی دارد. هدف این روش، استفاده از هر دو نوع داده برای بهبود عملکرد مدل است. در این روش، انگیزش درونی به مدل‌ها کمک می‌کند تا از داده‌های برجسب‌دار و بدون برجسب استفاده بهتری کنند. مکانیسم انگیزشی مدل‌ها را تشویق می‌کند تا با جستجوی الگوها یا ساختارهایی که آموزنده هستند و می‌توانند با داده‌های برجسب‌دار موجود همسو شوند، داده‌های بدون برجسب را کاوش و یاد بگیرند. یکی از کاربردها مدل Mean Teacher است که در آن یک مدل دانش‌آموز از یک مدل معلم که از طریق میانگین متحرک‌نمایی وزن‌های خود به‌روزرسانی می‌شود، یاد می‌گیرد. دانش‌آموز برای تطبیق پیش‌بینی‌های معلم انگیزه دارد و این امر باعث بهبود خود و استفاده بهتر از داده‌های بدون برجسب برای افزایش کارایی یادگیری می‌شود [۱۵۸].

یادگیری تقویتی: یکی از شاخه‌های مهم یادگیری ماشین است که به عامل‌ها می‌آموزد تا در تعامل با محیط، تصمیماتی بگیرند که منجر به حداکثر کردن پاداش تجمعی شوند. با توجه به رشد چشمگیر تحقیقات و توسعه‌های صورت‌گرفته در حوزه یادگیری تقویتی به همراه انگیزش

¹ Functional Reward Encoding FRE

² transformer-based variational auto-encoder

درونی و کاربردهای متنوع آن در زمینه‌هایی مانند بازی‌های رایانه‌ای، رباتیک و کنترل فرایندها، نیاز به بررسی جداگانه و تخصصی این حوزه امری ضروری است. بدین منظور، در بخش‌های آتی به طور مفصل به تبیین مبانی و کاربردهای متنوع یادگیری تقویتی پرداخته خواهد شد.

۶-۱- یادگیری تقویتی و انگیزش درونی

یکی از اهداف اصلی حوزه هوش مصنوعی تولید عامل‌هایی کاملاً خودمختار است که با محیط به‌منظور یادگیری رفتارهای بهینه تعامل داشته و از طریق آزمون و خطا و در طول زمان، آن را بهبود بخشند [۹۲]. برای رسیدن به این هدف، الگوریتم RL عملکردی موفق داشته است [۹۳، ۹۴]. تصور رایج این است که چارچوب محاسباتی RL تنها می‌تواند با انگیزش بیرونی مرتبط باشد، زیرا عامل RL دارای یک کانال ورودی متمایز است که سیگنال پاداش را از محیط خارجی آن دریافت می‌کند. بر خلاف این دیدگاه، این ادراک نتیجه عدم درک کامل ماهیت RL است که در حقیقت برای متحد شدن با انگیزش درونی مناسب است. بعلاوه ترکیب عناصر محاسباتی با سیستم‌های RL راه را برای توسعه بیشتر سیستم‌های یادگیری ماشین باز می‌کند [۲۲].

تقویت پلی بین هوش مصنوعی و روان‌شناسی است و مشارکتی برای متحد کردن هر دو دیدگاه انگیزش درونی و انگیزش بیرونی است [۲۲، ۲۶]. محیط شامل منتقدی است که عامل را در هر گام با ارزیابی (نمره عددی) رفتار فعلی عامل، تجهیز کرده است. منتقد وضعیت‌های محیط (یا احتمالاً جفت وضعیت-عمل یا حتی سه تایی وضعیت-عمل-وضعیت بعدی) را به سیگنال‌های پاداش عددی نگاشت می‌کند [۲۲]. مسئله‌ی پیش روی RL این است که، این روش یادگیری در محیطی که پاداش خلوت است و زمانی که کسب آن‌ها نیاز به هماهنگی توالی-های طولانی مدت دارد، دچار چالش جدی می‌شود. از طرفی اکثر کاربردهای دنیای واقعی یا نزدیک به آن، دارای این چنین شرایطی هستند. مشکل دیگر، مسئله تعمیم است [۹۶]. بعلاوه باید اشاره نمود چالش فضای حالت بی‌انتهای بدون محدوده باعث می‌شود اکتشاف به یک مسئله بسیار سختی مبدل گردد. حتی اگر جهان گسسته شود، اما با تعداد بسیار زیادی از وضعیت مواجه خواهیم بود [۴۱].

۶-۲- یادگیری تقویتی

عامل یادگیری همواره به دنبال انجام عملی است که بر طبق رفتارهای گذشته، انتظار عکس‌العمل مطلوب‌تر را از محیط داشته باشد [۹۵]. در یک مسئله یادگیری تقویتی با عاملی روبرو هستیم که از طریق سعی و خطا با محیط تعامل کرده و یاد می‌گیرد تا عملی را برای رسیدن به هدف انتخاب نماید. این الگوی رفتاری، به‌صورت محاسباتی فرموله شده و برای کنترل فرایندها و سیستم‌ها به کار برده می‌شود. به بیان ریاضی، یادگیری تقویتی، نگاشتی از وضعیتی که محیط در آن قرار دارد به رفتاری است که عامل باید انجام دهد، با هدف بیشینه‌کردن درجه رضایتمندی از محیط که می‌تواند به‌صورت تابعی از وضعیتی که محیط

در آن قرار دارد تعریف شود. تعریف فوق در بیان کنترلی به‌صورت زیر تغییر می‌یابد: یادگیری تقویتی نگاشتی است از بردار حالت سیستم تحت کنترل به خروجی کنترل‌کننده با هدف کمینه‌کردن تابع هزینه [۹۵]. در مدل یادگیری تقویتی استاندارد، یک عامل از طریق دریافت‌ها و اعمال با محیط ارتباط برقرار می‌نماید. در اینجا سعی می‌شود، نگاه دقیق‌تری به ساختار تعاملی عامل با محیط داشت. این ساختار، بر اساس مدل پیشنهادی [۳۷] می‌باشد که نقش منتقد را به محیط اضافه نموده است که در شکل ۲ قابل مشاهده است.

۶-۳- یادگیری تقویتی انگیزش درونی

ایده آغازین برای بررسی انگیزش درونی با استفاده از چارچوب یادگیری تقویتی در این است که فرایندهای یادگیری و تولید رفتار، به درونی یا بیرونی بودن سیگنال‌های پاداش اهمیتی نمی‌دهند و می‌توان فرایندهای مشابهی را برای هر دو در نظر گرفت [۲۲]. وقتی معیارهای بیان شده در روانشناسی در قالب مدل‌های محاسباتی انگیزش درونی ظهور و بروز پیدا کرده‌اند، زمانی که در چارچوب یادگیری تقویتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، نام انگیزش درونی خواهند گرفت [۸۸]. می‌توان گفت یادگیری تقویتی انگیزش درونی به نوعی همان یادگیری تقویتی سنتی است که به جای پاداش که مسئله عملی داده شده‌ی مشخصی باشد، از معیار اندازه‌گیری جذابیت استفاده می‌کند [۴۱]. منظور از جذابیت، عمل یا وضعیتی است که اکتشاف نشده است [۸۸]. سیستمی می‌تواند ساخته شود که یاد بگیرد که چگونه تریبی از اعمال را بدست آورد که مجموع پاداش تنزلی آینده را بیشینه کند [۴۱]. در محیط‌های واقعی و یا نزدیک به آن، کاربردی بودن در صورت عدم وجود ویژگی مارکوف^۱ یا فقدان نمایش جدولی، از جذابیت‌های انگیزش درونی محسوب می‌شود [۷۸]. محیط، صرفاً دنیای خارج از ربات یا حیوان نیست و شامل اجزای درونی آن‌ها نیز می‌شود. شکل ۳ بهبودیافته‌ی شکل ۲ است که محیط را به دو بخش خارجی و داخلی تقسیم کرده است. محیط خارجی نشان‌دهنده چیزی است که خارج از حیوان یا ربات است (ارگانیسم یا موجود زنده)، درحالی‌که محیط داخلی شامل اجزایی است که درون موجود زنده قرار دارد. هر دو مؤلفه با هم محیط عامل یادگیری تقویتی را شامل می‌شوند. این بهبود چارچوب یادگیری تقویتی روشن می‌کند که تمام سیگنال پاداش، درون موجود زنده تولید می‌شود. سیگنال‌های پاداش می‌توانند منشأهای مختلفی برای راه‌اندازی داشته باشند از قبیل: احساساتی که توسط اشیاء و رخدادها در محیط خارجی تولید می‌شوند، ترکیب تحریک خارجی و شرایط داخلی محیطی یا سیگنال‌های تولید شده توسط فعالیت‌های درونی محیط. همه این امکان‌ها می‌تواند با چارچوب RL سازگار باشد [۲۲]. اشمیدهور [۴۳، ۹۷] روش‌هایی برای پیاده‌سازی کنجکاو به وسیله‌ی پاداش یک عامل RL به‌منظور بهبود توانایی پیش‌بینی‌اش معرفی کرده است.

^۱ Markov



جدول ۸: مدل‌های محاسباتی IM: غافلگیری، کنجکاوی، (عدم) قطعیت

سال انتشار و مرجع	ایده اصلی	مزایا	معایب/چالش‌ها	روش یا الگوریتم
۲۰۱۹ [۸۰]	اصلی‌ترین ایده این مقاله استفاده از تخمین جریان نوری از حوزه بینایی ماشین برای مواجهه با مشکل تعادل بین کاوش و بهره‌برداری از تجربیات در وظایف با ابعاد بالا و پاداش‌های پراکنده در DRL است.	ارائه روشی برای مواجهه با مشکل فراموشی فاجعه‌بار ^۱ در کاوش مبتنی بر کنجکاوی	نیاز به استفاده از تخمین جریان نوری برای اندازه‌گیری جدید بودن حالت‌ها که ممکن است پیچیدگی بیشتری را به همراه داشته باشد.	تخمین جریان نوری از حوزه بینایی رایانه و استفاده از آن برای ایجاد جواز درونی برای انگیزه‌بخشی به کاوش عمیق
۲۰۲۰ [۱۴۰]	ترکیب RL مبتنی بر کنجکاوی با کنترل زمان‌بندی در یک سلول تولیدی روباتیک انعطاف‌پذیر. هدف از این کار، کاهش نیاز به تنظیمات دستی پاداش‌ها در مسائل پیچیده مهندسی مانند بهینه‌سازی زمان‌بندی است.	حذف بایاس استقرایی ناشی از تنظیمات دستی پاداش، کاهش پیچیدگی تنظیم پاداش‌ها، امکان انتقال مستقیم تابع پاداش از یک محیط تولیدی به محیط دیگر بدون نیاز به تنظیم مجدد	پیچیدگی در پایداری آموزش، نیاز به بررسی بیشتر برای بهبود عملکرد در محیط‌های پیچیده‌تر، کافی نبودن امکان استفاده از کنجکاوی به‌تنهایی در برخی موارد	RL مبتنی بر کنجکاوی است که از IM برای ایجاد پاداش‌ها استفاده می‌کند.
۲۰۲۱ [۱۴۱]	معرفی مفهوم «کنجکاوی سریع و کند» برای تشویق به کاوش در بازه‌های زمانی طولانی‌تر در RL. این روش با تجزیه پاداش کنجکاوی به دو نوع پاداش سریع برای کاوش محلی و پاداش کند برای کاوش سراسری، به دنبال افزایش بهره‌وری کاوش و بهبود عملکرد عامل‌ها در محیط‌های با پاداش‌های کم یا تأخیردار است.	بهبود بهره‌وری کاوش، افزایش انعطاف‌پذیری عامل‌ها در مواجهه با محیط‌هایی با پاداش‌های کم و تأخیردار، عملکرد بهتر نسبت به روش‌های قبلی در اکثر وظایف آزمایشی	پیچیدگی محاسباتی و نیاز به ارزیابی بیشتر برای تعمیم‌پذیری در محیط‌های مختلف	ترکیبی از پاداش‌های کنجکاوی سریع و کند است که بر اساس خطا در بازسازی مشاهدات توسط شبکه‌های بازسازی فرموله شده‌اند. این روش با الگوریتم‌های RL سیاستی ترکیب می‌شود.
۲۰۲۲ [۱۴۲]	استفاده از کنجکاوی مبتنی بر شگفتی بیزین در فضای پنهان برای هدایت کاوش در وظایف RL با پاداش کم.	کاهش هزینه‌های محاسباتی، بهبود عملکرد کاوش در محیط‌های مختلف، مقاومت در برابر تغییرات تصادفی در دینامیک محیط	پیچیدگی در پیاده‌سازی مدل‌های فضای پنهان، نیاز به تنظیم دقیق پارامترها	روش شگفتی بیزین در فضای پنهان ^۲ که با استفاده از تفاوت بین باورهای قبلی و پسینی عامل در فضای پنهان، کاوش را هدایت می‌کند.
۲۰۲۳ [۱۴۳]	بررسی و حل مشکل کاوش در محیط‌های دارای پاداش کم یا بدون پاداش با استفاده از کنجکاوی درونی. این روش از مفهوم «کنجکاوی در واپس‌نگری» ^۳ استفاده می‌کند تا تفاوت بین جنبه‌های پیش‌بینی‌پذیر و غیرقابل‌پیش‌بینی نتایج را با استفاده از مدل‌های علی ^۴ ساختاری یاد بگیرد.	قابلیت مقیاس‌پذیری ساده، مقاومت در برابر تصادفی بودن محیط، بهبود عملکرد کاوش در بازی‌های سخت مانند Montezuma's Revenge. این روش باعث می‌شود که عامل در مواجهه با نویز و تغییرات تصادفی گیر نکند.	پیچیدگی پیاده‌سازی مدل‌های ساختاری علی، نیاز به تنظیم دقیق پارامترها، بررسی کامل تأثیر تغییرات تصادفی محیط بر عملکرد کاوش	روش «کنجکاوی در واپس‌نگری» که با استفاده از مدل‌های ساختاری علی، تفاوت بین جنبه‌های پیش‌بینی‌پذیر و غیرقابل‌پیش‌بینی نتایج را یاد می‌گیرد.
۲۰۲۳ [۱۴۴]	معرفی یک تابع پاداش جدید برای IMRL که رفتار عامل‌های بازی را به‌گونه‌ای طراحی می‌کند که شبیه به رفتار انسان‌ها باشد. این روش بر اساس نظریه‌ای است که کنجکاوی را به‌عنوان شکاف اطلاعات تعریف می‌کند بنا شده است.	شباهت بیشتر به رفتار انسان، حفظ رقابت‌پذیری عامل، باورپذیری بیشتر آن در بازی‌های رایانه‌ای، کمک به توسعه‌دهندگان بازی جهت تست شبه‌انسانی	نیاز به داده‌های بیشتر برای تعمیم به سطوح و بازی‌های دیگر، پیچیدگی تنظیم تابع پاداش برای دستیابی به رفتار مطلوب، محدودیت آزمون‌ها محدود به یک بازی خاص	روش «کنجکاوی محتاطانه» است که بر اساس نظریه شکاف اطلاعات و منحنی U وارونه طراحی شده است. این روش با مدل کنجکاوی درونی ترکیب شده تا عامل‌ها را شبیه به انسان‌ها کند.
۲۰۲۴ [۱۴۵]	معرفی روشی برای جمع‌آوری داده‌های بدون نظارت با استفاده از کنجکاوی و فواصل زمانی تطبیقی برای RL آفلاین در چندین وظیفه. این روش به‌جای تمرکز صرف بر الگوریتم‌های یادگیری، بر بهبود فرایند جمع‌آوری داده‌ها	بهبود بازده محاسباتی و نمونه، جمع‌آوری داده‌های باکیفیت بالاتر برای وظایف پایین‌دستی مختلف، و توانایی تطبیق فواصل زمانی برای گسترش فضای	پیچیدگی پیاده‌سازی مکانیزم دسترسی و تطبیق فواصل زمانی اشاره، نیاز به ارزیابی جامع‌تری برای اطمینان از تعمیم‌پذیری نتایج به وظایف و محیط‌های مختلف.	روش «جمع‌آوری داده‌های بدون نظارت با استفاده از کنجکاوی» که از یک ماژول دسترسی برای تخمین احتمال دسترسی به حالت آینده k مرحله‌ای از حالت فعلی

³ Curiosity in Hindsight causal

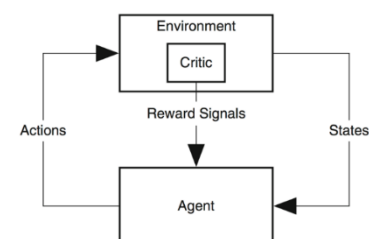
¹ Catastrophic Forgetting

² Latent Bayesian Surprise

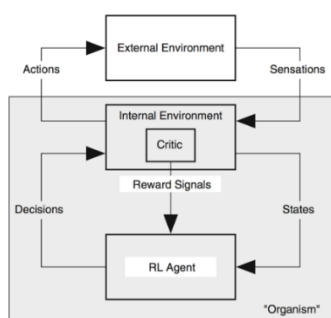


تأکید دارد تا فضای ویژگی‌های عامل‌ها گسترش یابد و داده‌های باکیفیت‌تری جمع‌آوری شود.	ویژگی‌ها، برتری بیشتری نسبت به روش‌های بدون نظارت.	استفاده می‌کند و فواصل زمانی را به طور تطبیقی تعیین می‌کند.
۲۰۲۴ [۱۴۶]	بهبود عملکرد در محیط‌های پیچیده‌تر مانند Ant، افزایش بازده یادگیری با استفاده از آستانه بالاتر KL Divergence و قابلیت تطبیق آلفا به صورت دینامیک برای یادگیری از مسیرهای ضعیف‌تر.	الگوریتم α MEPOL است که هدف آن پیش آموزش یک سیاست اکتشاف بدون نظارت و سپس تنظیم دقیق آن برای وظایف مختلف با استفاده از نظارت است. این مقاله با افزودن تغییراتی مانند اکتشاف مبتنی بر کنجکاوی و حداکثرسازی آنتروپی بهبودهای بیشتری را ایجاد کرده است.

ساتن^۱ با تعریف «جایزه (انعام) اکتشافی» یک عامل برای مشاهده وضعیت‌ها به نسبت مدت زمانی که از مشاهده قبلی گذشته است، پاداش می‌دهد، در نتیجه عامل تشویق می‌شود که فضای حالت گسترده‌ای را پوشش دهد [۲۲]. از طرفی رویکردهای ماژولار و سلسله‌مراتبی، به عنوان حوزه‌ای از هوش مصنوعی به دنبال راه حل‌های عمومی که معمولاً روی خلاقیت در انسان‌ها و سایر حیوانات تکیه می‌کنند، محسوب می‌شوند. می‌توان یک توازی بین مشخصات بینش باتوجه به روان‌شناسی و مشخصات سیستم‌های HRL برای عامل‌های مجسم ایجاد کرد. تکنیک‌های HRL توصیف بینش در انسان‌ها که شامل پیشرفت تحلیلی و توانایی بازسازی فضای جستجو است، تطابق دارند [۵۰]. در نتیجه، یکی از راه حل‌ها برای مشکل پاداش خلوت، استفاده از HRL است. راه حل آن، استفاده از مجموعه‌ای از اعمال موقتاً توسعه یافته یا گزینه‌هایی که هر کدام زیرهدف خودش را دارد. این زیراهداف، به صورت طبیعی برای وظایف خاصی ساخته می‌شوند [۹۶]. یادگیری در این تنظیمات نیازمند این است که عامل دانش را نمایش داده و در چندین سطح انتزاعی وابسته به فضا و زمان به منظور اکتشاف محیط به صورتی مؤثرتر عمل کند. اخیراً توابع غیرخطی تخمین‌زننده با RL ترکیب شده‌اند که یادگیری انتزاع‌ها روی فضای وضعیت با ابعاد بالای خلوت ممکن شده است. اما اکتشاف با بازخورد چالش اصلی است. عامل‌های انگیزش درونی می‌توانند رفتارهای جدید را برای خودشان اکتشاف کنند تا اهداف خارجی را مستقیماً حل نمایند [۹۸].



شکل ۲: تعامل عامل با محیط در RL [۳۷]



شکل ۳: تعامل عامل با محیط در RL-بهبودیافته شکل ۲ [۲۲]

¹ Sutton

² On-policy



۶-۴- یادگیری تقویتی عمیق

یادگیری عمیق به طور قابل توجهی یادگیری ماشین را پیشرفت داده است، به‌ویژه در کارهایی مانند تشخیص تصویر، تشخیص گفتار و ترجمه زبان. این روش در استخراج ویژگی‌های معنی‌دار از داده‌های با ابعاد بالا، کاهش مشکل ابعاد بالا، بسیار موفق است. این پیشرفت به یادگیری تقویتی نیز گسترش یافته است و منجر به حوزه DRL شده است. DRL از شبکه‌های عصبی برای توانمندسازی عامل‌ها برای یادگیری رفتارهای پیچیده و تصمیم‌گیری در محیط‌های پیچیده استفاده می‌کند [۹۲]. در ادامه روش‌های مختلف یادگیری عمیق مورد استفاده در ارتباط با RL مورد بحث قرار می‌گیرند که هر کدام مزایای منحصر به فردی در بهبود عملکرد و کاربرد در کارهای دنیای واقعی دارند.

شبکه‌های عمیق Q (DQN): با معرفی یادگیری عمیق برای تقریب مقادیر Q، انتقالی در این زمینه ایجاد کردند و به عامل‌ها اجازه دادند تا از داده‌های بصری خام بیاموزند [۱۰۴]. DQN از یک شبکه عصبی کانولوشنال (CNN) برای پردازش ورودی‌های تصویر و پیش‌بینی بهترین عمل در یک حالت داده شده استفاده می‌کند. تکنیک‌های کلیدی مانند پخش تجربه و شبکه‌های هدف برای تثبیت آموزش و جلوگیری از واگرایی پیاده‌سازی شدند. DQN اثربخشی خود را با شکست دادن بازیکنان انسانی در بازی‌های کلاسیک آتاری نشان داد و نقطه عطفی مهم در یادگیری تقویتی عمیق را رقم زد.

روش‌های گرادیان سیاست: گرادیان‌ها می‌توانند یک سیگنال یادگیری قوی در مورد چگونگی بهبود یک خط‌مشی پارامتری شده را ارائه دهند. از جمله این روش‌ها می‌توان به بهینه‌سازی سیاست مجاور (PPO) [۱۵۳] اشاره کرد که سیاست‌ها را مستقیماً با پارامترگذاری آن‌ها با شبکه‌های عصبی بهینه می‌کنند. PPO به‌ویژه برای ایجاد تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری با استفاده از یک تابع هدف محدود شده که پایداری آموزش را بهبود می‌بخشد، قابل توجه است. این روش‌ها برای کارهایی که شامل فضاهای عملی پیوسته و محیط‌های پیچیده هستند، جایی که روش‌های گسسته مانند DQN کوتاه می‌آیند، بسیار مناسب هستند.

روش‌های عامل - منتقد: روش‌های بازیگر - منتقد مزایای رویکردهای مبتنی بر سیاست و مبتنی بر ارزش را ترکیب می‌کنند و منجر به یادگیری کارآمدتر می‌شوند. گرادیان سیاست قطعی عمیق (DDPG) [۱۰۶] و بازیگر-منتقد مزیت ناهمگام (A3C) [۹۳] نمونه‌های قابل توجهی هستند. DDPG چارچوب عامل-منتقد را با استفاده از شبکه‌های عمیق برای نمایش هم عامل (سیاست) و هم منتقد (تابع ارزش) به وظایف کنترل پیوسته گسترش می‌دهد. A3C از موازی‌سازی برای به‌روزرسانی همزمان سیاست و تابع ارزش استفاده می‌کند و منجر به یادگیری سریع‌تر و پایدارتر می‌شود.

یادگیری تقویتی سلسله‌مراتبی: HRL با ادغام یادگیری عمیق، مدیریت وظایف پیچیده را با تجزیه آن‌ها به زیر وظایف که هر کدام

توسط یک شبکه عصبی متفاوت مدیریت می‌شوند، امکان‌پذیر می‌کند. این روش به عامل‌ها اجازه می‌دهد تا هم استراتژی‌های سطح بالا و هم اقدامات سطح پایین را هم‌زمان بیاموزند. [۹۸] رویکردی را معرفی کردند که در آن از یادگیری عمیق برای پیاده‌سازی ساختارهای وظیفه‌ای سلسله‌مراتبی استفاده می‌شد که ترویج اکتشاف و یادگیری استراتژیک‌تر را تسهیل می‌کرد.

۶-۵- یادگیری تقویتی عمیق انگیزش درونی

همان‌طور که اشاره شد رویکردهای پیشین، فاقد تعمیم‌پذیری بوده و در مسائل با ابعاد پایین کارایی دارند. بعلاوه نیاز دارند تا فضای عمل نیز گسسته باشد. این محدودیت‌ها باعث شده است که این الگوریتم‌ها با پیچیدگی حافظه، پیچیدگی محاسباتی و در یادگیری ماشین با پیچیدگی نمونه مواجه شوند [۹۲]. مشکل اصلی فضای پیوسته حسی حرکتی، ابعاد بسیار بالای آن است. اخیراً رویکردهایی که می‌توانند به صورت طبیعی در فضاهای عمل و/یا وضعیت پیوسته عملکردی امکان‌پذیر داشته باشند، معرفی شده‌اند [۱۰۲، ۱۰۳]. یادگیری عمیق، که مهم‌ترین مشخصه آن، شبکه‌های عصبی عمیق است می‌تواند به طور خودکار، بازنمایی (ویژگی‌ها) ابعاد پایین فشرده‌ای را از داده‌های با ابعاد بالا بیابد. این قابلیت می‌تواند در حوزه RL نیز تحولی ایجاد کند. یادگیری عمیق، RL را قادر می‌سازد تا به مسائل تصمیم‌گیری تعمیم یابد، مسائلی که قبلاً قابل کنترل نبودند یعنی مسائلی با ابعاد بالای فضای حالت و عمل [۱۰۴].

DRL در چگونگی بازی آتاری از پیکسل‌های خام ورودی [۹۳، ۱۰۴، ۱۰۵] به موفقیتی در موضوع یادگیری رسید، که از آن می‌توان به نقطه عطف تعبیر نمود. بعلاوه، DRL، پیشرفت شگرفی نیز بر حوزه‌ی وظایف کنترلی پیوسته داشته است. به طور نمونه، مهارت‌های جابه‌جایی [۱۰۶، ۱۰۷]، یادگیری رفتارهای دستکاری ماهرانه [۱۰۸] و آموزش بازوهای ربات برای وظایف دستکاری ساده. اخیراً از DRL در حل مسائل سخت با پاداش‌های خلوت نیز استفاده شده است [۱۰۹]. اودیر^۲ و همکاران استفاده از الگوریتم‌های یادگیری نمایش عمیق را برای یادگیری فضای هدف مناسب پیشنهاد داده‌اند. رویکرد پیشنهادی دارای دو فاز است: (۱) فاز یادگیری ادراکی (ترکیب یادگیری بازنمایی عمیق): الگوریتم‌های یادگیری عمیق با استفاده از تغییرات مشاهده حسگر خام غیر فعال^۳، اقدام به یادگیری فضای نهفته مورد نظر می‌کنند. (۲) فرآیند اکتشاف هدف به وسیله‌ی اهداف نمونه‌گیری در فضای پنهان. در این مقاله چارچوبی محاسباتی برای اشکال سطح بالای اکتشاف که فرآیندهای اکتشاف هدف RL می‌باشد، ارائه شده است [۴۱].

مقاله [۹۶] برای توانایی کنترل ویژگی‌های این چنین محیط‌هایی از الگوریتمی بهره برده است، که در آن عاملی که به صورت انگیزش درونی، جنبه‌های محیط خود را از طریق مجموعه‌ی گزینه‌ها کنترل می‌کند، طراحی شده است. معماری عامل از RL فئودال^۴ و DRL الهام گرفته

³ Passive

⁴ Feudal

¹ Deep Q-Network

² Oudeyer



الگوریتمی به نام Hierarchical-DQN ارائه شده است به گونه‌ای که مدل، تصمیمات را بر روی دو سطح سلسله‌مراتبی اتخاذ می‌کند [۹۸]: یکی ماژول سطح بالا (فرا کنترل کننده^۴): در وضعیت‌ها رخ می‌دهد و یک هدف جدید را انتخاب می‌کند (یادگیری یک سیاست بر روی اهداف ذاتی) و دیگری ماژول سطح پایین (کنترل کننده): با استفاده از هر دو مورد وضعیت و اهداف انتخابی برای انتخاب اعمال استفاده کرده تا به هدف برسد یا اپیزود خاتمه یابد (سیاست انجام اهداف هر گزینه را یاد می‌گیرد). سپس فرا کنترل کننده هدف دیگری را انتخاب کرده و گام‌های قبلی را تکرار می‌کند.

۷- محدودیت‌ها، کاربردها و کارهای آینده

۷-۱- محدودیت‌ها

پیچیدگی محاسباتی و نیاز به منابع زیاد: پیاده‌سازی انگیزش درونی اغلب شامل مدل‌های پیش‌بینی پیچیده و وظایف کمکی است که نیاز به منابع محاسباتی قابل‌توجهی دارند. برای مثال، آموزش مدل‌های یادگیری عمیق با انگیزش درونی نیازمند شبکه‌های اضافی برای پیش-بینی یا اندازه‌گیری تازگی است که می‌تواند زمان آموزش و نیازهای سخت‌افزاری را به شدت افزایش دهد.

زمان آموزش طولانی: آموزش عامل‌های هوش مصنوعی با انگیزش درونی می‌تواند زمان‌بر باشد، به‌ویژه زمانی که با محیط‌های مقیاس بزرگ و کارهای پیچیده سروکار داشته باشیم.

پتانسیل برای بیش‌برازش به تازگی: عامل‌های هدایت‌شده توسط انگیزش درونی ممکن است به جنبه جستجوی تازگی بیش‌برازش^۵ کنند و استراتژی‌هایی را توسعه دهند که IR را به حداکثر برسانند بدون این که به یادگیری بلندمدت کمک کند. این می‌تواند به رفتاری منجر شود که عامل به دنبال حالت‌های نامرتبط یا غیرمفید برود، صرفاً به دلیل این که آن‌ها جدید هستند، بدون این که به تکمیل وظیفه یا اهداف یادگیری گسترده‌تر کمک کند.

چالش‌های تعمیم‌پذیری: عامل‌هایی که توسط انگیزش درونی هدایت می‌شوند اغلب در تعمیم رفتارهای آموخته‌شده به وظایف یا محیط‌های مختلف دچار مشکل می‌شوند. مکانیزم‌های IR معمولاً به شرایط بستگی دارند و ممکن است زمانی که عامل در محیطی جدید با پویایی‌های متفاوت قرار می‌گیرد، به‌خوبی انتقال نیابند. در نتیجه، مدل‌های انگیزش درونی می‌توانند در مواجهه با کاربردهای پیچیده و واقعی که به یادگیری انتقالی قوی نیاز دارند، محدودیت داشته باشند.

۷-۲- کاربردها

چالش اصلی برای انگیزش درونی، کاربردپذیری آن به دلیل پیچیدگی نمونه بالای روش‌های پیشنهادی است؛

شده است. عامل دارای دو بخش است: ۱) فراکنترل کننده که پاداش بیرونی را به‌شینه می‌کند که شامل مجموعه‌ای گسسته از زیر اهداف است. ۲) زیرکنترل کننده^۱ که IR را شامل می‌شود. در صورت وجود انگیزش درونی، عملکرد عامل در محیط خلوت بهتر می‌شود. در [۱۱۰] از فضای وضعیت برای ساخت فضای هدف استفاده می‌شود (وضعیت-هایی با پتانسیل هدف بودن). مستقیماً با استفاده از فضای وضعیت به عنوان فضای هدف، سه سطح از گزینه‌ها را یاد می‌گیرد و فاصله بین هدف و وضعیت پایانی به عنوان پاداش در نظر گرفته می‌شود. [۹۹] متناسب با همین کار، به عنوان هدف، فاصله بین وضعیت ابتدایی و وضعیت پایان گزینه را در نظر می‌گیرد. IR مهارت‌ها را به سوی مناطق خاص فضایی (مکانی) هدایت می‌کند.

مقاله [۱۱۱] از خودرمنزنگار متغیر^۲ برای ساخت فضای ویژگی به عنوان هدف استفاده می‌کند که اطلاعات مفید و لازم در طول فشرده‌سازی وضعیت‌ها به بازنمایی جدید از دست نروند. اخیراً [۱۱۲] بهبودی را روی [۱۱۱] انجام داده است و به وضعیت‌های نادر، وزن اختصاص داده است تا منجر به سیاست‌های متنوع‌تری شود. در [۱۱۳] سعی شده است تا از قدرت انگیزش درونی و روش‌های سلسله‌مراتبی توأمان استفاده شود. بعلاوه شبکه‌های عصبی تصادفی با مفاهیم تئوری اطلاعات ترکیب شده است. این پژوهش یادگیری مهارت‌ها را به وسیله‌ی به‌شینه کردن معادله ۱ که IR است، انجام می‌دهد. I اطلاعات متقابل، τ مسیر^۳ در طول گزینه، s_t وضعیت ابتدایی، f تابعی که بخشی از مسیر را انتخاب می‌کند و g_t هدفی است که توسط سیاست درون گزینه‌ای یا نمونه‌برداری یکنواخت تهیه شده است.

$$R_{int}(s_t, g_t) = I(g_t, f(\tau) | s_t) \quad (1)$$

البته باید توجه داشت که فضای هدف در اینجا گسسته است. [۷۶] و [۱۱۴] ایده مشابه کار قبلی را ارائه می‌دهند با این تفاوت که در گسسته‌سازی (بهره‌گیری از شبکه عصبی) و انتخاب f به عنوان بخشی از مسیر مهارت در محیط با کار قبلی متفاوت هستند. [۱۱۴] $f(\tau)$ را به عنوان وضعیت مسیر انتخاب کرده و انگیزش درونی را در هر تکرار مسیر محاسبه می‌کند. [۷۶] با در نظر گرفتن $f(\tau)$ به عنوان مجموع همه وضعیت‌ها در مسیر و با تعیین پاداش در هر مسیر، روش متمایزی دارد. [۱۱۵] فضای هدف را به عنوان فضای وضعیت در نظر می‌گیرد، سپس با تلاش برای وضعیت پایانی مسیر به عنوان هدف صحیح در میان سایر اهداف انتخاب شده از توزیع مشابه با هدف واقعی، تقریب انجام می‌دهد. این مانند یادگیری برای یافتن نزدیک‌ترین هدف به وضعیت نهایی مجموعه‌ای از اهداف است. در [۱۱۶] عامل، رمز کردن مسیرها را به یک فضای پنهان یاد می‌گیرد. سپس به روشی مشابه، با استفاده از خودرمنزنگار متغیر، آن‌ها را رمزگشایی می‌کند. بعلاوه مسیرها به وسیله سیاست نهفته-مشروط تولید شده و رمزگشاهای سازگاری با هم را فرا می‌گیرند. این مقاله نتایج جذابی روی محیط‌های ساده با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی بدست آورده است.

^۴ Meta controller

^۵ Overfitting

^۱ Sub-controller

^۲ Variational auto-encoder (VAE)

^۳ Trajectory



جدول ۹: مقایسه برخی از مهم‌ترین الگوریتم‌های یادگیری تقویتی

سال انتشار و مرجع	روش	مؤلفه‌های کلیدی	کاربردها	مناسب برای محیط (گسسته/پیوسته)	نوع ورودی
۲۰۱۵ [۱۰۴]	Q-Learning عمیق (DQN)	شبکه عصبی پیچشی (CNN)، بازپخش تجربه، شبکه هدف	بازی‌ها و شبیه‌سازی‌های تصویری	گسسته	تصویری
۲۰۱۵ [۱۰۶]	بازیگر - منتقد پیوسته (DDPG)	شبکه بازیگر و منتقد، تجربه بازپخش	رباتیک پیوسته	پیوسته	برداری
۲۰۱۶ [۷۸]	اکتشاف مبتنی بر شمارش	شبه‌شمارش‌ها، مدل‌های احتمالی	اکتشافات در بازی‌ها	گسسته	برداری، تصویری
۲۰۱۷ [۱۵۳]	روش‌های سیاست‌محور (PPO)	گرادیان سیاست، تابع کلیپ شده برای بهینه‌سازی	رباتیک، بازی‌ها	هر دو	برداری، تصویری
۲۰۱۷ [۷۹]	روش‌های کنجکاوی محور (ICM)	ماژول کنجکاوی، خطای پیش‌بینی	شبیه‌سازی‌های رباتیک، بازی‌ها	هر دو	تصویری، برداری
۲۰۱۸ [۱۵۹]	تقطیر شبکه تصادفی (RND)	شبکه پیش‌بینی، شبکه هدف تصادفی	بازی‌ها، شبیه‌سازی‌ها	هر دو	تصویری
۲۰۱۸ [۱۶۰]	SAC (Soft Actor-Critic)	سیاست نرم، شبکه بازیگر و منتقد	کنترل رباتیک	پیوسته	برداری
۲۰۲۰ [۱۶۱]	DreamerV2	مدل‌سازی محیط، پیش‌بینی آینده	شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی	هر دو	برداری، تصویری
۲۰۲۰ [۱۶۲]	Muzero	ترکیب یادگیری مدل‌محور و سیاست‌محور	بازی‌های شطرنج، گو	هر دو	تصویری
۲۰۲۱ [۱۶۳]	Asymmetric Self-Play for Automatic Goal Discovery	بازی خودکار نامتقارن، سیاست مبتنی بر هدف، آموزش با پاداش‌های پراکنده	رباتیک و کنترل بازو، وظایف پیچیده مانند چیدن میز، روی هم چیدن بلوک‌ها، حل پازل	پیوسته	تصویری، برداری
۲۰۲۳ [۱۵۶]	Intrinsic Motivation with FRE	رمزگذاری پاداش عملکردی، خودرمزگذار تغییرپذیر	رباتیک و کنترل پیوسته	هر دو	برداری
۲۰۲۴ [۱۶۴]	Hierarchical Multi-Agent RL	معماری چندعاملی سلسله‌مراتبی، عامل متا، سیاست عامل - منتقد، دو جریان پردازشی (اطلاعات مکانی و زمانی)	وظایف همکاری در سیستم‌های چندعاملی پیچیده	پیوسته	برداری

یادگیری استفاده کنند، درحالی‌که همچنان بر دستیابی به نتایج خاص تمرکز دارند. تکنیک‌هایی که به طور پویا پاداش‌های درونی و بیرونی را متعادل می‌کنند، می‌توانند به حفظ تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری کمک کرده و از بروز تعارضات بین انواع مختلف انگیزش جلوگیری کنند. **ادغام با یادگیری انتقالی و متا - یادگیری:** یک جهت‌گیری آینده طراحی سیستم‌های انگیزش درونی است که به تعمیم بهتر در میان وظایف و حوزه‌ها کمک می‌کند. ادغام انگیزش درونی با یادگیری انتقالی^۱ و متا - یادگیری^۲ باعث می‌شود مدل‌های هوش مصنوعی بتوانند استراتژی‌های اکتشافی آموخته‌شده را با حداقل بازآموزی در محیط‌های جدید به کار گیرند. این پیشرفت برای کاربردهایی مانند رباتیک انطباقی که هوش مصنوعی باید در محیط‌های متنوع و غیرقابل پیش‌بینی عمل کند، ضروری خواهد بود.

ترکیب انگیزش درونی با معماری‌های شناختی مشابه انسان: ادغام انگیزش درونی در سیستم‌های هوش مصنوعی که برای شبیه‌سازی فرایندهای شناختی انسانی طراحی شده‌اند، مانند معماری‌های شناختی،

بنابراین، تنها تعداد محدودی از روش‌ها بر روی ربات‌های واقعی به نمایش گذاشته شده‌اند [۴۰، ۶۴، ۱۵۱-۱۴۷]. با این حال هیچ یک از این روش‌ها یادگیری موثری را در اکتشاف مبتنی بر هدف ارائه نکرده‌اند. به طور نمونه در [۸۷، ۴۰] ربات در طول اکتشاف حرکات تصادفی انجام می‌دهد که ناکارآمد و با حرکت انسان ناسازگار است. در مقابل [۵۳، ۵۴، ۶۴، ۱۵۲]، کارایی نمونه بالا و حرکت هدفمند را نشان داده‌اند. تنها روش‌هایی که با کارایی نمونه بالا قابل توجه هستند، روش‌هایی هستند که انگیزش درونی را با روش‌های بازپخش ذهنی ادغام کرده‌اند [۱۲۸، ۱۵۱].

۷-۳- کارهای آینده

بهبود هم‌راستایی پاداش‌های درونی و بیرونی: یکی از حوزه‌های کلیدی برای تحقیقات آینده، توسعه روش‌های بهتر برای هم‌راستایی انگیزش درونی با اهداف وظایف بیرونی است. این امر به سیستم‌های هوش مصنوعی اجازه می‌دهد تا از انگیزش درونی برای اکتشاف و

- [4] Cangelosi and M. Schlesinger, *Developmental robotics: From babies to robots*. MIT Press, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.7551/mitpress/9320.001.0001>.
- [5] K. Merrick, "Value systems for developmental cognitive robotics: A survey," *Cognitive Systems Research*, vol. 41, pp. 38-55, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cogsys.2016.08.001>.
- [6] M. Asada et al., "Cognitive developmental robotics: A survey," *IEEE transactions on autonomous mental development*, vol. 1, no. 1, pp. 12-34, 2009, doi: <https://dx.doi.org/10.1109/TAMD.2009.2021702>.
- [7] J. Reeve, *Understanding motivation and emotion*. John Wiley & Sons, 2014.
- [8] E. L. Deci, "Article commentary: on the nature and functions of motivation theories," *Psychological Science*, vol. 3, no. 3, pp. 167-171, 1992, doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9280.1992.tb00020.x>.
- [9] R. M. Ryan and E. L. Deci, "Intrinsic and extrinsic motivations: Classic definitions and new directions," *Contemporary educational psychology*, vol. 25, no. 1, pp. 54-67, 2000, doi: <http://dx.doi.org/10.1006/ceps.1999.1020>.
- [10] C. Darwin, *On the origin of species, 1859*. Routledge, 2004, doi: <http://dx.doi.org/10.9783/9780812200515>.
- [11] R. S. Woodworth, "Columbia University lectures: Dynamic psychology," 1918, doi: <http://dx.doi.org/10.1037/10015-000>.
- [12] C. L. Hull, "Principles of behavior: An introduction to behavior theory," 1943.
- [13] J. W. Atkinson and N. T. Feather, *A theory of achievement motivation*. Wiley New York, 1966.
- [14] L. Festinger, *A theory of cognitive dissonance*. Stanford university press, 1962, doi: <http://dx.doi.org/10.1515/9781503620766>.
- [15] S. Harter, "Effectance motivation reconsidered. Toward a developmental model," *Human development*, vol. 21, no. 1, pp. 34-64, 1978, doi: <http://dx.doi.org/10.1159/000271574>.
- [16] M. Csikszentmihalyi, *Beyond boredom and anxiety*. Jossey-Bass, 2000.
- [17] E. A. Locke, "Motivation through conscious goal setting," *Applied and preventive psychology*, vol. 5, no. 2, pp. 117-124, 1996, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0962-1849\(96\)80005-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0962-1849(96)80005-9).
- [18] M. E. Seligman, M. E. Seligman, and M. E. Seligman, "Helplessness: On depression, development, and death," 1975.
- [19] Bandura, "Self-efficacy: toward a unifying theory of behavioral change," *Psychological review*, vol. 84, no. 2, p. 191, 1977, doi: <http://dx.doi.org/10.1037/0033-295X.84.2.191>.
- [20] H. Markus, "Self-schemata and processing information about the self," *Journal of personality and social psychology*, vol. 35, no. 2, p. 63, 1977, doi: <http://dx.doi.org/10.1037/0022-3514.35.2.63>.
- [21] R. M. Ryan and E. L. Deci, "Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being," *American psychologist*, vol. 55, no. 1, p. 68, 2000, doi: <http://dx.doi.org/10.1037/0003-066X.55.1.68>.
- [22] G. Barto, "Intrinsic motivation and reinforcement learning," in *Intrinsically motivated learning in natural and artificial systems*: Springer, 2013, pp. 17-47, doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-32375-1_2.
- [23] E. L. Deci and R. M. Ryan, "The general causality orientations scale: Self-determination in personality," *Journal of research in personality*, vol. 19, no. 2, pp.

می‌تواند سیستم‌هایی را به وجود آورد که به روش‌هایی مشابه با انسان یاد بگیرند. با قراردادن محرک‌های کنجکاوی و اکتشاف در چارچوب‌هایی مانند ACT-R یا SOAR، عامل‌های هوش مصنوعی می‌توانند جنبه‌هایی از تصمیم‌گیری انسانی مانند حل مسئله مبتنی بر کنجکاوی و یادگیری تطبیقی را شبیه‌سازی کنند.

توسعه انگیزش درونی اجتماعی: سیستم‌های هوش مصنوعی آینده می‌توانند از انگیزش درونی اجتماعی بهره‌مند شوند، جایی که عامل‌ها نه تنها توسط کنجکاوی شخصی بلکه توسط عوامل اجتماعی مانند یادگیری یا همکاری با دیگر عامل‌ها ترغیب می‌شوند. این رویکرد به‌ویژه در محیط‌های چندعاملی و وظایف تعاونی که در آن‌ها هوش مصنوعی نیاز به همکاری با دیگر سیستم‌ها دارد، مهم خواهد بود.

ادغام با یادگیری خودنظارتی و هوش مصنوعی چندوجهی: یادگیری خودنظارتی به دلیل توانایی‌اش در استفاده از داده‌های بزرگ بدون برچسب برجسته شده است. مدل‌های انگیزش درونی آینده می‌توانند با این نوع از الگوریتم‌ها ادغام شوند تا کشف ویژگی‌های معنادار و یادگیری نمایش را تحریک کنند. علاوه بر این، ترکیب انگیزش درونی با یادگیری چندوجهی که در آن هوش مصنوعی می‌تواند هم‌زمان از متن، تصویر، صدا و ویدئو یاد بگیرد، امکان درک جامع‌تر و سازگاری بیشتری را فراهم می‌کند.

۸- نتیجه

توانایی شناختی و یادگیری مادام‌العمر در ارگانیسم‌های زنده به طور قابل توجهی از انگیزش درونی ناشی می‌شود. این انگیزش، بدون نیاز به پاداش‌های بیرونی، به موجودات زنده امکان می‌دهد تا به طور خودانگیخته به جستجو و اکتشاف بپردازند. این مقاله نشان می‌دهد که انگیزش درونی می‌تواند به طور مؤثر در سیستم‌های مصنوعی و ربات‌ها به کار گرفته شود تا یادگیری و توسعه خودمختار را بهبود بخشد. ترکیب الگوریتم‌های یادگیری تقویتی با مدل‌های انگیزش درونی، راهی امیدوارکننده برای ایجاد ربات‌هایی با توانایی‌های شناختی و ادراکی پیشرفته‌تر فراهم می‌کند. باین‌حال، چالش‌های عملی همچنان وجود دارند و نیازمند پژوهش‌های بیشتر و بهبود روش‌های کنونی هستند.

مراجع

- [1] M. Begum and F. Karray, "Computational intelligence techniques in bio-inspired robotics," in *Design and Control of Intelligent Robotic Systems*: Springer, 2009, pp. 1-28, doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-89933-4_1.
- [2] Lieto and D. P. Radicioni, "From human to artificial cognition and back: New perspectives on cognitively inspired ai systems," ed: Elsevier, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cogsys.2014.11.001>.
- [3] G. Baldassarre, T. Stafford, M. Mirolli, P. Redgrave, R. M. Ryan, and A. Barto, "Intrinsic motivations and open-ended development in animals, humans, and robots: an overview," *Frontiers in psychology*, vol. 5, p. 985, 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00985>.



- Motivated Learning in Natural and Artificial Systems*, pp. 49-72, 2013.
- [40] S. Forestier, Y. Mollard, and P.-Y. Oudeyer, "Intrinsically motivated goal exploration processes with automatic curriculum learning," *arXiv preprint arXiv:1708.02190*, 2017, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1708.02190>.
 - [41] P.-Y. Oudeyer, A. Baranes, and F. Kaplan, "Intrinsically motivated learning of real-world sensorimotor skills with developmental constraints," in *Intrinsically motivated learning in natural and artificial systems*: Springer, 2013, pp. 303-365, doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-32375-1_13.
 - [42] G. Baldassarre and M. Mirolli, "Deciding which skill to learn when: temporal-difference competence-based intrinsic motivation (TD-CB-IM)," in *Intrinsically Motivated Learning in Natural and Artificial Systems*: Springer, 2013, pp. 257-278, doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-32375-1_11.
 - [43] J. Schmidhuber, "A possibility for implementing curiosity and boredom in model-building neural controllers," in *Proc. of the international conference on simulation of adaptive behavior: From animals to animats*, 1991, pp. 222-227, doi: <http://dx.doi.org/10.7551/mitpress/3115.003.0030>.
 - [44] J. Schmidhuber, "Curious model-building control systems," in *Proc. international joint conference on neural networks*, 1991, pp. 1458-1463, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/IJCNN.1991.170605>.
 - [45] N. Roy and A. McCallum, "Toward optimal active learning through monte carlo estimation of error reduction," *ICML, Williamstown*, pp. 441-448, 2001.
 - [46] M. Mutti, R. De Santi, M. Restelli, "The importance of non-markovianity in maximum state entropy exploration," in *International Conference on Machine Learning*, 2022, pp. 16223-16239, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2202.03060>.
 - [47] P.-Y. Oudeyer, "Intelligent adaptive curiosity: a source of self-development," 2004.
 - [48] Kim, D., et al. "Accelerating reinforcement learning with value-conditional state entropy exploration," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 36, 2024.
 - [49] Q. Yang, M. Spaan, "Cem: Constrained entropy maximization for task-agnostic safe exploration," in *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2023, pp. 10798-10806, doi: <http://dx.doi.org/10.1609/aaai.v37i9.26281>.
 - [50] Colin, T., et al. "Hierarchical reinforcement learning as creative problem solving," in *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 86, pp. 196-206, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2016.08.021>.
 - [51] C. Tenorio-González and E. F. Morales, "Automatic discovery of concepts and actions," *Expert Systems with Applications*, vol. 92, pp. 192-205, 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2017.09.023>.
 - [52] Memmel, M., et al. "ASID: Active Exploration for System Identification in Robotic Manipulation," in *arXiv preprint arXiv:2404.12308*, 2024.
 - [53] R. Rayyes, H. Donat, J. Steil, "Efficient online interest-driven exploration for developmental robots," in *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 1367-1377, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TCDS.2020.3001633>.
 - [54] Rayyes, R., et al. "Interest-driven exploration with observational learning for developmental robots," in *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 373-384, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TCDS.2021.3057758>.
 - 109-134, 1985, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0092-6566\(85\)90023-6](http://dx.doi.org/10.1016/0092-6566(85)90023-6).
 - [24] R. W. White, "Motivation reconsidered: The concept of competence," *Psychological review*, vol. 66, no. 5, p. 297, 1959, doi: <http://dx.doi.org/10.1037/14156-005>.
 - [25] P.-Y. Oudeyer and F. Kaplan, "How can we define intrinsic motivation," in *Proc. of the 8th Conf. on Epigenetic Robotics*, 2008, vol. 5, pp. 29-31.
 - [26] S. Roohi, J. Takatalo, C. Guckelsberger, and P. Hämmäläinen, "Review of intrinsic motivation in simulation-based game testing," in *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2018: ACM, p. 347, doi: <http://dx.doi.org/10.1145/3173574.3173921>.
 - [27] D. Schunk, M. DiBenedetto, "Motivation and social cognitive theory," in *Contemporary educational psychology*, vol. 60, pp. 101832, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.1093/oxfordhb/9780195399820.013.0002>.
 - [28] M. Csikszentmihalyi, M. Csikszentmihalyi, *Flow: The psychology of optimal experience*. Harper & Row New York, 1990.
 - [29] Rhinehart, N., et al. "Information is power: Intrinsic control via information capture," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 34, pp. 10745-10758, 2021, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2112.03899>.
 - [30] Zhang, T., et al. "Made: Exploration via maximizing deviation from explored regions," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 34, pp. 9663-9680, 2021.
 - [31] M. Mirolli and G. Baldassarre, "Functions and mechanisms of intrinsic motivations," in *Intrinsically Motivated Learning in Natural and Artificial Systems*: Springer, 2013, pp. 49-72, doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-32375-1_3.
 - [32] R. De Charms, *Personal causation: The internal affective determinants of behavior*. Routledge, 2013.
 - [33] M. Csikszentmihalyi, "Toward a psychology of optimal experience," in *Flow and the foundations of positive psychology*: Springer, 2014, pp. 209-226, doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-9088-8_14.
 - [34] J. Schmidhuber, "Maximizing fun by creating data with easily reducible subjective complexity," in *Intrinsically motivated learning in natural and artificial systems*: Springer, 2013, pp. 95-128, doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-32375-1_5.
 - [35] Eppe, M., et al. "Intelligent problem-solving as integrated hierarchical reinforcement learning," in *Nature Machine Intelligence*, vol. 4, no. 1, pp. 11-20, 2022, doi: <http://dx.doi.org/10.1038/s42256-021-00433-9>.
 - [36] P. Redgrave and K. Gurney, "The short-latency dopamine signal: a role in discovering novel actions?," *Nature reviews neuroscience*, vol. 7, no. 12, p. 967, 2006, doi: <http://dx.doi.org/10.1038/nrn2022>.
 - [37] G. Barto, S. Singh, and N. Chentanez, "Intrinsically motivated learning of hierarchical collections of skills," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Development and Learning*, 2004, pp. 112-119.
 - [38] J. Schmidhuber, "Formal theory of creativity, fun, and intrinsic motivation (1990-2010)," *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, vol. 2, no. 3, pp. 230-247, 2010.
 - [39] M. Mirolli and G. Baldassarre, "Intrinsically motivated learning in natural and artificial systems," *Intrinsically*

- [69] E. Özbilge, "Experiments in online expectation-based novelty-detection using 3D shape and colour perceptions for mobile robot inspection," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 117, pp. 68-79, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2019.04.003>
- [70] S. Klyubin, D. Polani, and C. L. Nehaniv, "Empowerment: A universal agent-centric measure of control," in 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2005, vol. 1: IEEE, pp. 128-135, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/CEC.2005.1554676>.
- [71] P. Capdepuy, D. Polani, and C. L. Nehaniv, "Maximization of potential information flow as a universal utility for collective behaviour," in 2007 IEEE Symposium on Artificial Life, 2007: Ieee, pp. 207-213, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ALIFE.2007.367798>.
- [72] S. Mohamed and D. J. Rezende, "Variational information maximisation for intrinsically motivated reinforcement learning," in *Advances in neural information processing systems*, 2015, pp. 2125-2133.
- [73] K. Gregor, D. J. Rezende, and D. Wierstra, "Variational intrinsic control," *arXiv preprint arXiv:1611.07507*, 2016, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1611.07507>.
- [74] D. Emukpere, B. Wu, J. Perez, "SLIM: Skill Learning with Multiple Critics," in *arXiv preprint arXiv:2402.00823*, 2024, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2402.00823>.
- [75] F. Leibfried, S. Pascual-Diaz, and J. Grau-Moya, "A Unified Bellman Optimality Principle Combining Reward Maximization and Empowerment," *arXiv preprint arXiv:1907.12392*, 2019, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1907.12392>.
- [76] J. Achiam and S. Sastry, "Surprise-based intrinsic motivation for deep reinforcement learning," *arXiv preprint arXiv:1703.01732*, 2017, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1703.01732>
- [77] B. C. Stadie, S. Levine, and P. Abbeel, "Incentivizing exploration in reinforcement learning with deep predictive models," *arXiv preprint arXiv:1507.00814*, 2015, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1507.00814>.
- [78] M. Bellemare, S. Srinivasan, G. Ostrovski, T. Schaul, D. Saxton, and R. Munos, "Unifying count-based exploration and intrinsic motivation," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2016, pp. 1471-1479.
- [79] D. Pathak, P. Agrawal, A. A. Efros, and T. Darrell, "Curiosity-driven exploration by self-supervised prediction," in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2017, pp. 16-17, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/CVPRW.2017.70>.
- [80] H.-K. Yang, P.-H. Chiang, K.-W. Ho, M.-F. Hong, and C.-Y. Lee, "Never Forget: Balancing Exploration and Exploitation via Learning Optical Flow," *arXiv preprint arXiv:1901.08486*, 2019, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.08486>.
- [81] M. Salichs Sánchez-Caballero and M. Á. Malfaz Vázquez, "A new approach to modelling emotions and their use on a decision-making system for artificial agent," 2012.
- [82] D. Dörner and C. D. Güss, "PSI: A computational architecture of cognition, motivation, and emotion," *Review of General Psychology*, vol. 17, no. 3, pp. 297-317, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1037/a0032947>.
- [83] P. Sequeira, "Socio-emotional reward design for intrinsically motivated learning agents," *Unpublished doctoral dissertation*. Universidad Técnica de Lisboa, 2013.
- [55] M. Mutti and M. Restelli, "An Intrinsically-Motivated Approach for Learning Highly Exploring and Fast Mixing Policies," *arXiv preprint arXiv:1907.04662*, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.1609/aaai.v34i04.5968>.
- [56] V. G. Santucci, G. Baldassarre, and M. Mirolli, "GRAIL: a goal-discovering robotic architecture for intrinsically-motivated learning," *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 214-231, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TCDS.2016.2538961>.
- [57] J. Achterhold, M. Krimmel, J. Stueckler, "Learning temporally extended skills in continuous domains as symbolic actions for planning," in *Conference on Robot Learning*, 2023, pp. 225-236.
- [58] M. Schembri, M. Mirolli, and G. Baldassarre, "Evolving internal reinforcers for an intrinsically motivated reinforcement-learning robot," in 2007 IEEE 6th International Conference on Development and Learning, 2007: IEEE, pp. 282-287, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/DEVLRN.2007.4354052>.
- [59] Cartoni, E., et al. "REAL-X—Robot open-Ended Autonomous Learning Architecture: Building Truly End-to-End Sensorimotor Autonomous Learning Systems," in *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 2023, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TCDS.2023.3270081>.
- [60] Baranes and P.-Y. Oudeyer, "Intrinsically motivated goal exploration for active motor learning in robots: A case study," in 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010: IEEE, pp. 1766-1773, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2010.5651385>.
- [61] S. Hangl, V. Dunjko, H. J. Briegel, and J. Piater, "Skill learning by autonomous robotic playing using active learning and creativity," *arXiv preprint arXiv:1706.08560*, 2017, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1706.08560>.
- [62] H. Qureshi, Y. Nakamura, Y. Yoshikawa, and H. Ishiguro, "Intrinsically motivated reinforcement learning for human-robot interaction in the real-world," *Neural Networks*, vol. 107, pp. 23-33, 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neunet.2018.03.014>.
- [63] Chiappa, A., et al. "Acquiring musculoskeletal skills with curriculum-based reinforcement learning," in *bioRxiv*, pp. 2024-01, 2024, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuron.2024.09.002>.
- [64] D. Tanneberg, J. Peters, and E. Rueckert, "Intrinsic motivation and mental replay enable efficient online adaptation in stochastic recurrent networks," *Neural Networks*, vol. 109, pp. 67-80, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neunet.2018.10.005>.
- [65] U. Nehmzow, Y. Gatsoulis, E. Kerr, J. Condell, N. Siddique, and T. M. McGuinness, "Novelty detection as an intrinsic motivation for cumulative learning robots," in *Intrinsically Motivated Learning in Natural and Artificial Systems*: Springer, 2013, pp. 185-207, doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-32375-1_8.
- [66] S. Marsland, U. Nehmzow, and J. Shapiro, "A real-time novelty detector for a mobile robot," *arXiv preprint cs/0006006*, 2000, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.cs/0006006>.
- [67] H. V. Neto and U. Nehmzow, "Incremental PCA: An alternative approach for novelty detection," *Towards Autonomous Robotic Systems*, 2005.
- [68] D. Tanneberg, J. Peters, and E. Rueckert, "Online learning with stochastic recurrent neural networks using intrinsic motivation signals", in *Conference on Robot Learning*, 2017, pp. 167-174.



- [98] T. D. Kulkarni, K. Narasimhan, A. Saeedi, and J. Tenenbaum, "Hierarchical deep reinforcement learning: Integrating temporal abstraction and intrinsic motivation," in *Advances in neural information processing systems*, 2016, pp. 3675-3683.
- [99] O. Nachum, S. S. Gu, H. Lee, and S. Levine, "Data-efficient hierarchical reinforcement learning," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2018, pp. 3303-3313.
- [100] Levy, R. Platt, and K. Saenko, "Hierarchical actor-critic," arXiv preprint arXiv:1712.00948, 2017.
- [101] S. Vezhnevets et al., "Feudal networks for hierarchical reinforcement learning," in *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning-Volume 70*, 2017: JMLR. org, pp. 3540-3549.
- [102] D. J. Mankowitz, T. A. Mann, and S. Mannor, "Adaptive skills adaptive partitions (ASAP)," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2016, pp. 1588-1596.
- [103] P.-L. Bacon, J. Harb, and D. Precup, "The option-critic architecture," in *Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1609/aaai.v31i1.10916>.
- [104] V. Mnih et al., "Human-level control through deep reinforcement learning," *Nature*, vol. 518, no. 7540, p. 529, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.1038/nature14236>.
- [105] H. Van Hasselt, A. Guez, and D. Silver, "Deep reinforcement learning with double q-learning," in *Thirtieth AAAI conference on artificial intelligence*, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.1609/aaai.v30i1.10295>.
- [106] T. P. Lillicrap et al., "Continuous control with deep reinforcement learning," *arXiv preprint arXiv:1509.02971*, 2015, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1509.02971>.
- [107] N. Heess et al., "Emergence of locomotion behaviours in rich environments," *arXiv preprint arXiv:1707.02286*, 2017, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1707.02286>.
- [108] Rajeswaran et al., "Learning complex dexterous manipulation with deep reinforcement learning and demonstrations," arXiv preprint arXiv:1709.10087, 2017, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1709.10087>.
- [109] S. Gu, E. Holly, T. Lillicrap, and S. Levine, "Deep reinforcement learning for robotic manipulation with asynchronous off-policy updates," in *2017 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, 2017: IEEE, pp. 3389-3396.
- [110] T. Lesort, N. Díaz-Rodríguez, J.-F. Goudou, and D. Filliat, "State representation learning for control: An overview," *Neural Networks*, vol. 108, pp. 379-392, 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neunet.2018.07.006>.
- [111] V. Nair, V. Pong, M. Dalal, S. Bahl, S. Lin, and S. Levine, "Visual reinforcement learning with imagined goals," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2018 .pp. 9191-9200.
- [112] V. H. Pong, M. Dalal, S. Lin, A. Nair, S. Bahl, and S. Levine, "Skew-Fit: State-Covering Self-Supervised Reinforcement Learning," *arXiv preprint arXiv:1903.03698*, 2019, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1903.03698>.
- [113] Florensa, Y. Duan, and P. Abbeel, "Stochastic neural networks for hierarchical reinforcement learning," *arXiv preprint*
- [84] Z. Deng et al., "Deep structured models for group activity recognition," *arXiv preprint arXiv:1506.04191*, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1506.04191>.
- [85] M. McGrath, D. Howard, and R. Baker, "A lagrange-based generalised formulation for the equations of motion of simple walking models," *Journal of biomechanics*, vol. 55, pp. 139-143, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.02.013>.
- [86] Baranes and P.-Y. Oudeyer, "Active learning of inverse models with intrinsically motivated goal exploration in robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, no. 1, pp. 49-73, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2012.05.008>.
- [87] K. Seepanomwan, V. G. Santucci, and G. Baldassarre, "Intrinsically motivated discovered outcomes boost user's goals achievement in a humanoid robot," in *2017 Joint IEEE International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob)*, 2017: IEEE, pp. 178-183, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/DEVLRN.2017.8329804>.
- [88] Péré, S. Forestier, O. Sigaud, and P.-Y. Oudeyer, "Unsupervised learning of goal spaces for intrinsically motivated goal exploration," *arXiv preprint arXiv:1803.00781*, 2018, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.00781>.
- [89] R. Zhao, X. Sun, and V. Tresp, "Maximum Entropy-Regularized Multi-Goal Reinforcement Learning," *arXiv preprint arXiv:1905.08786*, 2019, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.08786>.
- [90] Ramamurthy, R., et al, "Novelty-guided reinforcement learning via encoded behaviors," in *2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2020, pp. 1-8, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/IJCNN48605.2020.9206982>.
- [91] Xu, H., et al. "Novelty is not surprise: Human exploratory and adaptive behavior in sequential decision-making," in *PLOS Computational Biology*, vol. 17, no. 6, pp. e1009070, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009070>.
- [92] K. Arulkumaran, M. P. Deisenroth, M. Brundage, and A. A. Bharath, "A brief survey of deep reinforcement learning," *arXiv preprint arXiv:1708.05866*, 2017, doi: <https://dx.doi.org/10.1109/MSP.2017.2743240>.
- [93] V. Mnih et al., "Asynchronous methods for deep reinforcement learning," in *International conference on machine learning*, 2016, pp. 1928-1937.
- [94] T. Schaul, J. Quan, I. Antonoglou, and D. Silver, "Prioritized experience replay," *arXiv preprint arXiv:1511.05952*, 2015, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1511.05952>.
- [95] R. S. Sutton and A. G. Barto, *Introduction to reinforcement learning* (no. 4). MIT press Cambridge, 1998, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TNN.1998.712192>.
- [96] N. Dilokthanakul, C. Kaplanis, N. Pawlowski, and M. Shanahan, "Feature control as intrinsic motivation for hierarchical reinforcement learning," *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TNNLS.2019.2891792>.
- [97] J. Schmidhuber, "Artificial curiosity based on discovering novel algorithmic predictability through coevolution," in *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, 1999, vol. 3: IEEE, pp. 1612-1618, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/CEC.1999.785467>

- of the genetic and evolutionary computation conference, 2018, pp. 21–28, doi: <http://dx.doi.org/10.1145/3205455.3205650>.
- [130] Wang, A., et al, "A unifying framework for social motivation in human-robot interaction," in *The AAAI*
- [131] *2020 Workshop on Plan, Activity, and Intent Recognition (PAIR 2020)*, 2020.
- [132] K. Iinuma, K. Kogiso. "Emotion-involved human decision-making model," in *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 543–561, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.1080/13873954.2021.1986846>.
- [133] Kirtay, M., et al. "Emotion as an emergent phenomenon of the neurocomputational energy regulation mechanism of a cognitive agent in a decision-making task," in *Adaptive Behavior*, vol. 29, no. 1, pp. 55–71, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.1177/1059712319880649>.
- [134] J. Taverner, E. Vivancos, V. Botti. "A Multidimensional Culturally Adapted Representation of Emotions for Affective Computational Simulation and Recognition," in *IEEE Transactions on Affective Computing*, vol. 14, no. 01, pp. 761–772, 2023, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TAFFC.2020.3030586>.
- [135] Ren, Z., et al. "Exploration via hindsight goal generation," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 32, 2019.
- [136] Bing, Z., et al. "Complex robotic manipulation via graph-based hindsight goal generation," in *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, vol. 33, no. 12, pp. 7863–7876, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TNNLS.2021.3088947>.
- [137] J. Kim, Y. Seo, J. Shin. "Landmark-guided subgoal generation in hierarchical reinforcement learning," in *Advances in neural information processing systems*, vol. 34, pp. 28336–28349, 2021.
- [138] Bagaria, A., et al. "Scaling goal-based exploration via pruning proto-goals," in *arXiv preprint arXiv:2302.04693*, 2023, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2302.04693>.
- [139] Park, S., et al, "Offline Goal-Conditioned RL with Latent States as Actions," in *ICML Workshop on New Frontiers in Learning, Control, and Dynamical Systems*, 2023.
- [140] L. Wu, K. Chen. "Goal Exploration via Adaptive Skill Distribution for Goal-Conditioned Reinforcement Learning," in *arXiv preprint arXiv:2404.12999*, 2024, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2404.12999>.
- [141] M. Hameed, M. Khan, A. Schwung. "Curiosity Based Reinforcement Learning on Robot Manufacturing Cell," in *arXiv preprint arXiv:2011.08743*, 2020, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2011.08743>.
- [142] N. Bougie, R. Ichise. "Fast and slow curiosity for high-level exploration in reinforcement learning," in *Applied Intelligence*, vol. 51, pp. 1086–1107, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10489-020-01849-3>.
- [143] Mazzaglia, P., et al, "Curiosity-driven exploration via latent bayesian surprise," in *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*, 2022, pp. 7752–7760, doi: <http://dx.doi.org/10.1609/aaai.v36i7.20743>.
- [144] Jarrett, D., et al. "Curiosity in hindsight: intrinsic exploration in stochastic environments," 2023, *arXiv:1704.03012*, 2017, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1704.03012>.
- [114] Eysenbach, A. Gupta, J. Ibarz, and S. Levine, "Diversity is all you need: Learning skills without a reward function," *arXiv preprint arXiv:1802.06070*, 2018, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1802.06070>.
- [115] Warde-Farley, T. Van de Wiele, T. Kulkarni, C. Ionescu, S. Hansen, and V. Mnih, "Unsupervised control through non-parametric discriminative rewards," *arXiv preprint arXiv:1811.11359*, 2018, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1811.11359>.
- [116] J. D. Co-Reyes, Y. Liu, A. Gupta, B. Eysenbach, P. Abbeel, and S. Levine, "Self-consistent trajectory autoencoder: Hierarchical reinforcement learning with trajectory embeddings," *arXiv preprint arXiv:1806.02813*, 2018, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.02813>.
- [117] Ozbilge, E. Ozbilge. "Fusion of Novelty Detectors Using Deep and Local Invariant Visual Features for Inspection Task," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 121032–121047, 2022, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3222810>.
- [118] Modirshanechi, A., et al. "The curse of optimism: a persistent distraction by novelty," in *bioRxiv*, pp. 2022–07, 2022.
- [119] Le, H., et al, "Beyond Surprise: Improving Exploration Through Surprise Novelty," in *AAMAS*, 2024, pp. 1084–1092.
- [120] H. Jiang, Z. Ding, Z. Lu. "Settling Decentralized Multi-Agent Coordinated Exploration by Novelty Sharing," in *arXiv preprint arXiv:2402.02097*, 2024, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2402.02097>.
- [121] R. Zhao, P. Abbeel, S. Tiomkin. "Efficient online estimation of empowerment for reinforcement learning," in *arXiv preprint arXiv:2007.07356*, 2020, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2412.07762>.
- [122] Choi, J., et al. "Variational empowerment as representation learning for goal-based reinforcement learning," in *arXiv preprint arXiv:2106.01404*, 2021, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2106.01404>.
- [123] Brändle, F., et al. "Intrinsically motivated exploration as empowerment," 2022.
- [124] Dai, S., et al. "An empowerment-based solution to robotic manipulation tasks with sparse rewards," in *Autonomous Robots*, vol. 47, no. 5, pp. 617–633, 2023, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10514-023-10087-8>.
- [125] Brändle, F., et al. "Empowerment contributes to exploration behaviour in a creative video game," in *Nature Human Behaviour*, vol. 7, no. 9, pp. 1481–1489, 2023, doi: <http://dx.doi.org/10.1038/s41562-023-01661-2>.
- [126] Becker-Ehmck, P., et al, "Exploration via empowerment gain: Combining novelty, surprise and learning progress," in *ICML 2021 Workshop on Unsupervised Reinforcement Learning*, 2021.
- [127] Heiden, T., et al, "Reliably Re-Acting to Partner's Actions with the Social Intrinsic Motivation of Transfer Empowerment," in *ALIFE 2022: The 2022 Conference on Artificial Life*, 2022.
- [128] Andrychowicz, M., et al. "Hindsight experience replay," in *Advances in neural information processing systems*, vol. 30, 2017.
- [129] Guzzi, J., et al, "A model of artificial emotions for behavior-modulation and implicit coordination in multi-robot systems," in *Proceedings*



- 2024, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2402.17135>.
- A. Radford. "Improving language understanding by generative pre-training," 2018.
- [158] Tarvainen, H. Valpola. "Mean teachers are better role models: Weight-averaged consistency targets improve semi-supervised deep learning results," in *Advances in neural information processing systems*, vol. 30, 2017.
- [159] Burda, Y., et al. "Exploration by random network distillation," in *arXiv preprint arXiv:1810.12894*, 2018, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1810.12894>.
- [160] Haarnoja, T., et al, "Soft actor-critic: Off-policy maximum entropy deep reinforcement learning with a stochastic actor," in *International conference on machine learning*, 2018, pp. 1861–1870.
- [161] Hafner, D., et al. "Dream to control: Learning behaviors by latent imagination," in *arXiv preprint arXiv:1912.01603*, 2019, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1912.01603>.
- [162] Schrittwieser, J., et al. "Mastering atari, go, chess and shogi by planning with a learned model," in *Nature*, vol. 588, no. 7839, pp. 604–609, 2020, doi: <https://dx.doi.org/10.1038/s41586-020-03051-4>.
- [163] OpenAI, O., et al. "Asymmetric self-play for automatic goal discovery in robotic manipulation," in *arXiv preprint arXiv:2101.04882*, 2021, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2101.04882>.
- [164] Cao, J., et al. "Hierarchical multi-agent reinforcement learning for cooperative tasks with sparse rewards in continuous domain," in *Neural Computing and Applications*, vol. 36, no. 1, pp. 273–287, 2024, doi: <https://dx.doi.org/10.1007/s00521-023-08882-6>.
- [165] J. Lehman, K. Stanley. "Abandoning objectives: Evolution through the search for novelty alone," in *Evolutionary computation*, vol. 19, no. 2, pp. 189–223, 2011, doi: http://dx.doi.org/10.1162/EVCO_a_00025.
- [166] Nguyen, D., et al, "Social Motivation for Modelling Other Agents under Partial Observability in Decentralised Training," in *IJCAI*, 2023, pp. 4082–4090, doi: <https://dx.doi.org/10.24963/ijcai.2023/454>.
- [167] Duminy, N., et al. "Intrinsically motivated open-ended multi-task learning using transfer learning to discover task hierarchy," in *Applied Sciences*, vol. 11, no. 3, pp. 975, 2021, doi: <https://dx.doi.org/10.3390/app11030975>.
- [145] C. Zhou, T. Machado, C. Harteveld, "Cautious curiosity: a novel approach to a human-like gameplay agent," in *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment*, 2023, pp. 370–379, doi: <https://dx.doi.org/10.1609/aiide.v19i1.27533>.
- [146] C. Sun, H. Qian, C. Miao, "CUDC: A Curiosity-Driven Unsupervised Data Collection Method with Adaptive Temporal Distances for Offline Reinforcement Learning," in *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2024, pp. 15145–15153, doi: <https://dx.doi.org/10.1609/aaai.v38i13.29437>.
- [147] Dewan, S., et al. "Curiosity & Entropy Driven Unsupervised RL in Multiple Environments," in *arXiv preprint arXiv:2401.04198*, 2024, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2401.04198>.
- [148] P. Oudeyer, F. Kaplan, V. Hafner. "Intrinsic motivation systems for autonomous mental development," in *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 11, no. 2, pp. 265–286, 2007, doi: <https://dx.doi.org/10.1109/TEVC.2006.890271>.
- [149] S. Hart, R. Grupen. "Learning generalizable control programs," in *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, vol. 3, no. 3, pp. 216–231, 2011, doi: <https://dx.doi.org/10.1109/TAMD.2010.2103311>.
- [150] N. Duminy, D. Duhaut, undefined. others, "Strategic and interactive learning of a hierarchical set of tasks by the Poppy humanoid robot," in *2016 Joint IEEE International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob)*, 2016, pp. 204–209, doi: <https://dx.doi.org/10.1109/DEVLRN.2016.7846820>.
- [151] Gerken, M. Spranger, "Continuous Value Iteration (CVI) Reinforcement Learning and Imaginary Experience Replay (IER) for learning multi-goal, continuous action and state space controllers," in 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2019, pp. 7173–7179, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794347>.
- [152] R. Rayyes, H. Donat, J. Steil, "Hierarchical interest-driven goal babbling for efficient bootstrapping of sensorimotor skills," in *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2020, pp. 1336–1342, doi: <https://dx.doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196763>.
- [153] Huang, S., et al. "Learning gentle object manipulation with curiosity-driven deep reinforcement learning," *arXiv preprint arXiv:1903.08542*, 2019, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1903.08542>.
- [154] Schulman, J., et al. "Proximal policy optimization algorithms," in *arXiv preprint arXiv:1707.06347*, 2017, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1707.06347>.
- [155] J. Lee, K. Toutanova. "Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding," in *arXiv preprint arXiv:1810.04805*, vol. 3, no. 8, 2018, doi: <https://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1810.04805>.
- [156] Chen, T., et al, "A simple framework for contrastive learning of visual representations," in *International conference on machine learning*, 2020, pp. 1597–1607.
- [157] Frans, K., et al. "Unsupervised Zero-Shot Reinforcement Learning via Functional Reward Encodings," in *arXiv preprint arXiv:2402.17135*,

Fuzzy decision-making system for prioritizing processes to determine optimal strategies

Hossein Akbari¹, Mehdi Bagherizadeh^{2*}

¹ Department of Information Iran technology management, Science And Research Brach, Islamic Azad University, Tehran, Iran
 akbarti12@gmail.com

² Department of Computer Engineering, Rafsanjan Branch, Islamic Azad University, Rafsanjan, Iran
 m.bagherizadeh@srbiau.ac.ir

Abstract: In the age of information and digital transformation of businesses, knowledge management is recognized as a key factor in creating sustainable competitive advantage. This article aims to provide a practical solution for organizations to effectively leverage their knowledge by proposing a decision-making model based on a fuzzy system. Specifically, a novel decision-making model based on a fuzzy system is introduced; which, by utilizing a cloud space alongside binary values of zero and one, helps organizations prioritize their knowledge management processes and choose the optimal strategy for implementing these processes. The proposed model, considering both qualitative and quantitative factors affecting knowledge management, assists organizations in identifying their key processes and focusing their resources on achieving strategic goals through proper prioritization. The results of this article show that the proposed model not only improves organizational performance but can also be used as a powerful management tool across various industries. Additionally, the findings of this paper can serve as a valuable reference for managers and decision-makers in different organizations.

Keywords: Knowledge Management, Fuzzy Rule-Based System, Knowledge Management Approaches (Strategies), Knowledge Management Processes, Knowledge Management Factors

JCDSA, Vol. 2, No. 4, Winter 2025

Received: 2025-01-03

Online ISSN: 2981-1295

Accepted: 2025-02-22

<https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa>: Journal Homepage

Published: 2025-03-20

CITATION

Akbari, H., Bagherizadeh, M., "Instructions and Formatting Rules for Authors of Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA)", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 2, No. 4, pp. 54-69, 2025.

DOI: 00.00000/0000

COPYRIGHTS



©2024 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

Introduction

In the age of information and knowledge, organizations face challenges like market volatility, rapid technological changes, and intense competition. Knowledge, as a strategic asset, plays a key role in achieving competitive advantage. Knowledge management allows organizations to manage both tacit and explicit knowledge, improving decision-making, innovation, and organizational learning.

Studies have shown that efficient knowledge management processes enhance organizational performance. For example, Basra Fernandez (2015) found that organizations with effective knowledge management are better at adapting to market changes. However, more precise models are needed, especially in knowledge-intensive industries, to prioritize key processes and strategies. This paper aims to explore the role of knowledge management in improving organizational performance, particularly in knowledge-based industries. It reviews relevant frameworks, examines factors affecting success, and assesses the relationship between knowledge management and performance. The findings will help managers implement effective knowledge management strategies to improve organizational performance.

Methodology

The foundation of every science is its understanding, and the credibility and value of the laws of any science rely on the methodology used within that field. The methodology applied in this paper is developmental-applied in terms of its objective and is categorized as descriptive based on its nature and method. To filter the identified factors, the Likert technique was used. The opinions of experts, as utilized in Fernandez's research, were examined. In the final step, to prioritize the factors influencing the implementation of knowledge management strategies, the fuzzy technique, specifically the MAMDANI & SUGINO methods, is employed.

Results and discussion

The comparison between the MAMDANI and SUGINO methods and the results obtained from Khadiyor and colleagues' research shows almost identical results. The knowledge management strategy determined by the proposed method for Darougar Company is a system-based strategy, and the results indicate that the proposed method has not only determined the strategy but also taken into account and prioritized the processes related to knowledge management. Adhering to a knowledge management strategy within an organization requires implementing processes corresponding to it. Prioritizing knowledge management processes based on dependency factors may lead to a process that is not aligned with the established strategy being prioritized for implementation. Implementing this process, which has been prioritized for execution due to its dependency factors, not only defines the knowledge management processes but also sets the strategy related to them.

When comparing the proposed method with Fernandez's method, the proposed method was able to not only control the ambiguity and uncertainty in assessing the dependency factors but also provided a more accurate prioritization of knowledge management processes. Furthermore, the proposed method successfully determined the knowledge management strategy by aligning processes and strategies. Compared to the method of Khadiyor and colleagues, the proposed method was able to not only determine the appropriate knowledge management strategy but also prioritize the related processes, providing a more precise solution for implementing knowledge management in an organization according to its specific realities. Additionally, the proposed method, by specifying the priority levels of each knowledge management process, provides a clear solution that explicitly defines how to combine both strategies to achieve the necessary synergy.

Conclusion

This paper aims to examine the role of knowledge management in enhancing organizational performance, particularly in knowledge-based industries. The paper reviews the relevant literature, explores various knowledge management frameworks, and examines the factors influencing its success. Additionally, using both quantitative and qualitative methods, the relationship between knowledge management and organizational performance indicators will be assessed. The results of this paper can help managers develop and implement effective knowledge management strategies and achieve significant improvements in organizational performance.





سیستم تصمیم گیری فازی برای اولویت بندی فرآیندها به منظور تعیین استراتژی های بهینه

حسین اکبری^۱، مهدی باقری زاده^۲*

^۱گروه مدیریت فناوری اطلاعات، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (akbari12@gmail.com)

^۲گروه مهندسی کامپیوتر، واحد رفسنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، رفسنجان، ایران (m.bagherizadeh@srbiau.ac.ir)

چکیده: در عصر اطلاعات و دیجیتال شدن کسب و کارها، مدیریت دانش به عنوان یک عامل کلیدی در ایجاد مزیت رقابتی پایدار شناخته شده است. این مقاله با هدف ارائه یک راهکار عملی برای سازمان ها در جهت بهره برداری موثر از دانش خود، یک مدل تصمیم گیری مبتنی بر سیستم فازی را ارائه می دهد. در واقع در این مقاله، یک مدل نوین تصمیم گیری مبتنی بر سیستم فازی ارائه شده است که با بهره گیری از فضای ابری کنار دو عدد صفر و یک، به سازمان ها کمک می کند تا فرایندهای مدیریت دانش خود را اولویت بندی کرده و استراتژی بهینه ای برای پیاده سازی این فرایندها انتخاب کنند. این مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن عوامل کیفی و کمی موثر بر مدیریت دانش، به سازمان ها کمک می کند تا فرایندهای کلیدی خود را شناسایی کرده و با اولویت بندی مناسب، منابع خود را به سمت دستیابی به اهداف استراتژیک متمرکز کنند. نتایج این مقاله نشان می دهد که مدل پیشنهادی نه تنها در بهبود عملکرد سازمان ها مؤثر است، بلکه می تواند به عنوان یک ابزار مدیریتی قدرتمند در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد. همچنین نتایج این مقاله می تواند به عنوان یک مرجع ارزشمند برای مدیران و تصمیم گیران در سازمان های مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: مدیریت دانش، سیستم فازی مبتنی بر قانون، رویکردهای (استراتژی ها) مدیریت دانش، فرایندهای مدیریت دانش، فاکتورهای مدیریت دانش

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۰۴

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴

دانش محور، نیاز به مدل هایی دقیق تر برای اولویت بندی فرایندهای کلیدی و تعیین استراتژی های بهینه همچنان احساس می شود.

این مقاله با هدف بررسی نقش مدیریت دانش در ارتقای عملکرد سازمان ها، به ویژه در صنایع دانش محور، انجام شده است. در این مقاله، ضمن مرور ادبیات مرتبط، به بررسی چارچوب های مختلف مدیریت دانش و عوامل مؤثر بر موفقیت آن پرداخته می شود. در این مقاله می خواهیم بدانیم استفاده از منطق فازی چه اثری برای شناسایی و رتبه بندی رویکرد های مدیریت دانش دارد. نتایج این مقاله می تواند به مدیران کمک کند تا استراتژی های مؤثر برای مدیریت دانش را تدوین و اجرا نمایند و بهبودهای چشمگیری در عملکرد سازمان ایجاد کنند. در ادامه این مقاله در بخش ۲ مطالعه و مرور پیشینه نظری و پژوهشی و در بخش ۳ چالش پژوهش های پیشین و در بخش ۴ بررسی روش پیشنهادی برای سیستم تصمیم گیری فازی برای اولویت بندی فرایندها به منظور تعیین استراتژی های بهینه و در بخش ۵ طراحی سیستم تصمیم گیری فازی برای اولویت بندی فرایندها و بررسی نتایج و در انتها بحث در مورد نتیجه های به دست آمده در این مقاله آورده شده است.

۱- مقدمه

در عصر اطلاعات و دانش، سازمان ها با چالش های پیچیده ای همچون افزایش نوسانات بازار، تغییرات سریع فناوری و رقابت فشرده مواجه هستند. در چنین شرایطی، دانش به عنوان یک دارایی استراتژیک، نقش محوری در دستیابی به برتری رقابتی ایفا می کند. مدیریت دانش فرایندی است که به سازمان ها امکان می دهد تا دانش ضمنی و صریح کارکنان خود را شناسایی، خلق، ذخیره، اشتراک گذاری و به کار گیرند. این فرایند منجر به بهبود تصمیم گیری ها، افزایش نوآوری، تقویت یادگیری سازمانی و در نهایت دستیابی به مزیت رقابتی پایدار می گردد. پژوهش های متعددی در زمینه مدیریت دانش و تأثیر آن بر عملکرد سازمان ها انجام شده است. برای مثال، [۱] به بررسی رابطه میان مدیریت دانش و نوآوری در سازمان ها پرداخته است و نشان داده که سازمان های دارای فرایندهای مدیریت دانش کارآمد، از توانایی بالاتری در پاسخ به تغییرات بازار برخوردار هستند. همچنین، [۲] مدل هایی برای اولویت بندی فرایندهای مدیریت دانش ارائه کرده اند که می توانند به بهبود کارایی سازمان کمک کند. با این حال، به ویژه در صنایع



۲- پیشینه پژوهش

مدیریت دانش به‌عنوان یک عامل حیاتی در تحقق مزیت رقابتی پایدار شناخته شده است. در این راستا، پژوهش‌های زیادی در مورد ابعاد مختلف مدیریت دانش انجام شده است. یکی از مدل‌های مشهور مدیریت دانش، مدل SECI [۳] است که فرایندهای اجتماعی‌سازی، ترکیب، داخلی‌سازی و به‌اشتراک‌گذاری دانش را برای خلق و بهره‌برداری از دانش در سازمان‌ها معرفی می‌کند. این مدل به‌ویژه در صنایع دانش‌محور از اهمیت زیادی برخوردار است و نشان‌دهنده اهمیت ایجاد و انتقال دانش ضمنی است [۴]. در همین راستا، [۵] مدیریت دانش را به‌عنوان یک فرآیند پیچیده و چندبعدی تعریف کرده و به بررسی تأثیر آن بر نوآوری و عملکرد سازمانی پرداخته‌اند. آنها بر این باورند که سازمان‌هایی که فرایندهای مدیریت دانش مؤثری دارند، قادر به پاسخگویی سریع‌تر به تغییرات بازار و افزایش رقابت‌پذیری خود خواهند بود. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی بر روی اولویت‌بندی فرایندهای مدیریت دانش تمرکز کرده‌اند. در این زمینه، مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند AHP^۱ و ANP^۲ کاربرد زیادی داشته‌اند [۶]. این مدل‌ها به سازمان‌ها کمک می‌کنند تا فرایندهای مختلف خود را بر اساس معیارهای مختلف ارزیابی و اولویت‌بندی کنند. مقله [۷] از این مدل‌ها برای ارزیابی و اولویت‌بندی پروژه‌های تحقیقاتی استفاده کرده است. در همین راستا، [۸] نیز با استفاده از مدل ANP به اولویت‌بندی فرایندهای مدیریت دانش در صنایع مختلف پرداخته و نشان داده‌اند که برخی فرایندها بیشترین تأثیر را بر عملکرد دارند.

در زمینه استفاده از سیستم‌های فازی در مدیریت دانش، پژوهش‌هایی مانند [۹] استفاده از منطق فازی را برای مدل‌سازی فرایندهای تصمیم‌گیری در مدیریت دانش معرفی کرده‌اند. سیستم‌های فازی با قابلیت مدیریت عدم قطعیت و پیچیدگی، ابزار قدرتمندی برای اولویت‌بندی فرایندها و تعیین استراتژی‌ها در سازمان‌ها هستند. به‌طور خاص، مقاله [۱۰] در پژوهشی بر کاربرد منطق فازی در تصمیم‌گیری‌های پیچیده در زمینه مدیریت دانش تأکید کرده و از مدل‌های فازی برای ارزیابی و اولویت‌بندی فرایندهای مختلف استفاده کرده است. «وو و همکاران» روشی بر اساس فرآیند تحلیل شبکه‌ای برای شرکتی در تایوان ارائه داده‌اند. در این روش استراتژی‌های مدیریت دانش شامل استراتژی‌های سیستم گراء انسان گرا و دینامیکی به عنوان گزینه‌ها و فاکتورهای مؤثر شامل پشتیبانی ارتباطات، فرهنگ و افراد، تشویق، زمان و هزینه به عنوان زیر معیارها و اهداف مدیریت دانش شامل فعال‌سازی اطلاعات، بهبود عملکرد و ایجاد نوآوری به عنوان معیارها در مدل فرآیند تحلیل شبکه‌ای در نظر گرفته شده‌اند. در مدل ارائه شده میزان تأثیرات فاکتورهای مؤثر بر استراتژی‌ها، استراتژی‌ها بر اهداف، اهداف بر فاکتورهای مؤثر و ارتباطات میان فاکتورهای مؤثر با مقایسه زوجی و توسط خبرگان بدست آمده است. در نهایت فاکتور ارتباطات به عنوان مؤثرترین فاکتور و استراتژی

دینامیک به عنوان مناسب‌ترین استراتژی مدیریت دانش برای شرکت مزبور شناخته شده‌اند [۱۱].

«بسرا فرناندز و سابروال» در پژوهش خود جهت انتخاب بهترین فرایند برای مدیریت دانش سازمان، فاکتورهای مؤثر بر فرایندها را مورد بررسی قرار داده. در این پژوهش با توجه به واقعیت‌های سازمان، برای تعیین وضعیت فاکتورهای عدم قطعیت وظایف، وابستگی وظایف، وعدم قطعیت محیط از کلمات High و Low استفاده می‌گردد. برای نشان دادن خصوصیت دانش از E و T که به ترتیب نمایانگر دانش صریح و یا دانش ضمنی هستند و برای نمایش خصوصیت رویه‌ای و یا اظهاری بودن دانش به ترتیب از D و P استفاده می‌گردد. همچنین برای نشان دادن اندازه سازمان small و large و برای تعیین وضعیت استراتژی کسب و کار سازمان LC و D که به ترتیب نشان دهنده استراتژی رهبری هزینه و استراتژی تمایز است، به کار می‌رود. سپس با توجه به جدول خاص امتیازاتی را برای فرایندها به دست می‌دهند و نحوه امتیازدهی به فرایندها در ادامه تشریح شده است. در نهایت فرایندی که بیشترین امتیاز را کسب کرده باشد دارای بالاترین اولویت برای پیاده‌سازی مدیریت دانش محسوب می‌شود [۱۲]. «پاتیل و کانت» در پژوهشی با استفاده از چارچوب فازی فرایند تحلیل سلسله مراتبی به همراه اولویت‌بندی بر اساس شباهت به راه حل ایده آل به رتبه‌بندی راه حل‌های مدیریت دانش در زنجیره تأمین با هدف فایق آمدن بر موانع آن پرداخته‌اند. در این پژوهش از فرایند تحلیل سلسله مراتبی جهت تعیین وزن موانع به عنوان شاخص‌ها و از اولویت‌بندی بر اساس شباهت به راه حل ایده آل فازی برای رتبه‌بندی راه حل‌ها استفاده شده است. در این پژوهش موانع استراتژیک، موانع سازمانی، موانع فناوری، موانع فرهنگی و موانع فردی به عنوان شاخص‌ها معرفی شده و راه حل‌های مرتبط با هر کدام جهت فایق آمدن بر این موانع رتبه‌بندی شده‌اند. در این پژوهش به نقش فرایندهای مدیریت دانش در پیاده‌سازی مدیریت دانش اشاره‌ای نشده است.

در [۱۳] در چارچوبی جهت بررسی همراستایی فرآیندها و استراتژی‌های مدیریت دانش سازمان ارائه داده است. در این پژوهش استراتژی‌های شخصی‌سازی و کدگذاری به عنوان استراتژی‌ها و فرآیندهای ایجاد دانش، اشتراک‌گذاری دانش، به کارگیری دانش و ذخیره‌بازیابی دانش به عنوان فرایندهای اصلی مدیریت دانش سازمان در نظر گرفته شده‌اند. بر اساس چارچوب ارائه شده در این پژوهش، فرآیندهای ایجاد و اشتراک‌گذاری دانش با استراتژی شخصی‌سازی و فرآیندهای به کارگیری و ذخیره‌بازیابی دانش با استراتژی کدگذاری همراستا می‌باشند. «خدیور و همکاران» در جهت تعیین استراتژی مدیریت دانش، یک سیستم فازی نوع اول مبتنی بر قانون پیشنهاد داده‌اند که با بررسی فاکتورهای مؤثر بر استراتژی‌های مدیریت دانش، استراتژی مدیریت دانش سازمان را تعیین می‌کند. ورودی‌های روش خدیور فاکتورهای مؤثر بر استراتژی‌های مدیریت دانش برگرفته از پژوهش‌های پیشین در این زمینه شامل نوع دانش (ضمنی یا آشکار)

² Analytic Network Process

¹ Analytic Hierarchy Process

ساختار سازمانی (سلسله مراتبی یا ارگانیک). فرهنگ سازمانی استراتژی عمومی کسب و کار (تمایز یا رهبری هزینه ها) استراتژی مدیریت منابع انسانی (بوروکراتیک یا ارگانیک) سطح بلوغ فناوری اطلاعات، سطح اجتماعی سازی و سطح ترکیب بوده است. خروجی روش خدیور و همکاران در تحقیق مذکور استراتژی مدیریت دانش شامل استراتژی های انسان گرا (شخصی سازی) و سیستم گرا (کدگذاری) می باشد. قوانین پایگاه دانش در پژوهش خدیور بر اساس نظر خبرگان تعریف شده است. خدیور و همکاران در این روش، تنها به تعیین استراتژی مدیریت دانش پرداخته و فرآیندهای لازم جهت اجرای مدیریت دانش را مورد بررسی قرار داد.

در [۱۴] سیستم فازی برای تعیین فرآیندهای اولویت بندی شده موثر بر مدیریت دانش سازمان راهکار پیشنهاد داده اند. با توجه به اینکه مقادیر برخی فاکتورهای موثر بر اولویت بندی فرایندهای مدیریت دانش سازمان کیفی است، در این پژوهش برای مدلسازی ارتباطات میان فاکتورهای وابستگی و فرآیندهای مدیریت دانش سیستم فازی نوع اول مبتنی بر قانون ارائه شده است که سیستم تعیین استراتژی بر اساس خروجی های سیستم اول کار می کند مقایسه نتایج بدست آمده در این پژوهش با نتایج پژوهشهای پیشین مشخص میکند که روش پیشنهاد شده در این پژوهش، ضمن بررسی و وضعیت فاکتورهای وابستگی و تعیین اولویت بندی دقیقتری از فرآیندهای مدیریت دانش مدیریت دانش در سازمان را فراهم می کند.

۳- چالش پژوهش های پیشین

با وجود پیشرفت های صورت گرفته در زمینه مدیریت دانش و استفاده از سیستم های فازی برای اولویت بندی فرایندها، هنوز چندین خلا در تحقیقات موجود به وضوح مشاهده می شود که مقاله حاضر قصد دارد آنها را پر کند.

- **کمبود مدل های یکپارچه برای اولویت بندی فرایندهای مدیریت دانش:** بسیاری از پژوهش ها از مدل های مختلفی برای اولویت بندی فرایندهای مدیریت دانش استفاده کرده اند، اما کمتر به ادغام این مدل ها پرداخته اند. در تحقیقات موجود، مدل های فازی عمدتاً جدا از دیگر مدل های تصمیم گیری مانند AHP یا ANP بررسی شده اند و مدل های یکپارچه ای که این ابزارها را به طور همزمان برای بهبود فرایندهای مدیریت دانش به کار بگیرند، نادر هستند. این شکاف در ادبیات، به ویژه در صنایع پیچیده و دانش محور، نیازمند توجه ویژه است.
- **عدم توجه به پیچیدگی های محیط کسب و کار و عوامل پویا:** بسیاری از مدل ها و نظریه های مدیریت دانش در شرایط ثابت و غیرپویا طراحی شده اند. در دنیای واقعی، سازمان ها با شرایط متغیر و پیچیده ای روبرو هستند که در آن عوامل مختلفی بر تصمیم گیری های مدیریتی تأثیر می گذارند. پژوهش های موجود معمولاً به این عوامل پویا توجه کافی نکرده اند. به عنوان مثال، در بسیاری از مدل های فازی، پارامترهای مدل ثابت فرض می شوند،

در حالی که در عمل ممکن است این پارامترها به طور مداوم تغییر کنند. این شکاف در ادبیات، نیاز به مدلهایی با انعطاف پذیری بیشتر و تطابق با شرایط دنیای واقعی را نشان می دهد.

- **کمبود پژوهش های تجربی در صنایع خاص:** اکثر پژوهش ها به طور عمومی به مدیریت دانش و کاربرد مدل های فازی پرداخته اند، اما مطالعات تجربی که به طور خاص بر کاربرد این مدل ها در صنایع خاص (مانند صنایع دانش محور، فناوری اطلاعات و مشاوره) تمرکز داشته باشند، محدود است. پژوهش های موجود بیشتر به صورت نظری و مدلسازی هستند و کارهای تجربی که ارزیابی واقعی این مدل ها را در دنیای سازمان ها و صنایع مختلف ارائه دهند، کمتر است. این خلا، مقاله ی پیش رو را از اهمیت بیشتری برخوردار می کند.

- **نیاز به مدل های پویا برای ارزیابی و تصمیم گیری در مدیریت دانش:** پژوهش های موجود در زمینه استفاده از سیستم های فازی بیشتر بر مدل های ایستا تمرکز کرده اند. در حالی که در دنیای واقعی، شرایط و نیازهای سازمان ها ممکن است تغییر کنند و بنابراین یک مدل فازی پویا که قادر به تطبیق با تغییرات محیطی و سازمانی باشد، می تواند کمک شایانی به بهبود مدیریت دانش و اتخاذ تصمیمات استراتژیک کند.

با توجه به این خلاها، مقاله حاضر بر روی ایجاد یک مدل یکپارچه و پویا مبتنی بر سیستم فازی برای اولویت بندی فرایندهای مدیریت دانش تمرکز دارد که بتواند به طور مؤثر در صنایع دانش محور و در شرایط پیچیده و پویا به کار گرفته شود. این تحقیق به دنبال ایجاد چارچوبی است که هم عوامل کمی و هم کیفی را در نظر بگیرد و بتواند در شرایط واقعی به تصمیم گیری های استراتژیک کمک کند.

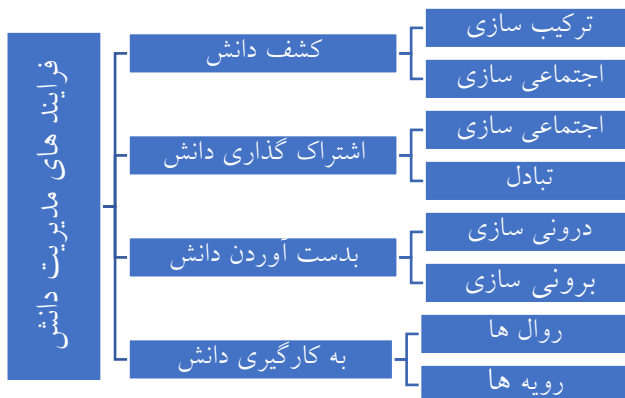
۴- بررسی روش پیشنهادی در سیستم تصمیم گیری فازی برای اولویت بندی فرایندها به منظور تعیین استراتژی های بهینه

مقاله حاضر با هدف ارائه یک رویکرد مبتنی بر داده و مدلسازی برای تعیین استراتژی مدیریت دانش، به بررسی عوامل موثر بر اولویت بندی فرایندهای مدیریت دانش می پردازد. با استفاده از سیستم های فازی به عنوان یک ابزار قدرتمند برای مدلسازی عدم قطعیت و پیچیدگی در تصمیم گیری، این مقاله قصد دارد تا یک مدل جامع برای تعیین استراتژی مدیریت دانش ارائه دهد. این مدل به سازمان ها اجازه می دهد تا با در نظر گرفتن شرایط خاص خود، استراتژی های مدیریت دانش موثرتر و کارآمدتری را تدوین و اجرا کنند. نوآوری اصلی این مقاله در استفاده از سیستم های فازی برای مدلسازی روابط بین عوامل موثر بر استراتژی مدیریت دانش و اولویت بندی فرایندهای مختلف است. این رویکرد به سازمان ها کمک می کند تا با دقت بیشتری به تصمیم گیری در مورد سرمایه گذاری در حوزه مدیریت دانش بپردازند و در نتیجه، عملکرد خود را بهبود بخشند. نتایج این مقاله می تواند به مدیران



روش ارلئه‌شده در پژوهش فریلندز [۱۶] با عدم قطعیت در زمان مشخص کردن وضعیت فاکتورهای وابستگی سازمان روبه‌رو است. وضعیت فاکتورهای وابستگی را نمی‌توان تنها با دو حالت ورودی به‌صورت دقیق مشخص کرد. در صورتی که وضعیت فاکتورهای وابستگی با وضعیت واقعی سازمان به‌طور دقیق منطبق نباشد، نمی‌توان اولویت‌بندی دقیقی از فرآیندهای مدیریت دانش برای سازمان به‌دست آورد. در نتیجه، احتمال پیاده‌سازی موفق مدیریت دانش در سازمان کاهش یافته و خطر از دست رفتن زمان و هزینه پروژه مدیریت دانش سازمان را تهدید می‌کند.

از سویی دیگر استراتژیهای مدیریت دانش نیز در نظر گرفته نشده‌اند و این مقاله تنها به بررسی و اولویت‌بندی فرآیندهای مدیریت دانش اکتفا کرده است. بوسوا در پژوهش سال ۲۰۱۳ چارچوبی جهت بررسی همراستایی فرآیندها و استراتژیهای مدیریت دانش سازمان ارائه داده است. در این پژوهش استراتژیهای شخصی‌سازی و کدگذاری به عنوان استراتژی‌ها و فرآیندهای ایجاد دانش، اشتراک‌گذاری دانش، به کارگیری دانش و ذخیره، بازیابی دانش به عنوان فرآیندهای اصلی مدیریت دانش سازمان در نظر گرفته شده‌اند. بر اساس چارچوب ارائه شده در این پژوهش، فرآیندهای ایجاد و اشتراک‌گذاری دانش با استراتژی شخصی‌سازی و فرآیندهای به کارگیری و ذخیره، بازیابی دانش با استراتژی کدگذاری همراستا می‌باشند.



شکل (۱) فرآیندهای مدیریت دانش [۱۶]



شکل (۲) فاکتورهای وابستگی موثر بر انتخاب فرآیندهای مدیریت

سازمان‌ها کمک کند تا استراتژی‌های مدیریت دانش موثرتر و کارآمدتری را تدوین و اجرا کنند و در نهایت به افزایش بهره‌وری، نوآوری و مزیت رقابتی سازمان کمک کند.

۴-۱- مبانی نظری

خدیور و همکاران [۱۵] برای تعیین استراتژی مدیریت دانش، یک سیستم فازی نوع اول مبتنی بر قانون پیشنهاد کرده‌اند که با بررسی عوامل مؤثر بر استراتژی‌های مدیریت دانش، استراتژی مدیریت دانش سازمان را مشخص می‌کند. ورودی‌های این روش شامل فاکتورهای مؤثر بر استراتژی‌های مدیریت دانش، برگرفته از پژوهش‌های پیشین در این حوزه، از جمله نوع دانش (ضمنی یا آشکار)، ساختار سازمانی (سلسله مراتبی یا ارگانیک)، فرهنگ سازمانی، استراتژی عمومی کسب‌وکار (تمایز یا رهبری هزینه‌ها)، استراتژی مدیریت منابع انسانی (بوروکراتیک یا ارگانیک)، سطح بلوغ فناوری اطلاعات، سطح اجتماعی‌سازی و سطح ترکیب بوده است. خروجی این روش، استراتژی‌های مدیریت دانش شامل استراتژی‌های انسان‌گرا (شخصی‌سازی) و سیستم‌گرا (کدگذاری) می‌باشد. قوانین پایگاه دانش در این تحقیق، بر اساس نظرات خبرگان تعریف شده است. در این روش، خدیور و همکاران تنها به تعیین استراتژی مدیریت دانش پرداخته‌اند و فرآیندهای لازم برای اجرای مدیریت دانش را مورد بررسی قرار نداده‌اند. مقاله [۱۵]، روشی جهت اولویت‌بندی فرآیندهای مدیریت دانش سازمان با توجه به فاکتورهای مؤثر بر آن‌ها ارائه داده است. در این مقاله برای هرکدام از چهار فرآیند کشف، استخراج، اشتراک‌گذاری و به کارگیری دانش، دو زیرفرآیند در نظر گرفته است که در شکل (۱) نشان داده شده‌اند.

فاکتورهای وابستگی مطرح‌شده در پژوهش فریلندز، که بر اولویت‌بندی فرآیندها در مدیریت دانش مؤثر دانسته شده‌اند، در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. روش ارائه شده، با مدلسازی ارتباط میان فاکتورهای وابستگی و زیرفرآیندهای مدیریت دانش، اولویت‌بندی زیرفرآیندهای مدیریت دانش را تعیین می‌کند که در ادامه تشریح می‌شود. بر اساس روش ارائه شده در پژوهش فریلندز، ابتدا وضعیت فاکتورهای وابستگی بر اساس واقعیت‌های سازمان مشخص شده و سپس با تعیین میزان ارتباط میان فاکتورهای وابستگی و فرآیندهای مدیریت دانش، اولویت‌بندی فرآیندها بر اساس امتیازات به‌دست‌آمده برای هر فرآیند انجام می‌شود. نحوه امتیازدهی به فرآیندها بدین صورت است که وضعیت فاکتور وابستگی مشخص‌شده برای سازمان، با جدول مربوط به ارتباط فاکتورهای وابستگی و فرآیندهای مدیریت دانش ارائه‌شده در پژوهش فریلندز مقایسه می‌شود. با استفاده از این جدول، اولویت‌بندی فرآیندهای مدیریت دانش تعیین می‌شود. در روش ارائه‌شده در این مقاله، ورودی‌های مربوط به فاکتورهای وابستگی برای هر فاکتور تنها شامل دو حالت می‌باشد. برای مثال، برای فاکتور مربوط به اندازه سازمان، فقط دو مقدار «بزرگ» یا «کوچک» استفاده شده است.

۴-۳- معرفی روش فرناندز

فرناندز در پژوهش خود جهت انتخاب بهترین فرایند برای مدیریت دانش سازمان، فاکتورهای مؤثر بر فرایندها را مورد بررسی قرار داده است. در این پژوهش با توجه به واقعیت‌های سازمان، برای تعیین وضعیت فاکتورهای عدم قطعیت وظایف^۲، وابستگی وظایف^۳ و عدم قطعیت محیط^۴ از کلمات High و Low استفاده می‌گردد. برای نشان دادن خصوصیت دانش از E و T که به ترتیب نمایانگر دانش صریح^۵ و یا دانش ضمنی^۶ هستند، و برای نمایش خصوصیت رویه‌ای^۷ و یا اظهاری^۸ بودن دانش به ترتیب از P و D استفاده می‌گردد. همچنین، برای نشان دادن اندازه سازمان Small و Large و برای تعیین وضعیت استراتژی کسب و کار^۹ سازمان LC و D که به ترتیب نشان‌دهنده استراتژی رهبری هزینه^{۱۰} و استراتژی تمایز^{۱۱} است، به کار می‌رود. سپس، با توجه به جدول (۱)، امتیازاتی را برای فرایندها به دست می‌آید و نحوه امتیازدهی به فرایندها در ادامه تشریح شده است. در نهایت، فرایندی که بیشترین امتیاز را کسب کرده باشد، دارای بالاترین اولویت برای پیاده سازی مدیریت دانش محسوب می‌شود.

تصمیم گیری در مورد اجرای یک فرایند بر اساس فاکتورهای وابسته به آن در جدول (۱)، نشان داده شده است. به عنوان مثال، برای فرایند ترکیب سازی، مقادیر مربوط به فاکتورهای مؤثر در مورد این فرایند در ذیل آن در جدول ذکر شده اند. فرایند ترکیب سازی Low هنگامی که میزان عدم قطعیت وظایف زیاد باشد، فرایندی توصیه شده برای اجراست. فاکتورهای دانش توصیفی یا رویه‌ای و اندازه سازمان، هما نظور که در جدول نشان داده شده، در اجرای فرایند ترکیب سازی تأثیری ندارند و در واقع، فرایند ترکیب سازی وابسته به این فاکتورها نیست. به همین صورت، می‌توان توصیه یا عدم توصیه اجرای دیگر فرایندها را بر اساس تک تک فاکتورها از جدول (۱)، استنتاج کرد. فرناندز و همکارش پس از مشخص شدن وضعیت هر کدام از فاکتورهای وابستگی، با استفاده از جدول (۱)، قابل اجرا بودن یا عدم قابلیت اجرای فرایندها را با توجه به مقادیر مربوط به تک تک فاکتورهای وابستگی تعیین می‌کنند. آن‌ها سپس، برای هر فرایندی که بر اساس مقدار فاکتور مربوطه قابلیت اجرا دارد از کلمه YES، برای فرایندی که بر اساس مقدار فاکتور مربوطه قابلیت اجرا ندارد کلمه No، و برای فرایندی که مقدار فاکتور مربوطه در اجرا یا عدم اجرای آن تأثیری ندارد از کلمه OK استفاده می‌کنند.

نمونه‌ای از اولویت بندی فرایندهای مدیریت دانش برای یک سازمان نمونه، بر اساس روش فرناندز و همکارش در جدول (۲)، نشان داده شده است. بر اساس مقادیر مربوط به فاکتورهای وابستگی در مثال

مورد مدل های مدیریت دانش در دانشگاه ها با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی^۱، فاکتورهای مؤثر بر انتخاب مدل مناسب جهت پیاده سازی مدیریت دانش در دانشگاه‌های ویتنام مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است. در این پژوهش ۸ فاکتور تأثیرگذار بر اساس مطالعه و با استناد به Fuzzy AHP منابع متعدد و با استفاده از تکنیک نظر ۱۰ خبره در نظر گرفته و اولویت بندی شده اند. در این پژوهش استراتژی مدیریت دانش مورد بررسی واقع نشده است. پژوهش [۱۶] رابطه بین ابعاد بین المللی سازی شرکت و استراتژی مدیریت دانش آن در اقتصادهای در حال ظهور، که کارایی بیشتری در تبدیل فناوری به تأثیرات اقتصادی اجتماعی داشته اند، بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که هرچه درصد کارمندان خارجی در شرکت بیشتر باشد، احتمال استراتژی برون سپاری افزایش می‌یابد. همچنین افزایش درصد فروش خارجی، تمایل شرکت به استراتژی مشارکت جهانی را افزایش می‌دهد. این در حالیست که سطح مالکیت خارجی چنین تأثیری ندارد.

برای کنترل عدم قطعیت در مقدار دهی به فاکتورهای وابستگی و قوانین تعیین اولویت فرایندها از یک سو و عدم قطعیت در قوانین مرتبط با استراتژیهای مدیریت دانش و اولویت بندی عوامل مؤثر بر آن در مقاله حاضر، ما دو سیستم فازی نوع اول مبتنی بر قانون طراحی نموده ایم. در مقاله حاضر، با استناد به نتایج [۱۷] پس از تعیین اولویت فرایندهای مدیریت دانش، استراتژی مدیریت دانش سازمان را تعیین می‌نماییم. سیستم تعیین اولویت فرایندهای مدیریت دانش با استناد به دانش خبره ارایه شده در پژوهش فرناندز طرح شده است.

۴-۲- روش شناسی پژوهش

پایه هر علمی، شناخت آن است و اعتبار و ارزش قوانین هر علمی به روش شناسی مبتنی است که در آن علم به کار می‌رود. روش به کار گرفته شده در این مقاله از نظر هدف توسعه ای-کاربردی بوده و بر مبنای ماهیت و روش در گروه توصیفی دسته بندی می‌شود. به منظور غربال کردن عوامل شناسایی شده از تکنیک لیکرت استفاده شد. قابلیت عدد سازی برای علوم انسانی و جلوگیری از اختصاص تصمیم اشتباه و شاخص هماهنگی در مدیریت و کاهش هزینه‌ها، به افزایش یکپارچگی و بهره‌وری در سازمانها و شرکتها کمک می‌کند. همچنین، تعیین اولویت در استراتژی مدیریت دانش برای ذی‌نفعان خود، مزیت رقابتی کسب می‌کند. آراء خبرگان که در پژوهش فرناندز استفاده شده مورد بررسی قرار گرفته است. در گام نهایی، به منظور اولویت بندی عوامل مؤثر بر پیاده سازی استراتژی‌های مدیریت دانش تکنیک فازی، از روشهای MAMDANI & SUGINO استفاده می‌شود.

⁶ tacit knowledge

⁷ procedural knowledge

⁸ declarative knowledge

⁹ business strategy

¹⁰ low-cost strategy

¹¹ differentiation

¹ Ngoc Thach Pham & Anh Duc Do & Quang Vinh Nguyen & Van Loi Ta and Xuan Truong Hoang

² task uncertainty

³ task-interdependence

⁴ environmental uncertainty

⁵ explicit knowledge



جدول (۱) ارتباط فرایندها و فاکتورهای وابستگی-Becerra

Fernandez							
Contingency Factors KM Processes KM	Task Uncertainty = High	Task Interdependence = High	Tacit Knowledge = T	Procedural Knowledge = P	Organizational size = Small	Business Strategy = Low Cost	Environmental Uncertainty = High
Combinaion	Low	High	E	P/D	Small/Larg	D	High
Socialization for Knowledge Discovery	High	High	T	P/D	Small	D	High
Socialization for Knowledge Sharing	High	High	T	P/D	Small	LC/D	Low
Exchange	Low	High	E	P/D	Large	LC/D	Low
Externalization	Low	Low	T	P/D	Small/Large	LC/D	Low
Internalization	Low	Low	E	P/D	Small/Large	LC/D	Low
Direction	High	High/Low	T/E	P	Small	LC	High
Routines	Low	High/Low	T/E	P	Large	LC	High

Low Cost- LC : Differentiation- D

Explicit – E : Tacit – T

Procedural – P : Declarative – D

جدول (۲) امتیازدهی و اولویت بندی فرایندهای مربوط به سازمان

نمونه

Contingency Factors KM	Task Uncertainty = High	Task Interdependence = High	Tacit Knowledge = T	Procedural Knowledge = P	Organizational size = Small	Business Strategy = Low Cost	Environmental Uncertainty = High	Cumulative Priority Score			
								Number of Yes	Number of OK	Number of No	
Processes KM	Combinaion	No	Yes	No	OK	No	Yes	۲	۲	۳	۳,۰
Socialization for Knowledge Discovery	Yes	Yes	Yes	OK	Yes	No	Yes	۵	۱	۱	۵,۵
Socialization for Knowledge Sharing	Yes	Yes	Yes	OK	Yes	OK	No	۴	۲	۱	۵,۰
Exchange	No	Yes	No	OK	No	OK	No	۱	۲	۴	۲,۰
Externalization	No	No	Yes	OK	OK	OK	No	۱	۳	۳	۲,۵
Internalization	No	No	No	OK	OK	OK	No	۰	۳	۴	۱,۵
Direction	Yes	OK	OK	Yes	Yes	Yes	Yes	۵	۲	۰	۶,۰
Routines	No	OK	OK	Yes	No	Yes	Yes	۲	۲	۲	۴,۰

جدول (۳) امتیازدهی و اولویت بندی فرایندهای مربوط به سازمان

نمونه ۲

تعداد Yes	۲	۲	۴	۳	۱	۳	۲	۳
تعداد OK	۲	۳	۲	۲	۳	۱	۴	۲
امتیاز نهایی محاسبه شده	۳	۳,۵	۵	۴	۲,۵	۳,۵	۴	۴

جدول (۲)، در این سازمان نمونه عدم قطعیت وظایف بالا بوده و با کلمه High مشخص شده است. با توجه به مقدار فاکتور عدم قطعیت وظایف، قابلیت اجرا یا عدم اجرای تک تک فرایندها را به صورت مستقل بررسی می‌کنیم. بر اساس جدول (۱)، اگر فاکتور عدم قطعیت وظایف در وضعیت High باشد، فرایند ترکیب‌سازی زمانی قابلیت اجرا ندارد. بنابراین، برای این سازمان نمونه، به دلیل اینکه فاکتور عدم قطعیت وظایف مقدار High دارد، فرایند ترکیب‌سازی قابلیت اجرا نداشته و در جدول (۲)، برای این فرایند در سطر مربوط به فاکتور عدم قطعیت وظایف، کلمه No جای‌گذاری می‌شود. در ادامه، و بر اساس جدول (۱)، اگر فاکتور عدم قطعیت وظایف در وضعیت High باشد، فرایند اجتماعی‌سازی مربوط به کشف دانش زمانی قابلیت اجرا دارد.

بنابراین، برای این سازمان نمونه، فرایند اجتماعی‌سازی مربوط به کشف دانش، به دلیل اینکه عدم قطعیت وظایف در این سازمان نمونه در وضعیت High قرار دارد، قابلیت اجرا داشته و در جدول (۲)، برای فرایند اجتماعی‌سازی مربوط به کشف دانش و در سطر مربوط به فاکتور عدم قطعیت وظایف، کلمه YES جای‌گذاری می‌شود. به همین ترتیب، بر اساس مقادیر مربوط به فاکتورهای مؤثر سازمان نمونه و بر اساس جدول (۱)، تمامی خانه‌های جدول (۲) با کلمات YES قابلیت اجرای فرایند، No عدم قابلیت اجرای فرایند OK عدم تأثیر فاکتور مربوطه در اجرای فرایند جای‌گذاری می‌شوند. در جدول (۲) برای کلمه YES معادل امتیاز ۱، برای کلمه No معادل امتیاز صفر و برای کلمه OK معادل امتیاز ۰,۵ در نظر گرفته شده و سپس، مجموع امتیاز مربوط به هر فرایند بر همین اساس در ستون مربوط به آن فرایند محاسبه می‌شود. در نهایت، با مقایسه امتیازات تمامی فرایندها، فرایندی که امتیاز بالاتری کسب کند، دارای اولویت بالاتری برای اجرا خواهد بود. برای این سازمان نمونه، فرایند راهنمایی با کسب ۶ امتیاز، دارای بالاترین اولویت است. پس از آن، فرایند اجتماعی‌سازی مربوط به کشف دانش با امتیاز ۵,۵ و سپس، فرایند اجتماعی‌سازی مربوط به اشتراک‌گذاری دانش با ۵ امتیاز، بیشترین اولویت را دارا هستند.

۴-۴- نقدی بر روش فرناندز

همانطور که در جدول (۳) نشان داده شده است، در روش فرناندز، سه فرایند امتیاز ۴ و دو فرایند ۳,۵ بدست آورده‌اند که این امتیازات بدست آمده نمی‌تواند رتبه‌ی درستی از فرایندهای مدیریت دانش را مشخص کند. در این مثال نیز با توجه به مشخص نشدن شدن اولویت فرایندها نمی‌توان استراتژی مناسبی برای سازمان مشخص کرد.

۴-۵- منطق فازی

منطق فازی یا «منطق تشکیک»^۱ شکلی از منطق‌های چندارزشی بوده که در آن ارزش منطقی متغیرها می‌تواند هر عدد حقیقی بین ۰ و ۱ و خود آن‌ها باشد. این منطق به منظور به‌کارگیری مفهوم درستی جزئی به‌کارگیری می‌شود، به طوری که میزان درستی می‌تواند هر مقداری بین کاملاً درست و کاملاً غلط باشد [۱۸]. کاربرد این منطق در علوم نرم‌افزاری را می‌توان به‌طور ساده این‌گونه تعریف کرد: منطق فازی از منطق ارزش‌های «صفر و یک» نرم‌افزارهای کلاسیک فراتر رفته و درگاهی جدید برای دنیای علوم نرم‌افزاری و رایانه‌ها می‌گشاید، زیرا فضای شناور و نامحدود بین اعداد صفر و یک را نیز در منطق و استدلال‌های خود به کار برده و به چالش می‌کشد. منطق فازی از فضای بین دو ارزش «برویم» یا «نرویم»، ارزش‌های جدید «شاید برویم» یا «می‌رویم اگر» یا حتی «احتمال دارد برویم» را استخراج کرده و به کار می‌گیرد.

^۱ fuzzy logic

۵- طراحی سیستم تصمیم‌گیری فازی برای اولویت‌بندی فرآیندها و بررسی نتایج

- یک سیستم فازی را می‌توان به چهار قسمت اصلی تقسیم کرد: بخش فازی ساز^۱، پایگاه دانش^۲، موتور استنباط^۳ و بخش غیرفازی ساز^۴.
- بخش فازی ساز: یک ورودی قطعی حقیقی را به یک تابع فازی تبدیل می‌کند و در نتیجه، درجه عضویت ورودی، با یک مفهوم مبهم تعیین می‌شود.
- پایگاه دانش: یک پایگاه داده از تعاریف مورد استفاده برای بیان قوانین کنترلی زبانی در کنترلر، و یک پایگاه
- قوانین که دانش در اختیار متخصصین آن حوزه را توصیف می‌کند. پایگاه دانش، هسته اصلی یک کنترلر فازی به شمار می‌آید،
- موتور استنباط: منطق تصمیم‌گیری کنترلر را تامین می‌کنند. این بخش، اقدامات کنترل فازی را با بکارگیری مفاهیم فازی و قوانین فازی، استنباط می‌کند. از بسیاری جهات، می‌توان این بخش را تقلیدی از سیستم تصمیم‌گیری انسان دانست.
- فرایند غیرفازی سازی: مقادیر کنترل فازی را به مقادیر قطعی تبدیل می‌کند. یعنی یک نقطه را به یک مجموعه فازی متصل می‌کند، با توجه به این موضوع که آن نقطه، به پشتیبانی مجموعه فازی تعلق دارد. روش‌های زیادی برای غیرفازی سازی وجود دارد که مشهورترین آنها، روش ممدانی و روش سوگینو با محاسبه مرکز مساحت ۵ یا مرکز ثقل ۶ است.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i \mu(x_i)}{\sum \mu(x_i)}$$

سایر روش‌های غیرفازی سازی، عبارتند از روش اولین حداکثر و روش میانگین حداکثر. بسیاری از مدل‌های استنباط، برای استدلال کردن خروجی‌های یک سیستم با توجه به ورودی‌ها، از مجموعه‌های فازی استفاده می‌کنند. در مدل استنباطی ممدانی، مقدمات^۷ و تالی‌های^۸ یک قانون فازی، مجموعه‌های فازی هستند. این استنباط بر اساس مدوس پونز^۹ تعمیم یافته است که بیان می‌دارد درجه حقیقت تالی یک قانون فازی، همان درجه حقیقت مقدم قانون است. در مواردی که بیش از یک بند مقدم وجود دارد، هر درجه عضویت، توسط عملگر t-norm یا یکدیگر تلفیق می‌شوند. اگر سیستم فازی شامل چند قانون باشد، تالی‌های آن‌ها با استفاده از عملگر حداکثر s-norm، با یکدیگر ترکیب می‌شوند.

می‌توان به صورت کلی نحوه کار سیستم فازی مبتنی بر قانون را این گونه شرح داد که در صورتی که ورودی‌های سیستم به صورت عددی باشند، پس از نگاشت به مجموعه‌های فازی، به عنوان ورودی موتور استنتاج^{۱۰}، در نظر گرفته می‌شوند. در سیستم‌های ارایه شده در این مقاله، درجه عضویت متغیرهای ورودی با مقدم‌های قوانین تطبیق

حد تطبیق هر قانون min t-norm داده می‌شود و با بکارگیری نتیجه mamdani implication تعیین می‌گردد و با استفاده از حاصل از هر قانون منطبق شده، استحصال می‌گردد. جهت محاسبه نتیجه نهایی اجرای قوانین بر اساس مجموعه ورودی، نتایج حاصل آمده از قوانین با max t-conorm باهم ادغام می‌گردند. سپس، در پردازش صورت گرفته در موتور استنتاج که با توجه به روابط تعریف شده در پایگاه دانش و ورودی‌های فازی شده صورت می‌گیرد، خروجی‌های فازی ایجاد می‌شود. در ادامه، این خروجی‌ها فازی‌زدایی شده و به مقادیر عددی تبدیل می‌شوند.

عملیات فازی‌زدایی در سیستم از روش مرکز ثقل استفاده می‌کند. اگر مجموعه‌ی فازی را به شکل عبارت زیر نمایش دهیم:

$$\{(x, \mu(x), x \in U, \mu(x) \in [0,1])\} = A$$

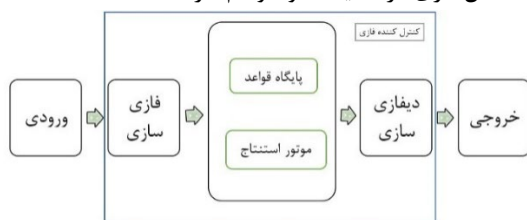
که $\mu_A(x)$ نشانگر درجه عضویت x در مجموعه فازی A می‌باشد. آنگاه با فرض گسسته بودن دامنه‌ی U ، مرکز ثقل مجموعه فازی مطابق عبارت زیر محاسبه می‌شود.

$$centroid(A) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)}$$

در مدل استنباط تاکاگی-سوگینو، تالی‌ها به شکل توابعی هستند که مقادیر قطعی ورودی را به خروجی قطعی برای قانون نگاشت می‌کنند. بنابراین، قوانین فازی به این شکل هستند: که در آن، F به طور کلی، یک تابع خطی از X و Y است. برخلاف سیستم‌های فازی ممدانی، قوانین با استفاده از عملگر حداکثر، ترکیب نمی‌شوند بلکه ترکیب آن‌ها، با پیدا کردن یک میانگین وزن دار صورت می‌گیرد. در این حالت، وزن یک قانون، برابر با درجه عضویت مقدم آن است. در نتیجه، سیستم‌های تاکاگی-سوگینو، نیازی به غیرفازی سازی ندارند. یک قانون نمونه‌ی فازی در مدل فازی سوگینو دارای شکل زیر است:

if x is A and y is B then $z = f(x, y)$

که A و B در آن مجموعه‌ی فازی در مقدم هستند و $Z = f(x, y)$ تابع محدود می‌باشد در نتیجه معمولاً (y, x) در متغیرهای ورودی x ، y چند جمله‌ای است. اما تا زمانی که خروجی مدل را در ناحیه فازی مشخص شده با مقدم قانون توضیح می‌دهد، می‌تواند هر تابعی باشد. وقتی $f(x, y)$ چندجمله‌ای درجه اول است، سیستم استنتاج فازی حاصله، مدل فازی درجه یک سوگینو نام دارد.



شکل (۳) ساختار اصلی یک سیستم فازی مبتنی بر قانون از نوع ممدانی و سوگینو

⁶ centre-of-gravity

⁷ antecedents

⁸ consequents

⁹ Modus Ponens

¹⁰ inference engine

¹ fuzzifier

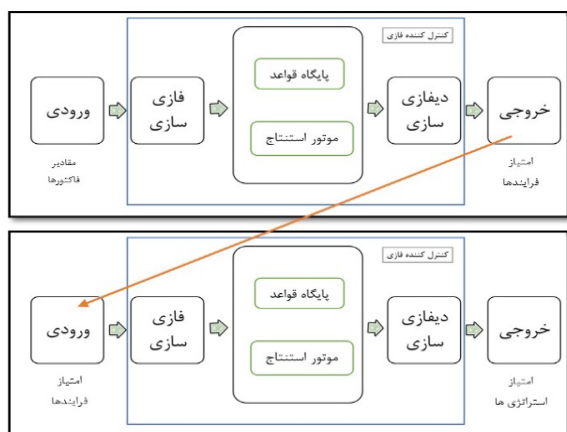
² knowledge base

³ inference engine

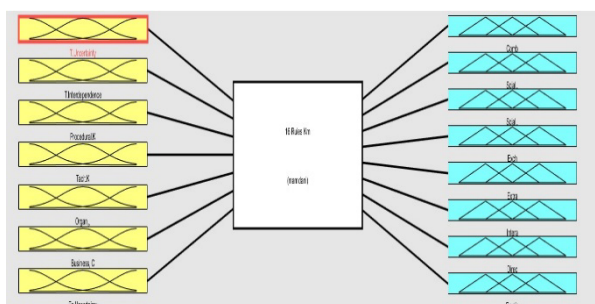
⁴ defuzzifier

⁵ centre-of-area

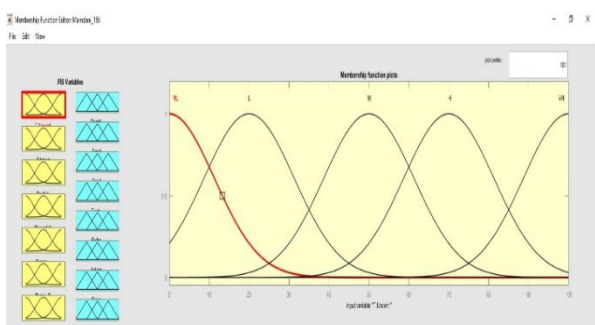




شکل (۴) گام‌های انجام فرآیند تحلیل پژوهش



شکل (۵) شمای کلی سیستم فازی مبتنی بر قانون روش ممدانی



شکل (۶) توابع عضویت تعریف شده مربوط به متغیرهای ۱۵۶ قانون هر دو روش

در سیستم فازی مبتنی بر قانون طراحی شده، از پنج تابع عضویت از نوع گاوسی برای متغیرهای ورودی و متغیرهای خروجی فرایندها استفاده شده است که در شکل (۶)، نمایش داده شده اند. چند نمونه از قوانین طراحی شده مربوط به این سیستم فازی در پیوست ۱ آورده شده است. جهت بررسی فاکتورهای وابستگی در این روش، با استفاده از نرم‌افزار متلب فرمی طراحی شده که کاربر می‌تواند وضعیت فاکتورهای وابستگی را با استفاده از اسلایدر و انتخاب عددی بین بازه ۰ و ۱۰۰ مشخص کند. مقدار انتخابی کاربر در این بازه، که عددی بین ۰ تا ۱۰۰ است، به عنوان ورودی سیستم فازی طراحی شده در نظر گرفته می‌شود.

وقتی f ثابت است ما مدل فازی درجه صفر سوگنو را داریم که به صورت یک نوع خاص سیستم استنتاج فازی ممدانی دیده میشود که در آن، خروجی مدل سوگنو درجه صفر، تا زمانی که تابع عضویت مجاور در مقدم، دارای روی هم رفتگی کافی باشد، یک تابع صاف از متغیر ورودی آن است. به عبارت دیگر، توابع عضویت حاصله‌ی مدل ممدانی دارای تأثیر قطعی بر روی صاف بودن آن نیست و این رویهم رفتگی مقدم توابع عضویت است که صاف بودن رفتار ورودی - خروجی حاصله را نشان میدهد.

برای تحلیل شبکه نخست باید عناصر هر ورودی، روابط بین ورودی‌ها و روابط درونی تمامی عناصر مقایسه شود. عملیات فازی‌سازی ورودی‌ها انجام میشود و وارد موتور استنتاج میگردد. این موتور با استفاده از قوانین مشخص تشکیل یک ماتریس فازی میدهد که باید فازی‌زدایی گردد نتیجه حاصل در یک ماتریس نرمال قرار میگیرد. این ماتریس نرمال خود ورودی یک منطق فازی دیگر است که مانند مرحله قبل به یک خروجی فازی‌زدایی شده میرسد که این ماتریس نرمال حاصل نتیجه مقاله می‌باشد.

۵-۱- گام اول : طراحی سیستم فازی مبتنی بر قانون جهت اولویت بندی فرایندها (۱۵۶ قانون)

مدیریت دانش طراحی سیستم فازی مبتنی بر قانون جهت اولویت‌بندی فرایندهای مدیریت دانش در دو مرحله صورت گرفته است. در مرحله اول، سیستم فازی منطبق با جدول (۱)، و لغات مورد استفاده در آن برای سنجش فاکتورها و خروجی انجام فرایندها طراحی شده است. این سیستم از روش امتیازدهی ساده‌ای برای تعیین اولویت فرایندها، منطبق با مثال مطرح شده در جدول (۲)، استفاده می‌کند.

جهت طراحی و پیاده‌سازی سیستم پیشنهادی برای تعیین اولویت‌بندی فرایندهای مدیریت دانش، از افزونه Fuzzy Logic Designer نرم افزار متلب^۱ استفاده شده است. در گام اول طراحی سیستم فازی مبتنی بر قانون، برای هر کدام از ورودیها (فاکتورها) و خروجی‌ها (فرایندها)، یک متغیر تعریف شده است. متغیرهای ورودی (فاکتورها) عبارت اند از: عدم قطعیت وظایف، وابستگی متقابل وظایف، نوع دانش (ضمنی یا صریح)، نوع دانش (رویه‌های یا اظهاری)، اندازه سازمان، استراتژی کسب و کار (کم هزینه) و عدم قطعیت محیط. متغیرهای خروجی (فرایندها) عبارت اند از: ترکیب سازی^۲، اجتماعی سازی (مربوط به کشف دانش^۳)، اجتماعی سازی (مربوط به اشتراک گذاری دانش^۴)، تبادل^۵، درونی سازی^۶، برونی سازی^۷، روتین‌ها^۸ و راهنمایی^۹. شمای کلی سیستم فازی مبتنی بر قانون طراحی شده مربوط به مرحله اول در شکل (۴)، نشان داده شده است.

⁶ internalization

⁷ externalization

⁸ routines

⁹ direction

¹ MATLAB

² combination

³ knowledge discovery

⁴ socialization

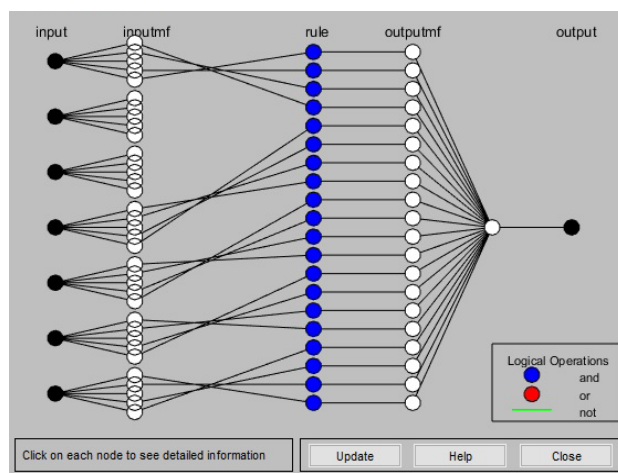
⁵ exchange



عدد ۱۰۰ نشان دهنده استراتژی کاملاً شخصی‌سازی می‌باشد. در شکل (۱۰) توابع عضویت تعریف شده برای متغیر ورودی فرآیند ترکیب‌سازی نشان داده شده است. توابع عضویت دیگر متغیرهای ورودی و خروجی نیز مانند توابع عضویت نشان داده شده در شکل (۱۰-۱۱) تعریف شده اند. قوانین پایگاه دانش مربوط به سیستم فازی نوع اول مبتنی بر قانون جهت تعیین استراتژی مدیریت دانش، از پژوهش فرناندز و همکاران در مورد همراستایی فرآیندها و استراتژیهای مدیریت دانش استخراج شد.

Inputs						
Task Uncertainty:	Very Low	Low	Medium	High	Very High	100
Task Interdependence:	Very Low	Low	Medium	High	Very High	100
Tacit/Explicit K:	Quite E.	Above Average E.	Balanced	Above Average T.	Quite T.	100
Procedural/Declarative K:	Quite D.	Above Average D.	Balanced	Above Average P.	Quite P.	100
Organizational Size:	Very Small	Small	Medium	Large	Very Large	0
Business Strategy:	Quite D.	Partly D.	Balanced	Partly Low-Cost	Quite Low-Cost	100
Environmental Uncertainty:	Very Low	Low	Medium	High	Very High	100
Outputs						
Combination (5):	43.0348	Externalization (6):	32.6802			
Socialization K. Discovery (2):	72.7843	Internalization (8):	15.3572			
Socialization K. Sharing (3):	70.5045	Direction (1):	84.162			
Exchange (7):	29.2222	Routines (4):	56.7955			

شکل (۷) فرم مقداردهی به فاکتورهای وابستگی و تعیین اولویت بندی فرایندهای مدیریت دانش روش ممدانی با ۱۵۶ قانون



شکل (۸) ساختار مدل سوگینو- فرایند روتین ها (۱۵۶ قانون)

Inputs						
Task Uncertainty:	Very Low	Low	Medium	High	Very High	100
Task Interdependence:	Very Low	Low	Medium	High	Very High	100
Tacit/Explicit K:	Quite E.	Above Average E.	Balanced	Above Average T.	Quite T.	100
Procedural/Declarative K:	Quite D.	Above Average D.	Balanced	Above Average P.	Quite P.	100
Organizational Size:	Very Small	Small	Medium	Large	Very Large	0
Business Strategy:	Quite D.	Partly D.	Balanced	Partly Low-Cost	Quite Low-Cost	100
Environmental Uncertainty:	Very Low	Low	Medium	High	Very High	100
Outputs						
Combination (5):	41.4651	Externalization (6):	32.2009			
Socialization K. Discovery (2):	68.2286	Internalization (8):	16.7605			
Socialization K. Sharing (3):	66.1698	Direction (1):	78.5222			
Exchange (7):	29.1128	Routines (4):	53.8175			

شکل (۹) فرم مقداردهی به فاکتورهای وابستگی و تعیین اولویت بندی فرایندهای مدیریت دانش روش سوگینو با ۱۵۶ قانون

همانطور که در ساختار سیستم فازی مبتنی بر قانون به روش ممدانی نشان داده شده، این مقدار ورودی در مرحله فازی‌سازی به مجموع‌های فازی تبدیل شده و سپس، به عنوان ورودی به موتور استنتاج فازی وارد می‌شود. در این مرحله خروجی‌های فازی بر اساس مجموعه‌های فازی ورودی و روابط تعیین شده در پایگاه دانش به دست می‌آیند. سپس، این خروجی‌های فازی، در مرحله فازی‌زدایی به اعداد تبدیل شده و خروجی‌های سیستم را تشکیل می‌دهند. در شکل (۷)، فرم طراحی شده جهت بررسی وضعیت فاکتورهای وابستگی و اولویت‌بندی فرایندهای مدیریت دانش به همراه ورودی‌های مربوط به فاکتورهای وابستگی در جدول (۳)، آمده و با استفاده از اسلایدرهای وارد شده نشان داده شده است. در ادامه برای مقایسه صحت عملکرد مدل ممدانی با ۱۵۶ قانون، مدل سوگینو با ۱۵۶ قانون را طراحی می‌کنیم. برای هر کدام از (متغیرهای ورودی) فاکتورها (و متغیرهای خروجی) فرایندها، دو تابع عضویت از نوع گاوسی تعریف شد که در شکل (۸) نشان داده شده اند. در جدول (۴)، نتایج حاصل از اولویت بندی فرایندهای مدیریت دانش با ورودی‌های یکسان مربوط به روش فرناندز و همکارش، گام دوم طراحی سیستم فازی مبتنی بر قانون نشان داده شده است.

نتایج به دست آمده که خروجی حاصل از سیستم فازی طراحی شده در مرحله دوم هستند و با استفاده از روش مرکز ثقل فازی‌زدایی شده اند، در جدول (۴)، نشان داده شده اند. این نتایج با نتایج مربوط به اولویت‌بندی فرایندهای مدیریت دانش در روش فرناندز و همکارش و نتایج مربوط به روش مرحله اول طراحی سیستم فازی منطبق هستند. همچنین، اختلاف میان اعداد به دست آمده مربوط به هر فرایند نشان دهنده انعطاف‌پذیری بیشتری در امتیازدهی به فرایندهاست که موجب می‌شود اولویت‌بندی دقیق‌تری از فرایندها به دست آید.

۵-۲- گام دوم : طراحی سیستم فازی نوع اول مبتنی

بر قانون جهت تعیین راهبرد مدیریت دانش

جهت تعیین استراتژی مدیریت دانش، سیستم فازی مبتنی بر قانون دیگری طراحی شده است که متغیرهای ورودی این سیستم، فرایندهای اولویت‌بندی شده مدیریت دانش و متغیر خروجی آن، استراتژی مدیریت دانش می‌باشد. این سیستم با استفاده از امتیازات بدست آمده برای هر فرایند توسط سیستم مربوط به اولویت‌بندی فرایندهای مدیریت دانش ارایه شده در گام سوم به عنوان ورودی، امتیاز مربوط به استراتژی مدیریت دانش را مشخص میکند. این سیستم در ادامه‌ی سیستم ارایه شده در گام سوم عمل کرده کاربر الزامات نقش مستقیمی در تعیین مقدار ورودیهای این سیستم ندارد. در این سیستم، برای هر کدام از متغیرهای ورودی، بر اساس پژوهش واگائو، ۵ تابع عضویت از نوع گاوسی تعریف شده است. یک متغیر خروجی به عنوان استراتژی مدیریت دانش در نظر گرفته شده که برای این متغیر خروجی نیز ۵ تابع عضویت از نوع گاوسی در نظر گرفته شده است. امتیاز بدست آمده برای متغیر خروجی، عددی بین ۰ تا ۱۰۰ بوده که عدد ۰ نشان دهنده استراتژی کاملاً کدگذاری و

هدف از آن ارائه چارچوبی جهت همراستایی فرایندها و استراتژی‌های مدیریت دانش است، استفاده می‌کنیم.

با توجه به مقادیر وارد شده برای شرکت داروگر، که در جدول ۴-۵، نشان داده شده، و با اعمال سیستم فازی طراحی شده، به ترتیب فرایندهای روا لها، برونی‌سازی و راهنمایی‌ها دارای بیشترین اولویت برای اجرا بوده‌اند که نتایج مربوط به آن در جدول ۵-۵، نشان داده شده است.

طبق نتایج به دست آمده در جدول ۵-۵، سیستم فازی پیشنهادی در مقاله حاضر، فرایندهایی را توصیه کرده است که طبق چارچوب ارائه شده توسط بوسوا و وینکتا چلم در سال ۲۰۱۳، به استراتژیهای سیستم گرا مربوط هستند و فرایندهای اجتماعی‌سازی مربوط به ایجاد و اشتراک‌گذاری دانش، ترکیب‌سازی و تبادل، که در حیطه استراتژی انسان گرا قرار می‌گیرند، کمترین اولویت را دارا هستند. این نتایج علاوه بر انطباق با نتیجه پژوهش (خدیر، نصرآبادی و فلاح)، توانسته اولویت‌بندی فرایندهای مدیریت دانش در استراتژی سیستم گرا را نیز مشخص کند.

جدول (۴) مقایسه روش فرناندز و روش ممدانی و روش سوگینو

روش	فرایند	روابط	رسانایی	فروری‌سازی	فروری‌سازی	تبادل	تولید دانش	تولید دانش	تولید دانش
روش فرناندز	۴	۶	۱،۵	۲،۵	۲	۵	۵،۵	۳	۳
رتبه بندی اولویتها (فرناندز)	۴	۱	۸	۶	۷	۳	۲	۵	۵
روش ممدانی (۱۵۶ قانون)	۵۶،۷۹۵۵	۸۴،۱۶۲	۱۵،۶۵۷۲	۳۲،۶۸۰۲	۲۹،۲۲۲۲	۷۰،۵۰۴۵	۷۲،۷۸۴۳	۴۳،۰۳۴۸	۴۳،۰۳۴۸
رتبه بندی اولویتها (ممدانی)	۴	۱	۸	۶	۷	۳	۲	۵	۵
روش سوگینو (۱۵۶ قانون)	۵۳،۸۱۷۵	۷۸،۵۲۲۲	۱۶،۷۶۰۵	۳۲،۲۰۰۹	۲۹،۱۱۲۸	۶۶،۱۶۹۸	۶۸،۲۲۸۶	۴۱،۴۶۵۱	۴۱،۴۶۵۱
رتبه بندی اولویتها (سوگینو)	۴	۱	۸	۶	۷	۳	۲	۵	۵

جدول (۵) امتیازات روش ممدانی و سوگینو به عنوان ورودی سیستم فازی تعیین استراتژی عمل میکند

به کارگیری دانش		بدست آوردن دانش		اشتراک گذاری دانش		کشف دانش		استراتژی	
روش	تعداد	روش	تعداد	روش	تعداد	روش	تعداد	روش	تعداد
روش فرناندز	۴	۶	۱،۵	۲،۵	۲	۵	۵،۵	۳	روش فرناندز
روش ممدانی (۱۵۶ قانون)	۵۶،۷۹۵۵	۸۴،۱۶۲	۱۵،۶۵۷۲	۳۲،۶۸۰۲	۲۹،۲۲۲۲	۷۰،۵۰۴۵	۷۲،۷۸۴۳	۴۳،۰۳۴۸	روش ممدانی (۱۵۶ قانون)
روش سوگینو (۱۵۶ قانون)	۵۳،۸۱۷۵	۷۸،۵۲۲۲	۱۶،۷۶۰۵	۳۲،۲۰۰۹	۲۹،۱۱۲۸	۶۶،۱۶۹۸	۶۸،۲۲۸۶	۴۱،۴۶۵۱	روش سوگینو (۱۵۶ قانون)

جدول (۶) بررسی فاکتورهای مربوط به داروگر

فرایندها	سازمان نمونه	مکانیکی	تاجدودی	تاجدودی تأکید بر رهبری هزینه ها	تاجدودی تأکید بر بروکراتیک	تاجدودی تأکید بر رهبری هزینه ها	تاجدودی تأکید بر بروکراتیک	تاجدودی تأکید بر رهبری هزینه ها	تاجدودی تأکید بر بروکراتیک
فرایندها	سازمان نمونه	مکانیکی	تاجدودی	تاجدودی تأکید بر رهبری هزینه ها	تاجدودی تأکید بر بروکراتیک	تاجدودی تأکید بر رهبری هزینه ها	تاجدودی تأکید بر بروکراتیک	تاجدودی تأکید بر رهبری هزینه ها	تاجدودی تأکید بر بروکراتیک
سازمان نمونه	مکانیکی	تاجدودی	تاجدودی تأکید بر رهبری هزینه ها	تاجدودی تأکید بر بروکراتیک	تاجدودی تأکید بر رهبری هزینه ها	تاجدودی تأکید بر بروکراتیک	تاجدودی تأکید بر رهبری هزینه ها	تاجدودی تأکید بر بروکراتیک	تاجدودی تأکید بر بروکراتیک
شرکت داروگر	مکانیکی	تاجدودی	تاجدودی تأکید بر رهبری هزینه ها	تاجدودی تأکید بر بروکراتیک	تاجدودی تأکید بر رهبری هزینه ها	تاجدودی تأکید بر بروکراتیک	تاجدودی تأکید بر رهبری هزینه ها	تاجدودی تأکید بر بروکراتیک	تاجدودی تأکید بر بروکراتیک

جدول (۷) تطابق فاکتورهای مربوط به شرکت داروگر با روش فرناندز

فرایندها	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت
فرایندها	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت
سازمان نمونه	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت
شرکت داروگر	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت	تابع عضویت

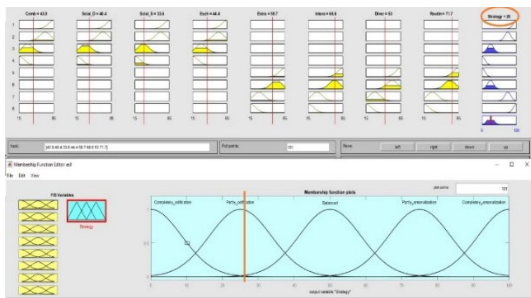
فرناندز در این پژوهش فرآیندهای کشف و اشتراک‌گذاری دانش را همراستا با استراتژی شخصی‌سازی و فرآیندهای بدست آوردن و به کارگیری دانش را همراستا با استراتژی کدگذاری دانسته است. مجموعه‌ای کامل قوانین طراحی شده مربوط به این سیستم فازی در پیوست ۲ آورده شده است. جهت فازی‌زدایی سیستم طراحی شده برای تعیین استراتژی مدیریت دانش، همانند سیستم ارایه شده در گام سوم، از روش مرکز ثقل استفاده شده است. در نهایت درجه عضویت امتیاز بدست آمده بین ۰ تا ۱۰۰ حاصل از فازی‌زدایی در مجموعه‌های فازی تعریف شده برای خروجی، تعیین می‌شود. برچسب متناظر با مجموعه فازی که حداکثر درجه عضویت خروجی را دارد مبین استراتژی مدیریت دانش سازمان می‌باشد. جهت بررسی صحت عملکرد سیستم طراحی شده، ورودیهای مربوط به سازمان نمونه‌ی ذکر شده در روش فرناندز را به سیستم وارد کرده و نتایج را مقایسه می‌کنیم. سازمان مذکور دارای مشخصات فرضی به صورت زیر می‌باشد: (عدم قطعیت وظایف بسیار زیاد- وابستگی متقابل وظایف بسیار زیاد- نوع دانش تا حد زیادی ضمنی- نوع دانش کاملاً رویه‌ای- اندازه سازمان بسیار کوچک- استراتژی کسب و کار کاملاً هزینه کم- عدم قطعیت محیط بسیار زیاد) و ورودیهای درج شده در جدول ۴-۲، ورودیهای مربوط به سازمان نمونه ذکر شده در روش فرناندز سیستم طراحی شده در این مقاله وارد شده است تا امتیازات مربوط به فرآیندها و تعیین استراتژی مدیریت حاصل آید. نتایج حاصله در جدول (۵) مقایسه شده اند.

همانطور که در جدول (۵) نشان داده شده است، امتیازات روش ممدانی و سوگینو به عنوان ورودی سیستم فازی تعیین استراتژی عمل میکند و با توجه به شکل (۱۱) و عدد خروجی مرکز ثقل (۴۲) و مقایسه با توابع عضویت خروجی در شکل (۱۱) در می‌یابیم که استراتژی (تا حدی کدگذاری - تلفیقی) پیشنهاد مدل ممدانی به عنوان استراتژی مناسب برای مدیریت دانش این سازمان نمونه تعیین کند. با توجه به شکل (۱۲) و عدد خروجی مرکز ثقل (۴۱.۵) و مقایسه با توابع عضویت خروجی در شکل (۱۲) در می‌یابیم که استراتژی (تا حدی کدگذاری - تلفیقی) پیشنهاد مدل سوگینو به عنوان استراتژی مناسب برای مدیریت دانش این سازمان نمونه تعیین کند.

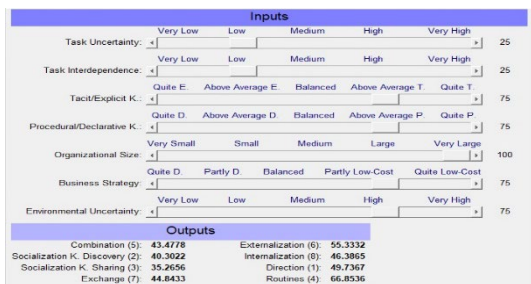
۵-۳- گام سوم: راستی آزمایی فازی با ۱۵۶ قانون

روش ممدانی و سوگینو

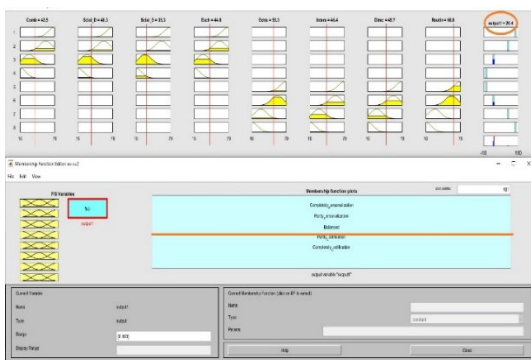
در پژوهش «خدیر، نصری نصرآبادی و فلاح» به عنوان نمونه، در مورد شرکت داروگر، با توجه به بررسی‌های مربوط به فاکتورهای سازمان، استراتژی تا حدودی سیستم گرا به عنوان استراتژی مدیریت دانش با قابلیت پیاده‌سازی موفقیت‌آمیز شناخته شده است. فاکتورهای مورد بررسی در پژوهش آن‌ها برای شرکت داروگر در جدول (۳)، مشخص شده اند. فاکتورهای تطبیق داده شده مربوط به شرکت داروگر با فاکتورهای جدول (۳)، در جدول (۴)، نشان داده شده است. برای مقایسه نتایج حاصل از اولویت‌بندی فرایندها با نتایج پژوهش «خدیر، نصری نصرآبادی و فلاح»، از چارچوب ارائه شده توسط بسوا و وینکتا چلم که



شکل (۱۵) تعیین استراتژی پژوهش خدیور و همکاران به روش مدل ممدانی ۱۵۶ قانون



شکل (۱۶) فرم مقداردی به فاکتورهای وابستگی با توجه به روش خدیور و تعیین اولویت بندی فرایندهای مدیریت دانش روش سوگینو



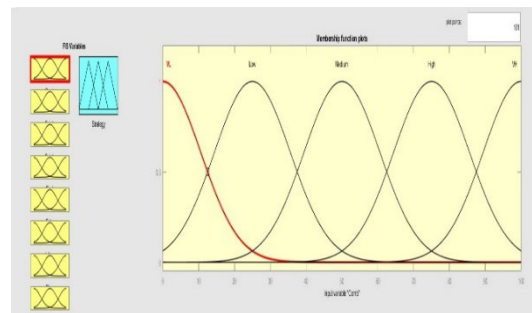
شکل (۱۷) تعیین استراتژی پژوهش خدیور و همکاران به روش مدل سوگینو ۱۵۶ قانون

جدول (۸) نتایج حاصل از مدل پیشنهادی فازی جهت اولویت بندی فرایندهای مدیریت دانش در شرکت داروگر

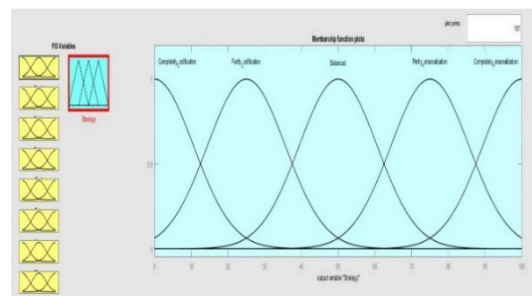
فرایند	روشنایی	توسعه	توسعه	توسعه	توسعه	توسعه	توسعه	توسعه	توسعه
روش	توسعه	توسعه	توسعه	توسعه	توسعه	توسعه	توسعه	توسعه	توسعه
تعیین استراتژی روش خدیور و همکاران	۷۱,۶۵۴۹	۵۳,۰۲۹۴	۴۸,۶۱۹۲	۵۹,۶۸۳۱	۴۴,۳۹۲۴	۳۳,۶۴۴۴	۴۰,۴۲۴۳	۴۳,۹۸۷۶	۴۳,۹۸۷۶
تعیین استراتژی روش ممدانی (۱۵۶ قانون)	۷۱,۶۵۴۹	۵۳,۰۲۹۴	۴۸,۶۱۹۲	۵۹,۶۸۳۱	۴۴,۳۹۲۴	۳۳,۶۴۴۴	۴۰,۴۲۴۳	۴۳,۹۸۷۶	۴۳,۹۸۷۶
تعیین استراتژی روش ممدانی (۱۵۶ قانون)	۷۱,۶۵۴۹	۵۳,۰۲۹۴	۴۸,۶۱۹۲	۵۹,۶۸۳۱	۴۴,۳۹۲۴	۳۳,۶۴۴۴	۴۰,۴۲۴۳	۴۳,۹۸۷۶	۴۳,۹۸۷۶
تعیین استراتژی روش سوگینو (۱۵۶ قانون)	۷۱,۶۵۴۹	۵۳,۰۲۹۴	۴۸,۶۱۹۲	۵۹,۶۸۳۱	۴۴,۳۹۲۴	۳۳,۶۴۴۴	۴۰,۴۲۴۳	۴۳,۹۸۷۶	۴۳,۹۸۷۶
تعیین استراتژی روش سوگینو (۱۵۶ قانون)	۷۱,۶۵۴۹	۵۳,۰۲۹۴	۴۸,۶۱۹۲	۵۹,۶۸۳۱	۴۴,۳۹۲۴	۳۳,۶۴۴۴	۴۰,۴۲۴۳	۴۳,۹۸۷۶	۴۳,۹۸۷۶

۶- بحث و نتیجه گیری

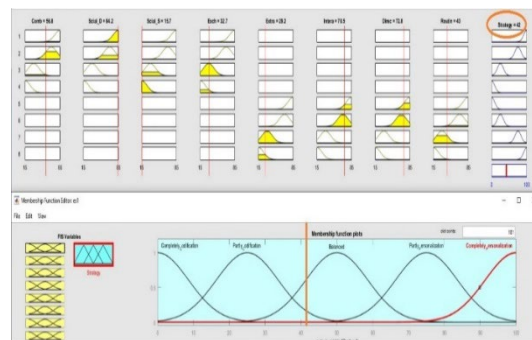
مقایسه روش‌های ممدانی و سوگینو با نتایج حاصل از پژوهش خدیور و همکاران نتایج تقریباً یکسانی دارد. استراتژی مدیریت دانش تعیین شده توسط روش مطرح شده برای شرکت داروگر، استراتژی سیستم گرا



شکل (۱۰) توابع عضویت ورودی تعریف شده برای تعیین استراتژی



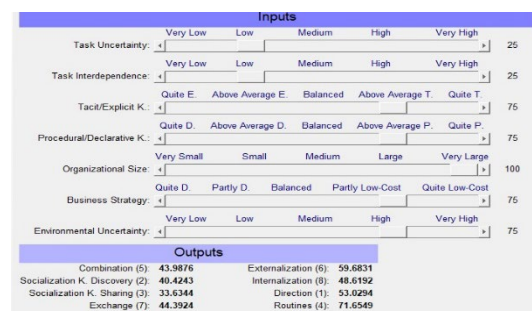
شکل (۱۱) توابع خروجی در روش ممدانی برای تعیین استراتژی



شکل (۱۲) تعیین استراتژی مدل ممدانی



شکل (۱۳) تعیین استراتژی مدل سوگینو



شکل (۱۴) فرم مقداردی به فاکتورهای وابستگی با توجه به روش خدیور و اولویت بندی فرایندهای مدیریت دانش روش ممدانی

- [۲] بهروز آقاشاهی، هومان تحیری، غلامحسین دستغیبی فرد، معصومه محرر. ۱۴۰۰. طراحی سیستم فازی نوع اول مبتنی بر قانون جهت تعیین استراتژی مدیریت دانش در سازمان از طریق اولویت‌بندی فرآیندها مجله علمی پژوهشی رایانش نرم و فناوری اطلاعات، مجله علمی پژوهشی رایانش نرم و فناوری اطلاعات دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ص ۵۳-۶۷
- [۳] محمد حکاک، محمد حسین آزادی، محمد افتخاری. ۱۴۰۰. اولویت‌بندی مولفه‌های مدیریت منابع انسانی پایدار با رویکرد فازی، فصل نامه علمی پژوهشهای مدیریت انتظامی. صفحه ۹۷-۱۲۷
- [۴] ابوطالب مطلبی، علیرضا عالی پور، فرامرز نصری. ۱۳۹۲. شناسایی عوامل موثر بر پیاده‌سازی مدیریت دانش در موسسات آموزشی عالی و رتبه‌بندی آن‌ها به روش تاپسیس فازی، فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات مدیریت آموزشی، سال پنجم، شماره یکم مسلسل ۱۷
- [۵] محمود مدیری، معصومه شکیبایی ثابت، حسن رنگریز. ۱۳۹۳. شناسایی و اولویت‌بندی عوامل انگیزشی مؤثر بر تسهیم دانش بین کارکنان دانشی با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی (F_MCDM) مجله مدیریت توسعه و تحول شماره ۱۸ صفحه ۲۶ - ۹۹
- [۶] هادی شیرویه زاد، حنا شیریروانی، محمد رضا واصلی. ۲۰۱۵. استفاده از فرآیندهای مدیریت دانش به منظور اولویت‌بندی سازمان‌ها به روش فازی تاپسیس با مطالعه موردی، پژوهشنامه مهندسی صنعت شماره ۲ ص ۶۳-۵۲
- [۷] الناز حبیب زاده، رضا انصاری، مجید اسماعیلیان. ۱۳۹۵. شناسایی و اولویت‌بندی عوامل درون سازمانی تأثیرگذار بر یادگیری تکنولوژیک - مورد مطالعه شرکت فولاد مبارکه شماره ۴ ص ۱۲۹-۱۰۵
- [۸] سید جلال موسوی خطیر، ابوالقاسم نادری، مقصود فراسخواه. ۱۳۹۹. شناسایی و اولویت‌بندی مؤلفه‌های سازمان دانش محور. راهبرد فرهنگ شماره ۵۲ ص ۱۶۳-۲۰۰
- [۹] خداکرم سلیمی فرد، عباس عباسی‌زاد، رضا سیاوشی. ۱۳۹۴. شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر پذیرش BYOD در سازمانها با رویکردی فازی دانشکده مدیریت دانشگاه تهران فصلنامه مدیریت فناوری اطلاعات دوره ۷، شماره ۴ ص ۷۶۹ - ۷۸۸
- [۱۰] علی سرابی، مصطفی دستمزدی. ۱۴۰۰. کاربرد روش تحلیل سلسله مراتب فرایند در حالت فازی برای اولویت‌بندی استراتژیها، مرکز بررسی‌ها و مطالعات راهبردی ۱۱۷-۱۴۵
- [۱۱] محمد نایب‌پور، فرید سعیدی، سمانه رئیسی ۱۳۹۱. شناسایی و اولویت بندی معیارهای اخلاقی در مدیریت منابع انسانی، به روش تحلیل سلسله مراتبی گروهی با رویکرد فازی (F_GAHP)، فصلنامه توسعه سال هفتم، شماره ۲۵ صفحه ۱۳۵-۱۶۶
- [۱۲] رضا سپهوند، صابر تقی‌پور، معصومه مومنی مفرد، ۱۳۹۹. شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر در شکل‌گیری فرهنگ جهش تولید با روش دلفی فازی. فصلنامه راهبرد اجتماعی_فرهنگی، سال نهم، شماره سی و ششم. ص ۷۱-۱۰۱
- [۱۳] سید حمزه میرزایی، ۱۳۹۷. رتبه‌بندی سیستمهای رأیگیری با استفاده از منطق فازی. نشریه تصمیمگیری و تحقیق در عملیات دوره ۳، شماره ۴ صفحه ۳۱۷-۳۳۴
- [14] Alavi, M., & D. E. Leidner. 2001. Review: Knowledge Management and knowledge management systems: conceptual foundations and research issues. MIS Quarterly 25 (1). 107-136.
- میباشد و نتایج نشان میدهد، روش پیشنهادی توانسته علاوه بر تعیین استراتژی منطبق با فرآیندهای مربوط به مدیریت دانش را نیز در نظر گرفته و اولویت‌بندی کند. پایبندی به یک استراتژی مدیریت دانش در سازمان، مستلزم اجرای فرآیندهای متناظر با آن می‌باشد. اولویت‌بندی فرآیندهای مدیریت دانش بر اساس فاکتورهای وابستگی، ممکن است موجب شود فرآیندی غیر همراستا با استراتژی تعیین شده نیز در اولویت بالا برای اجرا قرار گیرد. اجرای این فرآیند، که با توجه به فاکتورهای وابستگی دارای اولویت برای اجرا دانسته شده، نه تنها جلوی فرآیندهای مدیریت دانش، استراتژی مربوط به آن را نیز تعیین نماید. با مقایسه روش پیشنهادی و روش فرناندز، روش پیشنهادی توانست علاوه بر کنترل ابهام وعدم قطعیت موجود در بررسی فاکتورهای وابستگی، اولویت‌بندی دقیقتری از فرآیندهای مدیریت دانش داشته باشد. همچنین روش پیشنهادی توانست با استفاده از همراستایی میان فرآیندها و استراتژیهای مدیریت دانش، استراتژی مدیریت دانش را نیز تعیین کند. روش پیشنهادی در مقایسه با روش خدیور و همکاران نیز، توانست علاوه بر تعیین استراتژی مناسب برای مدیریت دانش، فرآیندهای مربوط به مدیریت دانش را نیز اولویت‌بندی کند و در نتیجه راهکار دقیق‌تری جهت پیاده‌سازی مدیریت دانش در سازمان، با توجه به واقعیتهای سازمان، ارائه دهد. همچنین روش پیشنهادی، با مشخص کردن درجات اولویت هرکدام از فرآیندهای مدیریت دانش راهکاری مشخص که به طور صریح نحوه ترکیب هر دو استراتژی برای دستیابی به هم افزایی متناسب لازم است را معین می‌نماید.
- ## ۷- محدودیت
- یکپارچه‌سازی اجزای مختلف (پایگاه داده، پایگاه دانش، استنتاج، تکنیک‌های عددی/الگوریتمی) یک چالش کلیدی است - مدیریت عدم دقت وعدم قطعیت، به ویژه در پرس و جو فازی، استنتاج مبتنی بر قوانین فازی، و بهینه‌سازی فازی، نیاز به توسعه بیشتر دارد - مسائل یکپارچه‌سازی شامل انتقال نادقیق داده، روش‌های مشارکتی و استفاده بازگشتی نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.
- تکیه بر مجموعه داده‌های بزرگ به عنوان محدودیت روش‌های آماری سنتی
- از دیدگاه روش‌شناختی، این پژوهش به علت اندک بودن خبرگان آگاه به مدیریت دانش در کشور، به ارسال پرسش‌نامه به چندین خبره محدود شد. همچنین اعتبار داده‌ها زیر نظر خبرگان محدود شد .
- چارچوب‌های مدیریت دانش سازمانی موجود به اندازه کافی به موضوع عدم دقت دانش به صورت رسمی و جامع رسیدگی نمی‌کند
- ## مراجع
- [۱] خدیور، آمنه، شهره نصرآبادی، و الهام فاح. ۱۳۹۳. طراحی سیستم خبره فازی جهت انتخاب استراتژی مدیریت دانش. پژوهشنامه پردازش و مدیریت اطلاعات ۳۰ (۱): ۹۱-۱۱۹

- An interdisciplinary review," The Journal of Strategic Information Systems, 101600.
- [34] Fteimi, Nora and Hopf, Konstantin, "Knowledge Management in the Era of Artificial Intelligence - Developing an Integrative Framework" (2021). ECIS 2021 Research-in-Progress Papers. 20.
- [35] International Organization for Standardization. 2018. ISO 30401: Knowledge Management Systems — Requirements.
- [36] J.M. Mendel, Uncertain Rule-Based Fuzzy Systems, Introduction and New Directions, 2nd Edition, Springer International Publishing, 2017.
- [37] Jennex, M. E. (2019) "Towards understanding knowledge management strategy," in Proceedings of the International Conference on Information Systems, pp. 1-12.
- [38] M. Shahzad, Y. Qu, A. U. Zafar, X. Ding, S. Rehman, "Translating stakeholders' pressure into environmental practices – The mediating role of knowledge management", Journal of Cleaner Production, vol. 275, pp. 124163, 2020.
- [39] M.M.A. Pinto, J.L. Kovaleski, R.T. Yoshino, R.N. Pagani, "Knowledge and Technology Transfer Influencing the Process of Innovation in Green Supply Chain Management: A Multicriteria Model Based on the DEMATEL Method", Sustainability, vol. 11, pp. 3485, 2019.
- [40] L. Abdullah, N. Zulkifli, "A new DEMATEL method based on interval type-2 fuzzy sets for developing causal relationship of knowledge management criteria Neural Computing and Applications, vol. 31, pp. 4095–4111, 2019.
- [41] Paliszkiwicz, J. (2021) Knowledge management: enterprise-wide strategies. In: Liebowitz, J. (Ed.) A research agenda for knowledge management and analytics. Edward Elgar Publishing Limited: Cheltenham, UK, pp. 31–41.
- [15] I. Becerra-Fernandez, R. Sabherwal, Knowledge Management: Systems and Processes. Armonk, New York: M.E. Sharpe, 2015.
- [16] H. Shakerian, H. D. Dehnavi, and F. Shateri, "A framework for the implementation of knowledge management in supply chain management," Procedia-Social and Behavioral Sciences, vol. 230, pp. 176-183, 2016.
- [17] Bosua, R., & K. Venkitachalam. 2013. Aligning strategies and processes in knowledge management: A framework. Journal of Knowledge Management 17 (3): 331-346.
- [18] Fan, Z. P, B. Feng, Y. H. Sun, & W. Ou. 2009. Evaluating knowledge management capability of organizations: a fuzzy linguistic method. Expert Systems with Applications 36 (2): 3346-3354.
- [19] Gupta, B, L. S. Iyer, & J. E. Aronson. 2000. Knowledge management: practices and challenges. Industrial Management and Data Systems 100 (1). 17-21.
- [20] Holsapple, C. W., & K. D. Joshi. 2000. An investigation of factors that influence the management of knowledge in organizations. Journal of Strategic Information Systems 9 (1): 235-261.
- [21] Kacprzyk, J., & W. Pedrycz. 2015. Handbook of Computational Intelligence. London: Springer.
- [22] Kamara, J. M., C. J. Anumba, & P. M. Carrillo. 2002. A CLEVER approach to selecting a knowledge management strategy. International Journal of Project Management 20 (3): 205-211.
- [23] Lee, K. C., S. Lee, & I. W. Kang. 2005. KMPI: Measuring knowledge management performance. Information & Management 42 (3). 469-482.
- [24] Liang, G. S., J. E. Ding, & C. K. Wang. 2012. Applying fuzzy quality function deployment to prioritize solutions of knowledge management for an international port in Taiwan. Knowledge-Based Systems 33 (1): 83-91.
- [25] Liao, S. H. 2003. Knowledge management technologies and applications—literature review from 1995 to 2002. Expert Systems with Applications 25 (2). 155-164.
- [26] Maier, R. and U. Remus. 2003. Implementing process-oriented knowledge management strategies. Journal of Knowledge Management 7 (4). 62-74.
- [27] Ou, C. X. J., R. M. Davison, & L. H. M. Wong. 2016. Information and Management using interactive systems for knowledge sharing: The impact of individual contextual preferences in China. Information & Management 53 (2). 145-156.
- [28] Patil, S. K. and R. Kant. 2014. A fuzzy AHP-TOPSIS framework for ranking the solutions of Knowledge Management adoption in Supply Chain to overcome its barriers. Expert Systems with Applications 41 (2): 679-693.
- [29] Sabherwal, R. and S. Sabherwal. 2005. Knowledge Management Using Information Technology: Determinants of Short-Term Impact on Firm Value. Decision Sciences 36 (4): 531-567.
- [30] Shakerian, H., H. D. Dehnavi, & F. Shateri. 2016. A framework for the implementation of knowledge management in supply chain management. Procedia Social and Behavioral Sciences 230: 176-183.
- [31] Spiegler, I. 2003. Technology and knowledge: Bridging a 'generating' gap. Information & Management 40 (6): 533-539.
- [32] Oscar Castillo · Patricia Melin · Roberto Sepulveda. 2007. Mediative fuzzy logic: a new approach for contradictory knowledge management. Soft Comput (2008) 12:251–256
- [33] Coombs, C. et al. (2020) "The strategic impacts of Intelligent Automation for knowledge and service work:

پیوست ۱:

۱۵۶ قانون

- ۱- اگر (عدم قطعیت کار خیلی زیاد است) سپس (ترکیب سازی خیلی کم توصیه می شود).
- ۲- اگر (عدم قطعیت کار زیاد است) سپس (ترکیب سازی کم توصیه می شود).
- ۳- اگر (عدم قطعیت کار کم است) سپس (ترکیب سازی زیاد توصیه می شود).
- ۴- اگر (عدم قطعیت کار خیلی کم است) سپس (ترکیب سازی خیلی زیاد توصیه می شود).
- ۵- اگر (وابستگی وظایف خیلی زیاد است) سپس (ترکیب سازی خیلی زیاد توصیه می شود).
- ۶- اگر (وابستگی وظایف زیاد است) سپس (ترکیب سازی زیاد توصیه می شود).
- ۷- اگر (وابستگی وظایف کم است) سپس (ترکیب سازی کم توصیه می شود).
- ۸- اگر (وابستگی وظایف خیلی کم است) سپس (ترکیب سازی خیلی کم توصیه می شود).
- ۹- اگر (دانش ضمنی خیلی زیاد است) سپس (ترکیب سازی خیلی کم توصیه می شود).



۸- اگر (برونی سازی بسیار کم است) و (داخلی سازی بسیار کم است) و (جهت بسیار کم است) و (روال ها بسیار کم است) پس (استراتژی KM کاملاً شخصی سازی شده است)

- ۱۰- اگر (دانش ضمنی زیاد است) سپس (ترکیب سازی کم توصیه می شود).
- ۱۱- اگر (دانش ضمنی کم است) سپس (ترکیب سازی زیاد توصیه می شود).
- ۱۲- اگر (دانش ضمنی خیلی کم است) سپس (ترکیب سازی خیلی زیاد توصیه می شود).
- ۱۳- اگر (استراتژی کسب و کار خیلی زیاد است) سپس (ترکیب سازی خیلی کم توصیه میشود).
- ۱۴- اگر (استراتژی کسب و کار زیاد است) سپس (ترکیب سازی کم توصیه میشود).
- ۱۵- اگر (استراتژی کسب و کار کم است) سپس (ترکیب سازی زیاد توصیه میشود).
- ۱۶- اگر (استراتژی کسب و کار خیلی کم است) سپس (ترکیب سازی خیلی زیاد توصیه میشود).
- ۱۷- اگر (عدم قطعیت محیط خیلی زیاد است) سپس (ترکیب سازی خیلی زیاد توصیه میشود).
- ۱۸- اگر (عدم قطعیت محیط زیاد است) سپس (ترکیب سازی زیاد توصیه میشود).
- ۱۹- اگر (عدم قطعیت محیط کم است) سپس (ترکیب سازی کم توصیه میشود).
- ۲۰- اگر (عدم قطعیت محیط خیلی کم است) سپس (ترکیب سازی خیلی کم توصیه میشود).

پیوست ۲:

- ۱- اگر (ترکیب بسیار زیاد است) و (جامعه پذیری برای ایجاد دانش بسیار زیاد است) و (جامعه پذیری برای به اشتراک گذاری دانش بسیار زیاد است) و (تبادل بسیار زیاد است) پس (استراتژی KM کاملاً شخصی سازی شده است)
- ۲- اگر (ترکیب زیاد است) و (جامعه پذیری برای ایجاد دانش زیاد است) و (جامعه پذیری برای اشتراک دانش زیاد است) و (تبادل زیاد است) پس (استراتژی KM شخصی سازی جزئی است)
- ۳- اگر (ترکیب کم است) و (جامعه پذیری برای ایجاد دانش کم است) و (جامعه پذیری برای اشتراک دانش کم است) و (تبادل کم است) پس (استراتژی KM تا حدی کدگذاری است)
- ۴- اگر (ترکیب بسیار کم است) و (اجتماعی سازی برای ایجاد دانش بسیار کم است) و (جامعه پذیری برای به اشتراک گذاری دانش بسیار کم است) و (تبادل بسیار کم است) پس (استراتژی KM کاملاً کدگذاری است)
- ۵- اگر (برونی سازی بسیار زیاد است) و (داخلی سازی بسیار زیاد است) و (جهت بسیار زیاد است) و (روال ها بسیار زیاد است) پس (استراتژی KM کاملاً کدگذاری است)
- ۶- اگر (برونی سازی زیاد است) و (داخلی سازی زیاد است) و (جهت زیاد است) و (روال ها زیاد است) پس (استراتژی KM تا حدی کدگذاری است)
- ۷- اگر (برونی سازی کم است) و (داخلی سازی کم است) و (جهت پایین است) و (روال ها کم است) پس (استراتژی KM شخصی سازی جزئی است)

The effect of climatic design of the building on the reduction of Embodied energy and comparison with the consumed electricity (A case-study of Shiraz city)

Azar Zinali-kharagy^{1*}, Maryam Haghpanah²

¹ Associate Professor, Department of Architecture, Roudan Branch, Islamic Azad University, Roudan, Iran
zinaliazar@gmail.com

² Associate Professor, Department of Architecture, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran
mar.haghpanah@gmail.com

Abstract: This research has evaluated the reduction of embodied energy consumption in the building (energy consumed during construction) and comparing it with energy consumption during the exploitation period (electricity consumption). First, according to field and library studies, influential independent variables are explained. Then the Embodied energy of a building in hot and dry climate in Shiraz city is calculated after modeling in Excel software. The results in this article include two parts: theoretical results that are the product of literature review and experimental results that are obtained from calculations and analyzed. The results of this research show that the Embodied energy of each square meter of the sample building in the architectural sector is 1.8 megajoules per square meter and the results show that these variables change the Embodied energy between 0.3 and 3.75 megajoules per square meter. As it is known, the embodied energy during the construction of a building with an area of 1080 square meters is equal to three years of electricity consumption of a building. This research also shows that architectural efficiency can reduce the Embodied energy of the building in the construction industry.

Keywords: Embodied Energy, architectural design, building materials, architectural solutions, consumed electricity

JCDSA, Vol. 2, No. 4, Winter 2025 Received: 2024-09-14	Online ISSN: 2981-1295 Accepted: 2024-12-31	Journal Homepage: https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa Published: 2025-03-20
CITATION	Zinali, A ., Haghpanah, M ., " <i>reduction of Embodied energy and comparison with the consumed electricity (A case study of Shiraz city)</i> ", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 2, No. 4, pp. 70-79, 2025. DOI: 00.00000/0000	
	COPYRIGHTS 	

©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

1-Introduction

Given the high energy consumption of buildings in Iran and the fact that no research has been conducted on reducing latent energy by utilizing architectural design in residential buildings in the hot and dry climate of Shiraz, the present study aims to fill this research gap. Background studies show that although a number of variables can reduce the energy during operation and electricity of a building, they significantly increase the latent energy of the building, so it is necessary to address this important effect. The ultimate goal of this study is to help construction workers, including architects, to present designs that, given the high volume of construction in the country, in addition to observing all the principles of architectural design, also reduce latent energy. Therefore, the hypothesis that strategies for reducing latent energy during operation increase latent energy is proposed and the question will be answered: What effect do practical strategies for reducing latent energy during operation have on latent energy?

2-Methodology

The type of research in this study is applied and the method of collecting field and library information is used. The data analysis method is quantitative and based on statistics and tables. The analysis in this study is of a quantitative explanatory type. In explanatory analysis, the cause and effect relationships between independent and dependent variables are discussed and examined, and the researcher confirms or rejects the cause and effect relationships between variables and Embodied energy by rejecting or confirming statistical hypotheses, and after analysis, solutions are explained. In this study, a review of the research literature has been used to select the method of calculating the Embodied energy of materials and implementation details and selecting variables. First, the Embodied energy of the building is calculated in Excel software. Then, the Embodied energy of the entire building is compared with the changes in the energy reduction variables during operation, and then the analysis is performed. According to the research literature, the components of energy consumption reduction during operation in climate design are considered as independent variables and Embodied energy as dependent variables.

3-Results and discussion

In this study, to prove the hypothesis, after reviewing the research literature, the design variables effective on

reducing energy during operation in hot and dry climates were determined. In order to determine the effect of the variables on the total Embodied energy in the building under study, it was necessary to calculate the total Embodied energy of the building, and then in the table designed in Excel, the research variables could be changed each time and the Embodied energy results extracted. This was done by examining 8 variables. The total Embodied energy of the building under study, calculated in Shiraz with an area of 1080 square meters, was 1944 (Gigajoules), and the Embodied energy per square meter of the building was 1.8 Gigajoules. In examining the energy consumption variables during operation and Embodied energy, the following results were obtained. Thermal insulation, double-glazed glass, glazing, and pilot lights reduce energy consumption, but increase Embodied energy in the building. Reducing the surface area of external walls, reducing the surface area of openings, and building density reduce Embodied energy and reduce energy consumption. Variables such as building orientation and opening orientation reduce energy during operation but have no effect on the latent heat.

4-Conclusion

The results show that the research variables cause the Embodied energy to change between 0.3 and 3.75 megajoules per square meter. The researcher, in examining the electrical energy consumption of a building and the Embodied energy, has concluded that the Embodied energy during the construction of a building with an area of 1080 square meters is equal to the three-year electricity consumption of a building. Therefore, according to the research objectives, the following solutions are effective in the Shiraz climate.

1-Architects can calculate the effect of increasing spaces and areas according to the Embodied energy table of the building and avoid additional spaces and details in the plan and provide solutions in the design that reduce the energy during operation and Embodied energy.

2-The porch and central courtyard in this climate, although they reduce the energy during operation, significantly increase the Embodied energy of the building.

3-In the study of climate design, the use of windows with fewer surfaces and external walls with fewer surfaces and a dense plan reduces energy during operation and reduces the Embodied energy of the building.

4-The use of multi-pane glass and thermal insulation reduces energy during operation but increases the Embodied energy of the building, but this increase in Embodied energy is not significant.





تأثیر طراحی اقلیمی ساختمان بر کاهش انرژی نهفته و مقایسه با برق مصرفی (نمونه موردی شهر شیراز)

آذر زینلی خراجی^{۱*}، مریم حق پناه^۲

۱- گروه معماری، واحد رودان، دانشگاه آزاد اسلامی، رودان، ایران (com_zinaliazar@gmail)

۲- گروه معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران (com_haghpahanah@gmail_mar)

چکیده: این پژوهش به ارزیابی کاهش مصرف انرژی نهفته در ساختمان (انرژی مصرف شده در زمان ساخت) و مقایسه آن با مصرف انرژی در دوره بهره برداری (برق مصرفی) پرداخته است. ابتدا با توجه به مطالعات میدانی و کتابخانه ای متغیرهای مستقل تاثیرگذار تبیین می شوند. سپس انرژی نهفته یک ساختمان در اقلیم گرم و خشک در شهر شیراز پس از مدل سازی در نرم افزار اکسل محاسبه می گردد. نتایج در این مقاله شامل دو بخش است: نتایج نظری که محصول بررسی متون است و نتایج تجربی که از محاسبات حاصل شده و تحلیل گردیده است. دستاوردهای این پژوهش نشان می دهد که انرژی نهفته هر مترمربع ساختمان نمونه در بخش معماری ۱/۸ مگاژول در هر مترمربع است و نتایج نشان می دهد که این متغیرها باعث تغییر انرژی نهفته بین ۰/۳ تا ۳/۷۵ مگاژول در هر مترمربع می گردند. همانطور که مشخص است انرژی نهفته زمان ساخت یک ساختمان با متر ۱۰۸۰ مترمربع برابر با مصرف سه سال برق مصرفی یک ساختمان می باشد. این تحقیق همچنین نشان می دهد که با راهکارهای معماری می توان انرژی نهفته ساختمان را در صنعت ساختمان کاهش داد.

واژه های کلیدی: انرژی نهفته، طراحی معماری، مصالح ساختمانی، روش های معماری، برق مصرفی

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴

تحقیق به این پرسش پاسخ داده خواهد شد که راهبردهای کاربردی کاهش انرژی زمان بهره برداری چه تاثیری بر انرژی نهفته دارند؟ راهکارهای ارائه شده در این تحقیق در کل ساختمان ها بر اساس محاسبه انرژی نهفته هر ساختمان قابل تعمیم است و باعث کاهش مصرف انرژی نهفته به عنوان راه حل کاهش تاثیرات زیست محیطی می گردد.

۲- انرژی نهفته ساختمان

ساختمان ها با انواع مصالح ساختمانی که به انرژی در سراسر مراحل تولید، استفاده و تخریب خود نیاز دارند، ساخته شده اند. انرژی نهفته مواد ساختمانی مختلف وابسته به فرایند تولید آن است و محتوای انرژی نهفته تا حد زیادی در انواع مختلف ساخت متغیر است (انرژی نهفته را به عنوان کل انرژی مورد نیاز در ایجاد یک ساختمان، از جمله انرژی مستقیم مورد استفاده در روند ساخت، مونتاژ و انرژی غیر مستقیم، که لازم است برای تولید مواد و قطعات ساختمان مصرف شود تعریف می کنند [۱]. انرژی نهفته عبارت است از انرژی مصرف شده در طول استخراج و فرآوری مواد خام، حمل و نقل مواد خام اصلی، تولید

۱- مقدمه

با توجه به مصرف بالای انرژی ساختمان در ایران و با توجه به اینکه هیچ پژوهش جامعی در مورد کاهش انرژی نهفته با بهره گیری از طراحی معماری در ساختمان های مسکونی در اقلیم گرم و خشک شیراز صورت نگرفته است. پژوهش حاضر با هدف پرکردن این خلأ تحقیقاتی و دستیابی به نتایج عملی و فنی و اقتصادی مطلوب صورت گرفته است. مطالعات پیشینه تحقیق نشان می دهد که هر چند تعدادی از متغیرها می توانند انرژی زمان بهره برداری و برق ساختمان را کاهش دهند اما به طور قابل توجهی باعث افزایش انرژی نهفته ساختمان می گردند. پس ضرورت دارد که به این تاثیر مهم پرداخته شود. هدف نهایی این پژوهش این است که به دست اندرکاران ساخت و ساز از جمله معماران کمک کند که با توجه به حجم بالای ساخت و ساز در کشور طرح هایی را ارائه دهند که علاوه بر رعایت همه اصول طراحی معماری، به کاهش انرژی نهفته نیز بپردازند. بنابراین این فرضیه که راهبردهای کاهش انرژی زمان بهره برداری انرژی نهفته را افزایش می دهند مطرح می گردد و با توجه به راهبرد علت و معلولی



این تحقیق انتخاب شده است، که از این تعداد ۷۰ مورد انتخاب گردیده است که پس از غربالگری نهایی ۵۵ مورد که با اهداف و فرضیه تحقیق همخوانتر بودند و در بازه زمانی ده سال قرار داشتند انتخاب شدند. در جدول (۱) نتایج بررسی ادبیات تحقیق با توجه به نمونه های موردی و نوع نمونه و نوع تحقیق و زمینه پژوهش و سایر موارد دسته بندی شده است. که هر چند این محققین در متن ارجاع داده نشده اند اما در روش های محاسبات و مقدار انرژی نهفته و متغیرهای تحقیق از این پیشینه های تحقیق استفاده شده اند. همچنین در بررسی ادبیات تحقیق ۱۴ محقق به رابطه انرژی نهفته و انرژی زمان بهره برداری (مصرفی) پرداخته اند که در زیر شرح داده شده است.

در [۱] نشان داد که یک ساختمان اداری دو طبقه با نسبت ۲ در ۵.۵ دارای انرژی عملیاتی تقریباً ۱۱.۴ میلیون مگاژول در طول ۲۵ سال است. که با رعایت جهت گیری و بهینه سازی ساختمان انرژی عملیاتی ۹.۴ میلیون مگاژول برای ۲۵ سال می باشد. همچنین نتایج نشان داد که انرژی نهفته این پروژه حدود ۳ میلیون مگاژول و انرژی عملیاتی حدود ۱۱ میلیون مگاژول (در طول ۲۵ سال) است. پایان نامه [۲]، با عنوان ارزیابی انرژی نهفته سازه ساختمان بیان می کند که تلاش های شدیدی برای کاهش انرژی عملیاتی انجام می گیرد. با این حال ممکن است انرژی عملیاتی کاهش یابد، اما انرژی نهفته افزایش یابد. بنابراین در تحقیق خود انرژی نهفته سازه ساختمان را محاسبه می کند و نتیجه می گیرد که نوع مواد سازه ای در طراحی ساختمان های که حفظ محیط داخلی را از طریق استفاده موثر از انرژی دارند کاهش میدهد. همچنین استفاده از طراحی انرژی منفعل، (کاهش مصرف انرژی، از طریق مصالح با انرژی نهفته کمتر و کاهش مصرف انرژی با استفاده از مصالح بازیافتی و بازسازی) باعث کاهش انرژی ساختمان ها می باشد. در [۳] به مقایسه انرژی عملیاتی و انرژی نهفته پرداخته شده است. بیان می کند که، ممکن است انرژی عملیاتی کاهش پیدا کند اما انرژی نهفته افزایش یابد.

بررسی ۷۳ مورد را در ۱۳ کشور در [۴] نشان داد که انرژی نهفته ۱۰-۲۰ درصد از کل انرژی چرخه زندگی را در مقایسه با ۸۰-۹۰ درصد برای انرژی عملیاتی نشان می دهد. مقاله [۵] انرژی عملیاتی در مقابل انرژی نهفته را با استفاده از دستورالعمل ساختمان جدید انرژی در ۹۷ آپارتمان نشان دادند. انرژی عملیاتی در ساختمان های امروز به طور متوسط ۲/۱۸۷ مگاژول بر مترمربع بود و انرژی نهفته حدود ۲/۳۷۲ مگاژول بر مترمربع است، که حدود ۳/۲۵٪ برای عمر ۵۰ ساله را نشان می دهد. کاهش عمده انرژی عملیاتی به این معنی است که انرژی مورد نیاز برای ساخت مصالح ساختمانی، انرژی نهفته، در آینده نزدیک به ۴۰۰ درصد انرژی عملیاتی خواهد رسید. در بخش دوم کار، اقدامات صرفه جویی در انرژی مشترک، اندازه گیری انرژی نهفته و تاثیر آن ها در برآورد برخی از صرفه جویی های عملیاتی انرژی می باشد. نتایج نشان می دهد که زمان بازپایی حدود ۴ تا ۹ سال بسته به اقدامات مورد بررسی است [۶]. برای یک خانه کوچک حدود ۶۵ مترمربع، میانگین مصرف انرژی می تواند در محدوده ۱۲۰ تا ۱۵۰ واحد (کیلووات ساعت) در هر ماه باشد. این بدان معناست که در حدود

مصالح ساختمانی و قطعات و استفاده از انرژی برای فرآیندهای مختلف در طول ساخت و تخریب ساختمان. ساختمان ها در طول مراحل پیش از ساخت، فرآیندهای مختلف ساخت و مراحل پس از ساخت، مانند بازسازی و نوسازی و تخریب نهایی انرژی مصرف می کنند. این مراحل شامل استخراج مواد خام، حمل و نقل، ساخت، مونتاژ، نصب و راه اندازی و همچنین جداسازی قطعات، ساختارزدایی و تخریب آن ها است انرژی مصرف شده در مراحل چرخه حیات یک ساختمان در مجموع به عنوان انرژی نهفته تفسیر شده است [۲]. با توجه به تعاریف ارائه شده، انرژی نهفته یک ساختمان را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\text{انرژی نهفته ساختمان} = \text{انرژی نهفته مصالح} + \text{انرژی نهفته حمل} + \text{انرژی مصرفی در سایت}$$

۳- مکان پژوهش

با توجه به اینکه ساختمان های اقلیم گرم و خشک در گروه بندی میزان مصرف انرژی، در گروه مصرف انرژی بالا قرار دارند و کاهش مصرف انرژی در این شهرها از اولویت های کشور می باشد، مکان پژوهش در اقلیم گرم و خشک و شهر شیراز انتخاب شده است. شهر شیراز در استان فارس واقع شده و از نظر تقسیمات کشوری و سیاسی مرکز این استان است. برای انجام این تحقیق در ابتدا یک ساختمان با توجه به فراوانی در شهر شیراز به عنوان نمونه موردی با جزئیات اجرایی مشخص انتخاب می گردد. نقشه ساختمان شاهد در زمینی به مساحت ۳۰۰ مترمربع و به ابعاد ۱۵ در ۲۰ متر قرار دارد. این ساختمان دارای شش طبقه روی هم کف و یک طبقه در هم کف می باشد که مساحت هر طبقه ۱۸۰ مترمربع و مجموع کل مساحت ساختمان ۱۰۸۰ مترمربع می باشد. این ساختمان با دیوار بلوک سفالی و نمای سنگ و کف طبقات از سرامیک ساخته شده است.

۴- پیشینه تحقیق

بر طبق نظر بسیاری از نویسندگان، بین انرژی زمان بهره برداری و انرژی نهفته ساختمان ارتباط معناداری وجود دارد که به این معنی است که کاهش انرژی زمان بهره برداری منجر به افزایش انرژی نهفته می شود. به عنوان مثال، با کاهش بخشی از پوشش ساختمان و یا راه حل های فنی، کاهش انرژی در بهره برداری می تواند بطور قابل توجهی کاهش یابد. با این حال، انرژی نهفته به دلیل اقدامات صرفه جویی انرژی ممکن است افزایش یا کاهش یابد. در این تحقیق پیشینه پژوهش داخلی و خارجی به دو دسته پایان نامه ها و مقالات دسته بندی شده است. جستجوی ادبیات با رویکرد گلوله برفی انجام شده است که در نتیجه صدها مقاله در مجلات علمی یا پایان نامه ها انتخاب گردیده است. سپس کلیه خلاصه مقالات این لیست از ادبیات بررسی و در نتیجه مقالاتی مرتبط با هدف این تحقیق انتخاب شده است. پس از بررسی پیشینه تحقیق ۱۴۰ مقاله و رساله خارجی و ۲۰ مقاله و پایان نامه داخلی با توجه به اهداف و سولات و فرضیه تحقیق جمع آوری سپس همه آن ها بررسی گردیده است. در نتیجه پژوهش های مرتبط با هدف



۵۴۰ مگاژول در هر ماه در ۱۸۰ واحد یا در کل ۳۲۴ گیگا ژول در طول عمر ۵۰ ساله برای مساحت ۶۵ مترمربع اختصاص می‌یابد. از این رو، انرژی عملیاتی می‌تولند در دامنه ۹۸.۴ گیگا ژول بر مترمربع باشد. انرژی نهفته می‌تولند در شرایط اقلیمی مطلوب بخش قبل توجهی از کل انرژی چرخه زندگی باشد [۷].

برای یک خانه معمولی تک خانواده، درصد انرژی نهفته می‌تواند تا ۴۰٪-۵۰٪ از کل مصرف انرژی اولیه چرخه زندگی را تشکیل دهد [۹]. این مطالعه نشان می‌دهد که علیرغم تأثیرات عظیم مرحله عملیاتی برکربن چرخه عمر ساختمان‌های با سوخت فسیلی، اثرات نهفته بین ۸/۸ و ۲۳/۸ درصد متغیر باشد. تعیین کننده اصلی تأثیر متناسب انرژی نهفته، ماهیت مواد مورد استفاده در ساخت و سازهای ساختمان است. ساختمان‌های که از مواد با جرم حرارتی بالا مانند بتن و آجر ساخته شده‌اند، باعث کاهش انرژی عملیاتی می‌شوند، اما به نوبه خود، اثرات نهفته در کل چرخه عمر را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر ساختمان‌های با قاب چوب و فولاد، افزایش انرژی نهفته بیش از سود حاصل از انرژی عملیاتی می‌باشد، به ویژه هنگامی که ساختمان‌های چوب و قاب فولادی از مواد عایق کافی برخوردار هستند. بنابراین، این نیاز به کاهش انرژی نهفته به عنوان ابزاری برای کاهش تأثیرات زیست محیطی کل زندگی را نشان می‌دهد [۱۰].

در [۱۱] پیشنهاد می‌شود که در حالی که اندازه‌گیری انرژی عملیاتی آسان است، تعیین انرژی نهفته پیچیده و وقت‌گیر است. افزون‌براین، هیچ روش عمومی قلیل قبول برای محاسبه انرژی نهفته با دقت و پایدار وجود ندارد، بنابراین تغییرات گسترده‌ای در ارقام اندازه‌گیری اجتناب‌ناپذیر است. ممکن است اقداماتی برای کاهش انرژی عملیاتی ساختمان‌ها منجر به افزایش انرژی نهفته شود. به عنوان مثال از طریق انتخاب مسئولانه ساختن محصولات، ممکن است به طور قلیل توجهی انرژی عملیاتی و انرژی کلی را کاهش دهد. این را می‌توان با مثال زیر نشان داد.

برای بهبود عملکرد حرارتی دیوارهای خارجی ضخامت لایه عایق می‌تواند افزایش یابد. استفاده از عایق‌های بیشتر بدین معنی است که انرژی نهفته بیشتری لازم است. عملکرد حرارتی بهبودیافته دیوار موجب کاهش انرژی عملیاتی خواهد شد. بنابراین، در این مثال، افزایش انرژی نهفته منجر به کاهش انرژی عملیاتی می‌شود. مقایسه انرژی کل دو ساختمان با مقادیر مختلف انرژی نهفته که منجر به ارزش‌های عملیاتی مختلفی می‌شود: در طول عمر ساختمان، با انرژی نهفته بالاتر، اما انرژی عملیاتی پایین‌تر می‌تواند انرژی کمتری داشته باشد [۱۲]. با توجه به مطالب بالا تأثیر انرژی نهفته بر ساختمان بیشتر از انرژی عملیاتی یا مصرفی می‌باشد. در جدول (۲) بین انرژی عملیاتی و انرژی نهفته ساختمان مقایسه انجام شده است [۱۳].

۵- روش تحقیق

نوع پژوهش در این تحقیق کاربردی است و روش گردآوری اطلاعات برای تمام مراحل تحقیق شامل گردآوری اطلاعات به صورت اسنادی،

میدانی و کتابخانه‌ای است. روش تحلیل داده‌ها کمی و مبتنی بر آمار و جداول می‌باشند. تجزیه و تحلیل در این پژوهش از نوع کمی تبیینی است. در تجزیه و تحلیل تبیینی، روابط علت و معلول بین متغیرهای مستقل و وابسته مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد و پژوهشگر با رد یا تأیید فرض‌های آماری به تأیید یا رد روابط علت و معلول بین متغیرها و انرژی نهفته می‌پردازد و پس از تحلیل راهکارهایی تبیین می‌شود. در این تحقیق برای انتخاب نحوه محاسبه انرژی نهفته مصالح و جزئیات اجرایی و انتخاب متغیرها از بررسی ادبیات پژوهش استفاده شده است. در ابتدا انرژی نهفته ساختمان در نرم افزار اکسل محاسبه می‌گردد. سپس انرژی نهفته کل ساختمان با تغییر متغیرهای کاهش انرژی زمان بهره‌برداری مقایسه می‌گردد و سپس تحلیل انجام می‌گیرد. بر اساس ادبیات تحقیق مؤلفه‌های کاهش مصرف انرژی زمان بهره‌برداری در طراحی اقلیمی به عنوان متغیر مستقل و انرژی نهفته به عنوان متغیر وابسته و سایر عوامل مانند طراحی سازه و تاسیسات متغیر کنترل می‌باشند.

۶- روش محاسبه انرژی نهفته در تحقیق

به منظور هماهنگی در محاسبات نیاز به واحدی یکسان در انجام تمامی محاسبات است. در این تحقیق واحد انرژی نهفته مگاژول بر کیلوگرم است، که پس از ضرب در جرم حجمی مواد به واحد مگاژول بر مترمکعب تبدیل می‌شود که برای بدست آوردن مقدار انرژی نهفته هر مترمربع ساختمان با واحد گیگاژول برای هر مترمربع ساختمان اندازه‌گیری می‌شود. واحد اندازه‌گیری جرم حجمی کیلوگرم بر مترمکعب است و مصالح ساختمانی در این تحقیق با واحدهای مترمربع و کیلوگرم محاسبه شده‌اند.

در این تحقیق با توجه به مطالعات پیشینه تحقیق که بیشتر از نرم‌افزار اکسل در محاسبات استفاده کرده بودند محقق نیز در این تحقیق برای محاسبات انرژی نهفته از اکسل استفاده کرده است. برای مدل‌سازی و محاسبه مصالح از نرم‌افزارهای بیم شامل: ریویت و اتوکد استفاده شده است. سپس تحلیل داده‌ها در اکسل انجام شده است. در ابتدا جدولی مانند جدول (۳) در برنامه اکسل طراحی می‌شود که انرژی نهفته جزئیات متفاوت را محاسبه نماید. در جدول (۳) اطلاعات موردنیاز برای محاسبه انرژی نهفته جزئیات شامل وزن مخصوص که از مبحث ششم مقررات ملی ساختمان و انرژی نهفته مصالح از اطلاعات دانشگاه بت و ضخامت مصالح در جزئیات اجرایی از اطلاعات کتابخانه‌ای و میدانی بدست آمده است. در این جدول وزن مخصوص مصالح در انرژی نهفته مصالح ساختمانی با واحد مگاژول در کیلوگرم که در جدول (۲) انرژی نهفته تعدادی از مصالح آورده شده است، ضرب می‌گردد تا انرژی نهفته با واحد مگاژول در هر مترمکعب بدست آید. سپس در ضخامت و مقدار مصالح که در جزئیات مشخص شده است ضرب می‌گردد تا انرژی نهفته با واحد مگاژول بدست بیاید و از جمع همه مصالح آن جزئیات انرژی نهفته هر جزئیات محاسبه می‌گردد و از جمع همه جزئیات انرژی نهفته کل هر جزئیات محاسبه می‌گردد. باید همه



جدول (۱): جمع بندی منابع در پیشینه تحقیق

نتایج بررسی در ۵۵ تحقیق از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۲۱					
نوع تحقیق		زمینه محقق		گرایش محققین	
تر	مقاله	تعاریف انرژی نهفته	متغیر	غیر معماری	معماری
۱۳	۴۲	۵	۵۰	۲۵	۳۰
%۲۳	%۷۷	%۱۰	%۹۰	%۴۶	%۵۴
تعداد ساختمان		انتخاب نمونه موردی		نرم افزار محاسبات	
بیشتر	یک خانه	غیر مسکونی	مسکونی	سایر نرم افزارها	اکسل
۱۹	۲۴	۷	۳۶	۹	۵
%۴۴	%۵۶	%۱۷	%۸۳	%۶۴	%۳۶

جدول (۲): جدول انرژی نهفته مصالح متداول (ماخذ: نگارنده)

ردیف	مصالح مصرفی	وزن مخصوص kg/M ³	انرژی نهفته MJ/kg	انرژی نهفته MJ/M ³
۱	ملات ماسه سیمان	۲۱۰۰	۱/۲۷	۲۶۶۷
۲	سنگ نما تراورتن	۲۴۰۰	۳۶	۸۶۴۰۰
۳	دیوار آجری	۱۷۰۰	۷/۲	۱۲۲۴۰
۴	گچ پرداختی	۱۳۰۰	۴/۵	۵۸۵۰
۵	بلوک سفالی	۱۳۰۰	۰/۱۵	۲۶۰
۶	عایق رطوبتی	۱۵	۰/۴۷	۷/۰۵
۷	سرامیک	۱۷۰۰	۰/۰۴	۶۸
۸	بتن پوک	۶۰۰	۰/۲۴	۱۴۴
۹	بتن کف سازی	۲۴۰۰	۱	۲۴۰۰
۱۰	موزائیک	۲۵۰۰	۰/۹۴	۲۱۱۵
۱۱	آجر ۵×۱۰×۲۱	۶۰۰	۷/۲	۴۳۲۰
۱۲	سازه فلزی	۷۲۰۰	۲۹/۲	۲۱۲۴۰
۱۳	شیشه	۲۵۰۰	۱۵	۳۷۵۰۰
۱۴	آلومینیم (کامپوزیت)	۲۷۰۰	۱۹۱	۵۱۵۷۰۰

جدول (۳): محاسبه انرژی نهفته در هر جزئیات (ماخذ: نگارنده)

متر ^۲	ضخامت (متر)	انرژی نهفته MJ/M ³	انرژی نهفته MJ/kg	وزن مخصوص kg/M ³	مصالح مصرفی	ردیف
A4	A3	A1*A2	A2	A1	A	۱
B4	B3	B1*B2	B2	B1	B	۲
C4	C3	C1*C2	C2	C1	C	۳
MJ جمع کل						

جزئیات را در مترها ضرب کرد تا انرژی نهفته کل ساختمان محاسبه گردد. همچنین با توجه به تغییر متغیرهای مستقل در جدول اکسل نهایی انرژی نهفته کل محاسبه می گردد. در انتها پس از تحلیل نتایج راهکارهایی برای معماران برای کاهش انرژی نهفته ساختمان مناسب با طراحی اقلیمی ارائه می گردد.

۷- متغیرهای کاهش مصرف انرژی ساختمان

در این قسمت پس از بررسی ادبیات موضوع، متغیرهای مناسب برای کاهش انرژی زمان مصرفی (برق) ساختمان شامل: عایق حرارتی، پنجره با شیشه دوجداره، وجود رواق، کاهش سطح پنجره، کاهش مساحت دیوارهای خارجی، وجود پیلوت در ساختمان، جهت پنجره ها و جهت ساختمان در اقلیم گرم و خشک شیراز انتخاب گردید. اثر هر کدام از متغیرها بر کاهش انرژی نهفته ساختمان بررسی و تحلیل می گردد.

۷-۱- متغیر عایق حرارتی بر انرژی نهفته

ممکن است اقداماتی برای کاهش انرژی زمان بهره برداری ساختمان ها منجر به افزایش انرژی نهفته شود. به عنوان مثال از طریق انتخاب مسئولانه ساختن محصولات، ممکن است به طور قابل توجهی انرژی زمان بهره برداری و انرژی کلی را کاهش دهد. این را می توان با مثال زیر نشان داد. برای بهبود عملکرد حرارتی دیوارهای خارجی ضخامت لایه عایق می تواند افزایش یابد. استفاده از عایق های بیشتر بدین معنی است که انرژی نهفته بیشتری لازم است. عملکرد حرارتی بهبود یافته دیوار موجب کاهش انرژی زمان بهره برداری خواهد شد. بنابراین، در این مثال، افزایش انرژی نهفته منجر به کاهش انرژی زمان بهره برداری (برق) می شود. مقایسه انرژی کل دو ساختمان با مقادیر مختلف انرژی نهفته که منجر به ارزش های زمان بهره برداری مختلفی می شود، در طول عمر ساختمان، ساختمان با انرژی نهفته بالاتر، اما انرژی زمان بهره برداری پایین تر می تواند انرژی کمتری داشته باشد [۸].

در این تحقیق پس از محاسبات انرژی نهفته کل ساختمان شاهد در نرم افزار اکسل که ۱/۸ مگاژول در هر مترمربع بدست آمده است. این بار انرژی نهفته همان ساختمان با اضافه کردن متغیر عایق حرارتی محاسبه می گردد، که نتایج جدول (۴) نشان می دهد. با استفاده از یک لایه عایق حرارتی انرژی مصرفی کمتر می شود. ولی انرژی نهفته ساختمان ۴۴۲ گیگا ژول افزایش می یابد و برای هر مترمربع ساختمان ۳ گیگاژول انرژی نهفته افزایش می آید که پیشنهاد می گردد مصالح جایگزین با انرژی نهفته کمتر استفاده شود.

۷-۲- متغیر شیشه دو جداره بر انرژی نهفته

در جدول محاسبات انرژی نهفته کل این بار محاسبات انرژی نهفته کل با تغییر متغیر شیشه دو جداره انجام شده است که نتایج جدول (۵) نشان می دهد با انتخاب شیشه های دو جداره در ساختمان انرژی مصرفی کاهش می یابد اما انرژی نهفته ۷ گیگا ژول در این ساختمان تغییر می کند که می توان از این افزایش صرفه جویی کرد.

جدول (۴): مقایسه انرژی نهفته کل ساختمان با عایق حرارتی و بدون عایق حرارتی (نگارنده)

ردیف	تغییرات	انرژی نهفته کل ساختمان (کیگا)	ساختمان برای انرژی نهفته
۱	دیوارها و کف های خارجی با یک لایه پلی استایرن میانی به ضخامت ۶ سانتیمتر	۲۹۳۰	۲/۱
۲	ساختمان بدون عایق حرارتی	۲۴۸۸	۱/۸
۳	اختلاف	۴۴۲	۰/۳

جدول (۵): انرژی نهفته با تغییرات در شیشه ها

ردیف	تغییرات	انرژی نهفته کل ساختمان (کیگا)	ساختمان برای انرژی نهفته
۱	بازشوها با شیشه دوجداره	۲۹۹۵	۱/۸
۲	بازشوها بدون شیشه دوجداره	۲۴۸۸	۱/۸
۳	اختلاف	۷	۰

جدول (۶): انرژی نهفته کل ساختمان شاهد با تغییر متغیرهای مصالح نما (نگارنده)

انرژی نهفته کل ساختمان شاهد با تغییر متغیرهای مصالح نما				
انرژی نهفته	نمای سیمانی	نمای آجری	گرافیت سنگ	آلومینیوم نمای
انرژی نهفته گیگا ژول	۶/۲۵	۴۹۲۷	۲۴۹۱	۶۶/۵
انرژی نهفته گیگا ژول بر مترمربع	۸۵.۱	۶۴/۳	۸۴.۱	۷۴/۳

۳-۷- متغیر رواق بر انرژی نهفته

در ابتدا انرژی نهفته هر مترمربع جزئیات رواق در نرم افزار اکسل محاسبات جزئیات ساختمان محاسبه گردیده است که نتایج نشان می دهد هر مترمربع رواق در همکف ۱۰۳۰ مگاژول در هر مترمربع و انرژی نهفته رواق در طبقات ۱۴۹۱ مگاژول در هر مترمربع می باشد. پس نتیجه می گیریم که استفاده از رواق در طراحی معماری برای کاهش انرژی زمان بهره برداری، هر چند که باعث کاهش انرژی زمان بهره برداری می گردد ولی انرژی نهفته را افزایش می دهد.

۴-۷- متغیر سطح بازشوها بر انرژی نهفته

انرژی نهفته هر مترمربع شیشه ۴۵۳ گیگا ژول برای هر مترمربع دیوار است، که پس از بررسی متغیر مساحت بازشوها در دیوارهای خارجی

هر مترمربع بازشو باعث افزایش ۴۸ مگاژول بر مترمربع انرژی نهفته ساختمان می گردد پس نتیجه می گیریم که کاهش سطح بازشوها باعث کاهش انرژی نهفته و انرژی بهره برداری می گردد.

۵-۷- متغیر مساحت دیوار خارجی بر انرژی نهفته

مساحت دیوارهای خارجی طبق محاسبات جدول ۶ با توجه به جزئیات متفاوت تاثیر زیادی بر انرژی نهفته دارد و می تواند انرژی نهفته ساختمان را بین ۱/۸۵ تا ۳/۷۴ گیگاژول بر مترمربع تغییر دهد. بنابراین متغیر مساحت دیوارهای خارجی همانطور که بر انرژی مصرفی زمان بهره برداری موثر است بیشترین تاثیر را بر انرژی نهفته دارد.

۶-۷- متغیر جهت بازشوها بر انرژی نهفته

جهت قرارگیری بازشوها هر چند که تاثیر زیادی بر کاهش انرژی زمان بهره برداری ساختمان دارد، اما بر انرژی نهفته کل ساختمان موثر نیست.

۷-۷- متغیر جهت ساختمان بر انرژی نهفته

در [۱] نشان داده شد که یک ساختمان اداری دو طبقه با نسبت ۲ در ۵/۵۲ دارای انرژی زمان بهره برداری تقریباً ۴/۱۱ میلیون مگاوات در طول ۲۵ سال است. که با رعایت جهت گیری و بهینه سازی ساختمان انرژی زمان بهره برداری ۴/۹ میلیون مگاژول برای ۲۵ سال است. همچنین نتایج او نشان داد که انرژی نهفته این پروژه حدود ۳ میلیون مگاژول و انرژی زمان بهره برداری حدود ۱۱ میلیون مگاژول (در طول ۲۵ سال) است. نتایج نشان می دهد که جهت قرارگیری ساختمان هر چند که در انرژی زمان بهره برداری موثر می باشد اما تاثیری بر انرژی نهفته ندارد.

۸-۷- متغیر پیلوت بر انرژی نهفته

با توجه به محاسبات انرژی نهفته ساختمان انرژی نهفته کفها ۴۰ درصد انرژی نهفته کل ساختمان را شامل می شود. دو عامل مساحت کفها و جزئیات و مقدار انرژی نهفته هر کدام از جزئیات کف ها عوامل موثر بر انرژی نهفته جزئیات است، که این عوامل توسط معماران در زمان طراحی قلیل کنترل می باشند. پس اضافه کردن هر مترمربع در کف باعث افزایش انرژی نهفته می گردد. هر چند که وجود پیلوت که به نوعی اضافه کردن کف است باعث کاهش انرژی زمان بهره برداری در اقلیم گرم و خشک می گردد.

۸- مقایسه انرژی نهفته و انرژی برق مصرفی با

تغییر متغیرها

محقق در ساختمان شاهد مصرف سالانه با توجه به قبوض برق را بدست آورده است، که در بررسی انرژی مصرفی ساختمان شاهد با توجه به فیش های برق ماهانه ساختمان در یک مطالعه میدانی میزان

جدول (۷): تأثیر متغیرهای طراحی و انرژی مصرفی ساختمان (نگارنده)

تغییر متغیرها	مقدار انرژی نهفته کل	انرژی نهفته مگاژول برای هر مترمربع	انرژی مصرفی مگاژول هر مترمربع در سال	مقایسه انرژی مصرفی و نهفته در سال
تغییر در مصالح (نما و دیوار)	۲۵۰۱۰	۱۸/۵	۰/۵۶	۳۳
تغییر در نما (آلومینیوم)	۱۸۷۱۵/۷	۱۳/۸	۰/۵۶	۲۵
تغییر در دیوار (اجری)	۱۴۷۶۰	۶/۵	۰/۵۶	۱۲
تغییر در جزئیات (نرده استیل)	۲۶۶۴/۶	۲	۰/۵۶	۴
تغییر اندازه‌ها	۲۵۳۵	۱/۹	۰/۵۶	۳
ساختمان شاهد	۲۴۹۱/۴	۱/۹	۰/۵۶	۳

جدول (۸): انرژی عملیاتی و انرژی نهفته [۱۷]

انرژی عملیاتی	انرژی نهفته	انرژی عملیاتی	انرژی نهفته
۷۳/۶	۲۵۰/۴	۶۶/۴	۱۸۴
۶۷/۷	۲۴۳/۱	۷۴/۴	۱۶۸/۷
۴۶	۱۴۶/۷	۴۷	۹۹/۷
۴۹/۲	۱۶۴/۹	۵۵/۳	۱۰۹/۵
۴۵/۱	۱۵۴/۱	۳۹/۷	۱۱۴/۴
۴۶/۵	۱۵۴/۳	۳۴/۳	۱۲۰
۴۴/۲	۱۵۲/۸	۳۷/۷	۱۱۵
۵۲/۸	۱۶۲/۴	۳۷/۷	۱۲۴/۷
۳۹/۲	۸۷/۳	۲۱/۳	۶۶
۶۹	۱۵۱/۹	۲۶/۲	۱۲۵/۷
۵۹/۵	۱۵۴/۷	۳۴/۵	۱۲۰/۲
۴۸/۹	۱۳۲/۶	۴۳/۵	۸۹/۱

جدول (۹): نتایج تأثیر متغیرها

ردیف	تغییر	انرژی نهفته تأثیر بر	پهره برداری انرژی زمان تأثیر بر
۱	عایق حرارتی	افزایش	کاهش
۲	شیشه دو جداره	افزایش	کاهش
۳	طراحی رواق	افزایش	کاهش
۴	پیلوت در ساختمان	افزایش	کاهش
۵	مساحت دیوارهای خارجی	کاهش	کاهش
۶	سطح بازشوها	کاهش	کاهش
۷	جهت باز شوها	بدون تأثیر	کاهش
۸	جهت ساختمان	بدون تأثیر	کاهش

انرژی مصرفی یک سال ۱۶۴۱۶ کیلو وات ساعت است. پس از تبدیل واحد (هر وات ساعت ۳۶۰۰ ژول است) ۰/۵۶ مگاژول برای هر مترمربع در سال بدست آمده است. که با توجه به محاسبات انرژی نهفته ساختمان شاهد در شهر شیراز ۱/۸ مگاژول برای هر مترمربع بدست آمده است. همانطور که مشخص است انرژی نهفته زمان ساخت یک ساختمان با متراژ ۱۰۸۰ مترمربع برابر با مصرف سه سال برق مصرفی یک ساختمان می‌باشد. در این تحقیق با توجه به جدول (۷) با تغییر در متغیرهای که انرژی نهفته را تغییر می‌دهند ما می‌توانیم انرژی مصرفی را بین ۳ تا ۳۳ سال تغییر دهیم. در جدول (۸) مقایسه بین انرژی نهفته و انرژی عملیاتی (انرژی مصرفی) ساختمان از ادبیات تحقیق آورده شده است و با نتایج محقق مقایسه گردیده است.

۹- یافته های تحقیق

در این تحقیق برای اثبات فرضیه در ابتدا پس از بررسی ادبیات پژوهش متغیرهای طراحی موثر بر کاهش انرژی زمان بهره‌برداری در اقلیم گرم و خشک مشخص گردید. برای تأثیر متغیرها بر انرژی نهفته کل در ساختمان مورد بررسی، نیاز بود که انرژی نهفته کل ساختمان محاسبه گردد و سپس در جدول طراحی شده در اکسل بتوان هر بار متغیرهای تحقیق را تغییر داد و نتایج انرژی نهفته را استخراج کرد. این کار با بررسی ۸ متغیر انجام شد، که نتایج کلی در جدول (۹) آورده شده است. انرژی نهفته کل ساختمان مورد مطالعه محاسبه شده در شهر شیراز به متراژ ۱۰۸۰ مترمربع مقدار ۱۹۴۴ (گیگا ژول) و انرژی نهفته هر مترمربع ساختمان ۸/۱ گیگاژول بدست آمده است. سپس نتایج انرژی نهفته کل با مقادیر مبانی نظری مقایسه و تحلیل گردیده است. در بررسی متغیرهای انرژی مصرفی زمان بهره‌برداری و انرژی نهفته نتایج در جدول ۹ نشان داده شده است. عایق حرارتی، شیشه دوجداره، رواق و پیلوت باعث کاهش انرژی مصرفی می‌گردند، اما باعث افزایش انرژی نهفته در ساختمان می‌شود. کاهش سطح دیوارهای خارجی و کاهش سطح بازشوها و تراکم ساختمان باعث کاهش انرژی نهفته و کاهش انرژی مصرفی می‌گردند. متغیرهای جهت قرارگیری ساختمان و جهت بازشوها، باعث کاهش انرژی زمان بهره‌برداری می‌گردند، اما تأثیری بر انرژی نهفته ندارند.

۱۰- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این پژوهش با توجه به گردآوری داده‌های تحقیق و فرضیه، پرسش و اهداف تحقیق در ابتدا تأثیر ۸ متغیر بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که این متغیرها باعث تغییر انرژی نهفته بین ۰/۳ تا ۳/۷۵ مگاژول در هر مترمربع می‌گردند. بنابراین این فرضیه که راهبردهای کاهش انرژی زمان بهره‌برداری انرژی نهفته را افزایش می‌دهند مورد تأیید نمی‌باشد. می‌توانیم بگوییم که راهبردهای کاهش مصرف انرژی زمان بهره‌برداری بر انرژی نهفته موثر می‌باشند. و با توجه به راهبرد علت و معلولی تحقیق به این پرسش پاسخ داده شده است که راهبردهای کاربردی کاهش انرژی زمان بهره‌برداری چه تأثیری بر انرژی نهفته دارند؟

مراجع

- [1] A. M. Soe, "The Low Volatility Effect: A Comprehensive Look," SSRN Electronic Journal, 2012, doi: <https://doi.org/10.2139/ssrn.2128634>.
- [2] B. G. Amado, R. Arce, and A. Herraiz, "Psychological injury in victims of child sexual abuse: A meta-analytic review," *Psychosocial Intervention*, vol. 24, no. 1, pp. 49–62, Jan. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psi.2015.03.002>.
- [3] C. B. Aktas and M. M. Bilec, "Impact of lifetime on US residential building LCA results," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, no. 3, pp. 337–349, Mar. 2012, doi: <https://doi.org/10.1007/S11367-011-0363-X>.
- [4] C. Langston, F. K. W. Wong, E. C. M. Hui, and L.-Y. Shen, "Strategic assessment of building adaptive reuse opportunities in Hong Kong," *Building and Environment*, vol. 43, no. 10, pp. 1709–1718, Oct. 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.017>.
- [5] C. Thormark, "A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential," *Building and Environment*, vol. 37, no. 4, pp. 429–435, Apr. 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/s0360-1323\(01\)00033-6](https://doi.org/10.1016/s0360-1323(01)00033-6).
- [6] D. M. K. W. Dissanayake, C. Jayasinghe, and M. T. R. Jayasinghe, "A comparative embodied energy analysis of a house with recycled expanded polystyrene (EPS) based foam concrete wall panels," *Energy and Buildings*, vol. 135, pp. 85–94, Jan. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.044>.
- [7] E. Dascalaki, P. Argiropoulou, C. A. Balaras, K. Drousa, S. Kontoyiannidis, and D. Koubogiannis, "On the share of embodied energy in the lifetime energy use of typical Hellenic residential buildings," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 410, p. 012070, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012070>.
- [8] G. F. Menzies, "Historic Scotland Technical Paper 13: Embodied Energy Considerations for Historic Buildings," Sep. 2011.
- [9] G. Syngros, C. A. Balaras, and D. G. Koubogiannis, "Embodied CO₂ Emissions in Building Construction Materials of Hellenic Dwellings," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 38, pp. 500–508, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.113>.
- [10] J. Giesekam and F. Pomponi, "Briefing: Embodied carbon dioxide assessment in buildings: guidance and gaps," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, vol. 171, no. 7, pp. 334–341, Oct. 2018, doi: <https://doi.org/10.1680/jensu.17.00032>.
- [11] K. I. Praseeda, B. V. Venkatarama Reddy, and M. Mani, "Embodied and operational energy of urban residential buildings in India," *Energy and Buildings*, vol. 110, pp. 211–219, Jan. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.09.072>.
- [12] L. Aye, T. Ngo, R. H. Crawford, R. Gammampila, and P. Mendis, "Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules," *Energy and Buildings*, vol. 47, pp. 159–168, Apr. 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.049>.
- [13] M. G. de Almeida, R. L. Barbosa, and R. L. M. Castro Malheiro, "Effect of Embodied Energy on Cost-Effectiveness of a Prefabricated Modular Solution on Renovation Scenarios in Social Housing in Porto, Portugal," *Sustainability*, vol. 12, no. 4, p. 1631, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/SU12041631>.
- [14] M. Hu, "A Building Life-Cycle Embodied Performance Index—The Relationship between Embodied Energy, Embodied Carbon and Environmental Impact," *Energies*, vol. 13, no. 8, p. 1905, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/en13081905>.

همانطور که در جدول (۹) مشخص است چهار متغیر انرژی نهفته را افزایش می‌دهند دو متغیر انرژی نهفته را کاهش می‌دهند و دو متغیر تأثیری بر انرژی نهفته ندارند همچنین با توجه به سوال تحقیق نتایج نشان می‌دهد که مساحت دیوار خارجی بیشترین تأثیر را بر انرژی نهفته دارد محقق در ساختمان شاهد مصرف سالانه با توجه به قبوض برق را بدست آورده است. در بررسی انرژی مصرفی ساختمان شاهد با توجه به فیش‌های برق ماهانه ساختمان در یک مطالعه میدانی میزان انرژی مصرفی یک سال ۱۶۴۱۶ کیلو وات ساعت که پس از تبدیل واحد (هر وات ساعت ۳۶۰۰ ژول است) ۰/۵۶ مگاژول برای هر مترمربع در سال بدست آمده است. که با توجه به محاسبات انرژی نهفته ساختمان شاهد در شهر شیراز ۱/۸ مگاژول برای هر مترمربع بدست آمده است. همانطور که مشخص است انرژی نهفته زمان ساخت یک ساختمان با مترژ ۱۰۸۰ مترمربع برابر با مصرف سه سال برق مصرفی یک ساختمان می باشد. بنابراین با توجه به اهداف تحقیق راهکارهای زیر موثر می باشد.

۱. با توجه به نتایج تحقیق انرژی نهفته هر مترمربع ساختمان ۱.۸ مگاژول است پس معماران می توانند تأثیر افزایش فضا ها و مساحت ها را با توجه به جدول انرژی نهفته ساختمان محاسبه واز فضا ها و جزئیات اضافه در نقشه اجتناب کنند و راهکارهایی را در طراحی ارائه بدهند که باعث کاهش انرژی زمان بهره‌برداری و انرژی نهفته گردند.
۲. در طراحی معماری اقلیمی گرم و مرطوب شهر شیراز، استفاده از حیاط مرکزی و رواق در جبهه‌های ساختمان پیشنهاد می‌شود، اما با توجه به محاسبات انرژی نهفته هر مترمربع ساختمان با مصالح متداول دارای ۱/۸ مگاژول انرژی نهفته است. با توجه به تحلیل اقلیمی شهر شیراز رواق و حیاط مرکزی در این اقلیم هر چند انرژی زمان بهره‌برداری را کاهش می‌دهند، اما باعث افزایش قابل توجه انرژی نهفته ساختمان می‌گردند.
۳. در بررسی طراحی ساختمان در اقلیم گرم و خشک استفاده از پنجره‌ها با سطوح کمتر و دیوارهای خارجی با سطوح کمتر و پلان متراکم باعث کاهش انرژی زمان بهره‌برداری و کاهش انرژی نهفته ساختمان می‌گردند.
۴. استفاده از شیشه چندجداره و عایق حرارتی باعث کاهش انرژی زمان بهره‌برداری در اقلیم گرم و خشک شیراز می‌گردند، اما باعث افزایش انرژی نهفته ساختمان می‌گردند. این افزایش انرژی نهفته قابل توجه نیست.
۵. ارائه نقشه‌های فاز دوم معماری و انتخاب مصالح و انتخاب جزئیات با توجه به محاسبات انرژی نهفته ساختمان پس از راه‌حل‌های طراحی می‌تواند دستورالعمل مناسبی برای کاهش انرژی باشد. همچنین آگاه کردن دست‌اندرکاران ساخت وساز از جمله معماران در خصوص اهمیت انرژی نهفته در ساختمان و آگاهی ایشان در نحوه محاسبات و متغیرهای با اهمیت در انرژی نهفته کل ساختمان و ارائه راهکارهایی که سبب کاهش انرژی نهفته ساختمان و در نتیجه از تغییر اقلیم و حفظ جلوگیری محیط زیست گردد.



- [15] M. K. Dixit, "Embodied Energy Calculation: Method and Guidelines for a Building and its Constituent Materials," Oct. 2013.
- [16] M. K. Dixit, C. H. Culp, S. Lavy, and J. Fernandez-Solis, "Recurrent embodied energy and its relationship with service life and life cycle energy," *Facilities*, vol. 32, no. 3/4, pp. 160–181, Feb. 2014, doi: <https://doi.org/10.1108/f-06-2012-0041>
- [17] Pullen, S. (2007). A tool for depicting the embodied energy of the Adelaide urban environment (Doctoral dissertation, AIBS) <https://doi.org/10.2495/esus110351>.
- [18] R. Pacheco-Torres, S. Etxebarria-Berrizbeitia, and E. J. Gago, "Influence of urban density on energy retrofit of building stock: case study of Spain," *Architectural Engineering and Design Management*, pp. 1–24, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.1080/17452007.2024.2307992>.
- [19] S. Bardhan, "Embodied energy analysis of multi-storied residential buildings in urban India," *Energy and Sustainability III*, Apr. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113401>
- [20] S. O. Ajayi, L. O. Oyedele, and O. M. Ilori, "Changing Significance of Embodied Energy: A comparative study of material specifications and building energy sources," *Journal of building engineering*, vol. 23, pp. 324–333, Feb. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.02.008>.
- [21] S. Ramesh, "Appraisal of Vernacular Building Materials and Alternative Technologies for Roofing and Terracing Options of Embodied Energy in Buildings," *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 1843–1848, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1177>

Using convolutional neural networks to detect the tumor size and lymph node metastasis of colon cancer patients in MRI

Mohammadreza Hedyehzadeh^{*1,2}, Mahdi Yousefi^{3,4}

¹ Department of Biomedical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

² School of Medicine, Dezful University of Medical Sciences, Dezful, Iran,

Mrhedyehzadeh@iau.ir

³ Young Researchers and Elite Club, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

⁴ Department of Electrical Engineering, Najafabad branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

mahdiyousefi@sel.iaun.ac.ir

Abstract: Colon cancer is the third most common cancer from all cancers in 2020. In determining the appropriate treatment, the oncologist has to know the stage of the tumor, which is the most common method of the “Tumour, Node, Metastasis” staging system. Therefore, in this study, an attempt is made to estimate the size of the tumor and the extent of its spread to the lymph nodes with the help of magnetic resonance images. The data of this study was collected from the TCIA portal and in the first processing step, after improving the image quality, segmentation was done to separate the tumor region from the whole image. In this study, in order to extract and classify the features, the convolutional neural network VGG-16 was used and for the validation, the 10-fold method was applied. The results of this study indicate an accuracy of 94.2%, which is better than pathological and CT methods with accuracy of 91% and 77%. It should be noted that the effectiveness of the implemented algorithm in separating the 1st class was higher than the other class. Still, no significant difference was seen between the average values of the parameters in the three classes.

Keywords: Colon cancer, VGG-16, Magnetic resonance imaging, Tumor size, Lymph node metastasis

JCDSA, Vol. 2, No. 4, Winter 2025

Received: 2024-09-14

Online ISSN: 2981-1295

Accepted: 2024-12-30

Journal Homepage: <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa>

Published: 2025-03-20

CITATION

Hedyehzadeh, M., Yousefi, M., "Using convolutional neural networks to detect the tumor size and lymph node metastasis of colon cancer patients in MRI", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), JCDSA, Vol. 2, No. 4, pp. 80-89, 2025.
DOI: 00.00000/0000

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

1- Introduction

Colon cancer is the third most common cancer from all cancers in 2020. Stage and grade of the tumor are the important factors in the process of diagnosing and treating. Today, the most common method for determining the stage of a tumor is the "Tumour, Node, Metastasis" (TNM) staging system, in which M indicates the presence of metastasis (spread of the tumor to other tissues) in the body, N indicates the extent of spread to the lymph nodes, and T indicates the size of the tumor. Computed tomography (CT) and pathological imaging are two common methods which employed to determine T and N parameters. These imaging modalities have some disadvantages like, high absorbant dose of X-ray, need to invasive procedure and time consumption process. Therefore, it is very important to use an imaging modality which uses a safe procedure (without any dangerous ray), easy accessibility to determine the stage of colon cancer tumors. In this study, at the first the magnetic resonance images of the colon cancer patients will be collected, and after that, the preprocessing, image segmentation, feature extraction and classification using modern machine learning methods, would be other steps. Considering the above-mentioned issues, this study is innovative in several aspects, including the use of a safe imaging method without hazardous absorption dose to determine the tumor stage, the simultaneous determination of the two parameters T and N, and the improvement of the accuracy of the results compared to previous studies.

2- Methodology

Data collection is usually the first step in any research project, and in this study, 1312 MR images was collected from the TCIA portal. After that, in the preprocessing, converting the image formats from DICOM to JPG, histogram equalization to homogenize the gray level histogram and a manual segmentation to extract region of interest (tumor region) was done. Feature extraction and classification are the most important parts of our workflow. In previous studies, various methods have been used for feature extraction, and in most of these studies predefined (Hand Crafted) features such as shape-based features, histogram-based features, first-order, second-order and higher-order statistical features have been used. The most important disadvantage of using hand-crafted features is that because these features are predetermined, they are ambiguous in terms of optimal number and quality.

In other words, the user has doubts about determining the number of features that can lead to the best classification result, while another doubt in choosing each of the features is that what guarantee is there that this feature is good and why should not go for other features? By reviewing previous studies, it can be noted that among all deep neural networks, the VGG-16 has excellent capabilities in feature extraction and classification from images due to its structure and activation functions used in its different layers. Therefore we used a CNN (VGG-16) to extract a vast variety of features from each image and classification. Another important point in the discussion of network evaluation is to examine the validation of networks in the training and testing phases. To achieve this goal, the data must first be divided into three parts: training, test, and validation, and then the 10-fold cross validation method was be used.

3- Results and discussion

It should be noted that the data in the database, consists of three categories, so the output layer of the VGG-16 network in this research is designed to have three output classes (T0N0, T3N1 and T3N2). Another important point in the context of using machine learning methods is the use of validation methods. In this study, the 10-fold cross validation method was used. Therefore, the accuracy, specificity, and sensitivity of the model in the ten repetitions must be obtained and their average reported. The values of the accuracy, specificity, and sensitivity of the model are 94.2%, 95.8%, and 96.4%.

4- Conclusion

This study was conducted to determine tumor size and lymph node involvement of colon cancer using magnetic resonance imaging in 1312 patients. The results of this study (94.2%) indicate that it is possible to simultaneously assess the extent of colon tumor spread to lymph nodes and metastasis without the use of carcinogenic imaging modalities such as CT and other invasive modalities such as endoscopy or pathology. It should be noted that in this study, the data were categorized into three categories based on the two parameters T and N, which is very common in clinical work. Therefore, it can be claimed that the method used, unlike previous studies that focused only on a specific group of patients (for example, only T1b), is able to examine a more general population of patients. Another innovation used in the study is the use of safe images without the risk of radiation.





استفاده از شبکه های عصبی کانولوشن جهت تعیین اندازه تومور و متاستاز

غدد لنفاوی در تصاویر تشدید مغناطیسی بیماران سرطان کولون

محمدرضا هدیه زاده^{۱،۲}، مهدی یوسفی^{۳،۴}

۱- گروه مهندسی پزشکی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

۲- دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی دزفول، دزفول، ایران. (mrhedychzadeh@iau.ir)

۳- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۴- گروه مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. (mahdiyousefi@sel.iaun.ac.ir)

چکیده: سرطان روده بزرگ سومین سرطان رایج از کل سرطان ها در سال ۲۰۲۰ است. انکولوژیست در تعیین درمان مناسب ناگزیر از دانستن مرحله تومور بوده که متداول ترین روش سیستم مرحله بندی "تومور، گره، متاستاز" است. لذا در این مطالعه سعی بر آن است تا به کمک تصاویر رزونانس مغناطیسی، اندازه تومور و میزان گسترش به غدد لنفاوی تخمین زده شود. داده های این مطالعه از پرتال TCIA جمع آوری شده و در اولین گام پردازشی، پس از ارتقاء کیفیت تصویر، ناحیه بندی جهت جداسازی ناحیه تومور از کل تصویر انجام گرفت. در این مطالعه جهت استخراج ویژگی و طبقه بندی توأمان، از شبکه عصبی کانولوشن VGG-16 و برای اعتبار سنجی از روش اعتبار سنجی متقابل ده لایه استفاده شده است. نتایج این مطالعه حاکی از صحت ۹۴/۲٪ است که نسبت به روش های پاتولوژیک و توموگرافی کامپیوتری با صحت های ۹۱٪ و ۷۷٪، کارایی بهتری را نشان داده است. لازم به ذکر است که کارایی الگوریتم پیاده شده در تفکیک طبقه یک از سایر طبقات بیشتر بوده است اما اختلاف معناداری بین مقادیر میانگین پارامترها در سه طبقه دیده نشده است.

واژه های کلیدی: سرطان کولون، VGG-16، تصویربرداری تشدید مغناطیسی، اندازه تومور، متاستاز به غدد لنفاوی

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴

شکم، نارسایی اسید، خونریزی مقعدی، تکررادرار، بی اشتهایی، خستگی غیرمعمول و کاهش غیرارادی وزن هستند [5]. در پروسه تشخیص و درمان این عارضه دانستن مرحله^۲ و درجه^۳ تومور از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است [6]. امروزه متداول ترین روش جهت تعیین مرحله تومور سیستم مرحله بندی "تومور، گره، متاستاز"^۴ است که در این سیستم M نشان دهنده وجود متاستاز (گسترش تومور به بافت های دیگر) در بدن، N میزان سرایت به غدد لنفاوی و T اندازه تومور را نشان می دهد. مرحله بندی سرطان گامی است در جهت تعیین پیشرفت و نفوذ تومور در بافت درگیر که در حال حاضر تعیین مرحله سرطان کولون اغلب به کمک تصاویر مقطع نگاری کامپیوتری (CT)^۵ و یا تصاویر پاتولوژیک^۶ انجام می شود [7]. در بسیاری از گایدلاین های پزشکی از CT به عنوان متداول ترین روش جهت مرحله بندی اولیه تومور نام برده شده است. این روش به علت سهولت دسترسی، پرکاربردترین روش تشخیصی سرطان کولون است. مطالعات گذشته روی تومورهای کولون نشان داده اند که در مقایسه حساسیت تشخیصی روش های

۱- مقدمه

یکی از اجزای مهم دستگاه گوارش، روده بزرگ به طول حدودی ۱ الی ۱/۵ متر است که از شایع ترین بیماری های این اندام در افراد بالای ۵۰ سال، سرطان کولون است [1]. به رشد غیرقابل کنترل سلول های اپیتلیال در دیواره روده بزرگ سرطان روده بزرگ^۱ گفته که سومین سرطان رایج در بین انواع سرطان ها و علت ۹/۴٪ مرگ و میر ناشی از کل سرطان ها در سال ۲۰۲۰ است [2]. پیش بینی می شود در سال ۲۰۳۵، میزان ابتلا به این سرطان دو برابر شده و بیشترین افزایش متعلق به کشورهای در حال توسعه خواهد بود [3]. عوامل مؤثر بر این بیماری شامل رژیم غذایی، سابقه خانوادگی، سبک زندگی، اختلالات ژنتیکی، سن و نژاد است. به صورت کلی سرطان کولون دارای سه مرحله شروع، پیشرفت و متاستاز بوده که اغلب متاستاز کبد، ریه و استخوان شایع است [4]. علائم بالینی سرطان کولون و رکتوم شامل: درد در قسمت فوقانی یا تحتانی شکم، اسهال، شکم متورم، افزایش آروغ زدن، نفخ

⁴ Tumour, Node, Metastasis, TNM⁵ Computed Tomography, CT⁶ Haematoxylin & Eosin (H&E) staining images¹ Colorectal Cancer, CRC² Stage³ Grade

عمیق در استخراج ویژگی از تصاویر پزشکی است. با مقایسه مطالعات پیشین ذکر چند نکته حائز اهمیت است. اول آنکه این مطالعات با اهداف مختلفی همچون تعیین گردید [15] (جهت تخمین میزان بدخیمی تومور)، ناحیه بندی [17] (جهت استخراج ناحیه تومور از بقیه تصویر)، پیش بینی پاسخ به درمان [20]–[25]، [10] (تخمین مدت زمان زنده ماندن، عود کردن تومور، متاستاز به غدد لنفاوی و بافت های دیگر [26]، [27] ترتیب داده شده اند. دوم آن که در اکثر این مطالعات از تصاویر CT، آندوسکپی و یا پاتولوژیک جهت نیل به اهداف ذکر شده استفاده شده است؛ حال آنکه این تصاویر یا دارای دوز جذبی بالای بیمار بوده (تصاویر CT) و یا نیازمند جراحی جهت اخذ نمونه (تصاویر پاتولوژیک) و عملیاتی تهاجمی (تصاویر آندوسکپی) هستند [24]. بنابراین استفاده از یک پروتکل تصویربرداری ایمن مانند MRI پیشنهادی عالی خواهد بود.

ما در این مطالعه سعی داریم ابتدا تصاویر تشدید مغناطیسی ناحیه روده بزرگ بیماران مبتلا به سرطان را جمع آوری و پس از پیش پردازش، استخراج ناحیه تومور و استخراج ویژگی از ناحیه تومور با استفاده از روش های یادگیری ماشین نوین به طبقه بندی تصاویر جهت دستیابی به مرحله T و N تومور مبادرت نماییم. در واقع هدف از این پژوهش تخمین اندازه تومور و تعداد غدد لنفاوی درگیر توسط تومور کولون با استفاده از تصاویر تشدید مغناطیسی است. با توجه به موارد ذکر شده، مقاله حاضر از چندین جنبه دارای نوآوری بوده که از جمله آنها می توان به استفاده از یک روش تصویربرداری ایمن و بدون دوز جذبی خطرناک جهت تعیین مرحله تومور، تعیین همزمان دو پارامتر T و N و بالاتر بردن صحت نتایج نسبت به مطالعات قبلی اشاره کرد. در ادامه و در قسمت دوم مقاله (بخش مواد و روش ها) روش انجام مطالعه با جزئیات بیان خواهد شد. در بخش سوم نتایج گرفته شده از روش پیشنهادی بررسی شده و در بخش چهارم نتایج گرفته شده مورد واکاوی و با مطالعات قبلی مقایسه خواهند شد. پنجمین بخش جمع بندی مطالعه و ششمین و آخرین بخش منابع مورد استفاده در مطالعه خواهد بود.

۲- مواد و روش ها

در این مطالعه گذشته نگر، روشی نوین جهت تخمین اندازه تومور و تعداد غدد لنفاوی درگیر در بیماران دارای سرطان کولون با استفاده از تصاویر تشدید مغناطیسی پیشنهاد شده است. جمع آوری داده مطابق معمول، اولین مرحله هر پروژه تحقیقاتی بوده که در این مطالعه، داده ها از یک مجموعه با دسترسی آزاد گردآوری شده است. پس از آن پیش پردازش با هدف آماده سازی دادگان جهت پردازش اصلی (حذف نویز و...) استخراج ویژگی و طبقه بندی مراحل بعدی کار می باشد (شکل ۱).

۲-۱- پایگاه داده

داده های استفاده شده در این مطالعه از مجموعه TCGA-READ [28] در پرتال TCIA که شامل ۳۲۳۹ تصویر CT و MR و Pathology

تصویربرداری، CT کمترین مقدار (۶۲-۶۸٪)، PET/CT با مقدار متوسط ۷۲٪ در رتبه بعدی و روش تصویربرداری تشدید مغناطیسی MRI^۱ با دقت تشخیصی حدوداً ۸۵٪، بهترین مقدار را داراست. لازم به ذکر است که در تصویرگیری CT و یا PET/CT که هر دو در تشخیص و پیگیری درمان بیماران دارای سرطان کولون کاربرد بسیار دارند استفاده از منبع خارجی مولد اشعه ایکس و دوزگیری بیمار امری اجتنابناپذیر است [8].

از معضلات دیگر این روش ها علاوه بر دوز جذبی بالای اشعه ایکس، عدم دسترسی آسان بیمار به پروتکل تصویربرداری PET بدلیل گران بودن دستگاه تصویرگیری است. با توجه به مطالب گفته شده در قبل لزوم بهره گیری از یک روش تصویربرداری با کمترین دوز جذبی ممکن برای بیمار و دارای قابلیت دسترسی آسان جهت تعیین مرحله تومور سرطان کولون بسیار حائز اهمیت است. تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه تشخیص و پیش بینی تومورهای کولون توسط پژوهشگران انجام شده [14]–[9] که در ادامه به برخی از آنها اشاره خواهد شد. در [15]، با اعمال شبکه های عصبی کانولوشن^۲ به تصاویر پاتولوژیک نمونه های سرطان کولون، این داده ها را به سه دسته بافت سالم، بافت سرطانی با درجه کم (گرید ۱ و ۲) و بافت سرطانی با درجه بالا (گرید ۳ و ۴) تقسیم بندی کردند. نتایج حاکی از صحت ۹۱٪ در تمایز بیماران مذکور بود. در [16]، برای تشخیص تومور مرحله T1b از بافت سالم از ۱۹۰ تصویر آندوسکپی کولون (مربوط به ۴۱ بیمار) بهره گرفته و با استفاده از شبکه عصبی کانولوشن، به این نتیجه رسیدند که با استفاده از شبکه های کانولوشن می توان تمایز داده های مذکور را با دقتی نزدیک به ۸۱٪، بدون استفاده از کمک متخصصین آندوسکوپي و صرفاً با توجه به تصاویر خام آندوسکپی بدست آورد. با هدف ناحیه بندی تصاویر تشدید مغناطیسی، در [17] تومورهای سرطان کولورکتال از شبکه های تمام اتصال کانولوشن استفاده نمودند. نویسندگان این پژوهش به این نتیجه رسیدند که کارایی و صحت شبکه VGG-16 برای مشخص نمودن ناحیه تومور سرطان کولون بهتر از شبکه U-Net است. برای تفکیک تومورهای رکتوم مرحله ۲ از ۳ (بر اساس استاندارد AJCC) در تصاویر تشدید مغناطیسی ۲۹۰ بیمار از شبکه عصبی کانولوشن استفاده کردند که نتایج حاکی از صحت ۹۴٪ در افتراق این دو دسته تومور بود [18].

با هدف طبقه بندی خودکار متاستاز غدد لنفاوی سرطان روده بزرگ، در [19] نتایج حاصل از هشت روش کلاسیک یادگیری ماشین و دو روش یادگیری عمیق را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج مطالعه نشان داد که روش های یادگیری عمیق با صحت ۷۵٪ کارایی بهتری نسبت به روش های کلاسیک یادگیری ماشین شامل رگرسیون لجستیک (۶۸٪) و آدا بوست (٪) دارا هستند. در [19]، یک روش نوین جهت تشخیص پاسخ به درمان (میزان عود کردن تومور) با استفاده از ویژگی های استخراج شده از تصاویر CT و ویژگی های بالینی پیشنهاد کردند. یافته اصلی این مطالعه آشکار شدن قابلیت روش های یادگیری

² Convolutional Neural Network, CNN

¹ Magnetic resonance imaging

مرحله از کار پیش‌پردازش به جهت همسان نبودن اندازه تصاویر موجود در دیتابیس، ابعاد کلیه تصاویر به $224 \times 224 \times 3$ تغییر یافت.

۲-۳- استخراج ویژگی و طبقه‌بندی

استخراج ویژگی و طبقه‌بندی مهمترین قسمت کار پردازشی در این مطالعه هستند. در مطالعات پیشین روش‌های مختلفی جهت استخراج ویژگی به کار رفته‌است که در غالب این مطالعات (۱۱،۱۳،۲۴) از ویژگی‌های از پیش تعیین شده^۴ مانند ویژگی‌های مبتنی بر شکل، مبتنی بر هیستوگرام، ویژگی‌های آماری مرتبه اول، دوم و بالاتر استفاده شده است. مهمترین عیب استفاده از این ویژگی‌ها این است که چون این ویژگی‌ها از پیش تعیین شده هستند از لحاظ تعداد بهینه و کیفیت محل ابهام هستند. به عبارت دیگر کاربرد در تعیین تعداد ویژگی که می‌تواند منجر به بهترین نتیجه در طبقه‌بندی شود تردید داشته‌اند. آنکه تردید دیگر در انتخاب هر یک از ویژگی‌ها این است که چه تضمینی وجود دارد که این ویژگی خوب است و چرا نباید سراغ دیگر ویژگی‌ها رفت؟ به عبارت دیگر در روش انتخاب ویژگی‌های از پیش تعیین شده مشکل اصلی این است که برای کاربر هیچ تضمینی وجود ندارد که مجموعه ویژگی تعیین شده بهترین بوده و نمی‌توان مجموعه ویژگی بهتری تعیین نمود. لذا نیاز به یک روش جهت دستیابی به یک مجموعه ویژگی جامع احساس می‌شود. شبکه‌های عصبی کانولوشن پاسخ به این سوال هستند.

امروزه یکی از روش‌های متداول در پژوهش‌های پردازش تصویر جهت استخراج ویژگی و طبقه‌بندی استفاده از شبکه‌های عمیق کانولوشن است. ساختار این شبکه‌ها به گونه‌ای است که در لایه‌های با تعداد زیاد و در هر لایه عملگرهای کانولوشن بر روی تصاویر اعمال شده و خروجی هر لایه یک ویژگی از ویژگی‌های مهم مانند لبه‌های تصویر است. در این شبکه‌ها تصویر بعنوان ورودی وارد شده و در لایه‌های عمیق (تعداد لایه زیاد و تعداد نرون زیاد در هر لایه) طی تعداد بسیار زیادی از عملیات کانولوشن که روی تصویر انجام می‌گیرد، در هر لایه یک سری ماتریس ویژگی استخراج می‌شود. نکته مهم آنکه این ویژگی‌ها در لایه‌ها با عمق‌های مختلف استخراج شده که هر کدام حاوی اطلاعات مختص به خود و در عین حال متفاوت نسبت به دیگری هستند. لذا این شبکه‌ها راه حل مناسبی برای معضل ذکر شده در قبل هستند زیرا خروجی این شبکه در لایه‌های مختلف ویژگی‌های مختلف بوده و لذا تعداد بسیار زیاد و جامعی از ویژگی‌ها در دسترس است در مطالعات پیشین این امر نشان داده شده که شبکه‌های کانولوشن قادرند علاوه بر ویژگی‌های کلاسیک مانند همبستگی، انرژی، همسایگی ها و... ویژگی‌های دیگری از تصاویر استخراج کنند که بعضاً کارایی بیشتری در اهداف مورد نظر مانند طبقه‌بندی داده و تشخیص الگو دارند [26]. تعداد شبکه‌های کانولوشن توسعه یافته جهت ناحیه‌بندی، استخراج ویژگی و طبقه‌بندی زیاد بوده که از جمله آن‌ها می‌توان به

مربوط به بیماران دارای سرطان روده بزرگ می‌باشد جمع‌آوری شده است. از میان تمام تصاویر موجود در پایگاه داده، ۱۴۴۰ تصویر رزونانس مغناطیسی موجود بود که تعداد ۱۲۸ تصویر به دلیل عدم کارایی و یا کیفیت تصاویر از پژوهش خارج شده و مطالعه بر اساس ۱۳۱۲ تصویر انجام گرفت. همچنین در این مجموعه داده اطلاعات کلینیکی، ژنتیکی و آسیب‌شناسی پاتولوژیک هم موجود است. از نکات مهم دیگر استفاده از این داده این است که به علت دسترسی آزاد و همگانی داده‌های موجود در پرتال TCIA نیاز به اخذ مجوزهای کمیته اخلاق وجود نخواهد داشت. در شکل (۲) نمونه‌ای از تصاویر موجود در پایگاه داده را می‌توان مشاهده کرد.

۲-۲- پیش پردازش

پیش‌پردازش یکی از مراحل مهم در هر کار پردازش تصویر است که در آن با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده یک سری پردازش‌ها جهت یکپارچه سازی و حذف موارد نامطلوب روی کلیه داده‌ها انجام می‌گیرد. در پژوهش‌های پردازش تصویر و در غالب موارد، قدم اول ورود به کار پردازشی اصلی، تبدیل فرمت تصاویر است. علت این امر فرمت خاص تصاویر پزشکی است. تصاویر پزشکی بر عکس تصاویر موجود در سایر حوزه‌ها که غالباً از استاندارد جهانی JPG یا PNG استفاده می‌کنند دارای فرمت استاندارد خاص خود یعنی^۱ بوده که جهت اعمال به عنوان ورودی بسیاری از دستورات در زبان‌های برنامه‌نویسی مختلف مناسب نیست. لذا تبدیل فرمت جزء لاینفک و اجتناب‌ناپذیر این دست پردازش‌ها است. لذا در اولین مرحله با تبدیل فرمت داده‌ها از پسوند DICOM به JPG به این مهم خواهیم رسید. تصاویر تشدید مغناطیسی و بطور عام تصاویر پزشکی بدلیل ماهیت روش تصویربرداری، مشکلات موجود در فرآیند تصویرگیری و عدم همکاری کافی بیمار دارای کیفیت مناسب نبوده و اعمال روش‌های ارتقاء کیفیت تصویر در بالا بردن دقت نتایج حاصله از مراحل بعدی پردازش (ناحیه‌بندی، استخراج ویژگی و...) تاثیر بسزایی دارد. لذا در این مطالعه با همسان‌سازی هیستوگرام^۲ سعی بر آن است تا با یکنواخت کردن هیستوگرام شدت روشنایی تصویر، از همه شدت روشنایی‌ها بصورت یکنواخت در کل تصویر وجود داشته و به این شکل کیفیت تصویر را ارتقاء ببخشیم.

یکی از عملیات بسیار مهم در پژوهش‌های پردازش تصویر، ناحیه‌بندی تصویر^۳ و به عبارتی جدا کردن ناحیه تومور از بقیه تصویر است. در این مطالعه جهت ناحیه‌بندی و جدا کردن ناحیه مورد نظر (تومور) از بقیه تصویر از دو رادیولوژیست با تجربه کاری ۲۱ ساله در زمینه تشخیص سرطان کمک گرفته شد. با توجه به آناتومی روده بزرگ و قرارگیری این بافت در چندین مقطع عرضی از تصویر به پیشنهاد رادیولوژیست دو مقطع عرضی از روده بزرگ برای هر آزمایش در نظر گرفته شد و بنابراین تعداد تصاویر بکار رفته در پژوهش به ۲۳۶۸ افزایش یافت. و در آخرین

³ Segmentation

⁴ Hand Crafted Features

¹ Digital Imaging and Communications in Medicine, DICOM

² Histogram Equalization

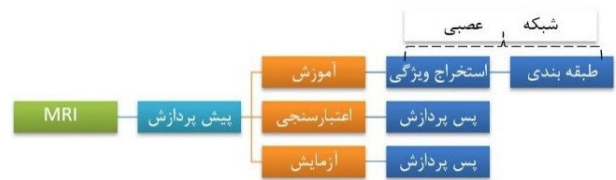


لایه اول کانولوشن شامل ۶۴ فیلتر با ابعاد ۳×۳، پدینگ و بایاس با مقدار ۱ به همراه تابع فعال ساز^۱ است. از پارامترهای قابل تنظیم دیگر این شبکه می توان به استفاده از الگوریتم گرادیان کاهشی تصادفی به منظور بروزرسانی وزن های شبکه، Batch Size برابر با ۳۰، نرخ یادگیری ۰/۰۰۱ و حداکثر تعداد تکرار^۲ ۲۰۰ اشاره کرد. منظور از قراردادن Batch size برابر ۳۰ این است که در هر بار آموزش شبکه کل داده ها بعنوان ورودی استفاده نشده و فقط تعداد ۳۰ تصویر از کل داده ها در آموزش دخیل هستند. از نکات مهم دیگر در بحث ارزیابی شبکه ها بررسی اعتبارسنجی شبکه ها در فرایند آموزش و آزمایش است. جهت نیل به این مقصود ابتدا باید دادگان به سه قسمت آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی تقسیم شده و سپس با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل ۱۰ لایه^۳ انجام گیرد. به عبارت دیگر هر بار بصورت تصادفی ۷۰٪ از دادگان (۱۶۵۴) به منظور آموزش مدل، ۲۰٪ (۴۷۴) تصویر (به عنوان آزمایش و ۱۰٪ از دادگان (۲۴۰) تصویر) به عنوان اعتبارسنجی نتایج حاصل از آموزش و آزمایش دادگان بر شبکه پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته و این کار ۱۰ مرتبه انجام می شود. برای ارزیابی مدل پیشنهادی از پارامترهای صحت، اختصاصیت و حساسیت شبکه استفاده شده است. کلیه مطالعات آماری انجام شده در این مقاله با استفاده از نرم افزار پایتون انجام شده است.

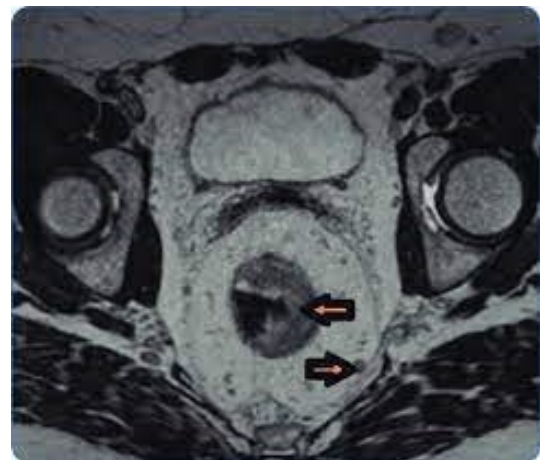
۳- یافته ها

همانگونه که در قسمت مواد و روش ها اشاره شد اولین قدم در کارهای پردازش تصویر، استاندارد سازی فرمت تصاویر است که در این مطالعه فرمت تصاویر از DICOM به JPG تبدیل شده و پس از آن نوبت به ارتقاء کیفیت تصویر می رسد. در این پژوهش جهت ارتقاء کیفیت تصاویر پس از بررسی هیستوگرام تصاویر و محرز شدن عدم همسانی هیستوگرام در اکثر تصاویر، از روش همسان سازی هیستوگرام جهت همسان نمودن نسبی طیف هیستوگرام استفاده شده است (شکل ۴ الف-ب). پس از ارتقاء کیفیت تصاویر نوبت به جداسازی ناحیه موردنظر (ناحیه تومور) از کل تصویر و یا عبارتی ناحیه بندی تصویر می رسد. جداسازی ناحیه تومور بصورت دستی توسط متخصص رادیولوژیست انجام شده که نتایج در شکل (۴-ج) مشخص است. آخرین مرحله در قسمت پیش پردازش یکسان سازی ابعاد کلیه تصاویر موجود در دیتابیس است. از جمله مشکلات تصاویر موجود در دیتابیس یکسان نبودن ابعاد آنها است زیرا در پردازش های بعدی نیاز است که کلیه تصاویر ورودی مدل دارای ابعاد یکسانی باشند. لذا ابعاد کلیه تصاویر موجود به ۲۲۴×۲۲۴×۳ تغییر یافت. نکته مهم در بحث استخراج ویژگی مشکلات مربوط به ویژگی های از پیش تعیین شده بود که مفصلاً در قسمت مواد و روش ها بدان اشاره شد و راه حل آن یعنی استفاده از شبکه های VGG16 جهت استخراج ویژگی ارائه گردید. در رابطه با بحث طبقه بندی نیز بواسطه قرار گرفتن لایه های تمام اتصال در انتهای شبکه ی VGG16 توانایی این شبکه در

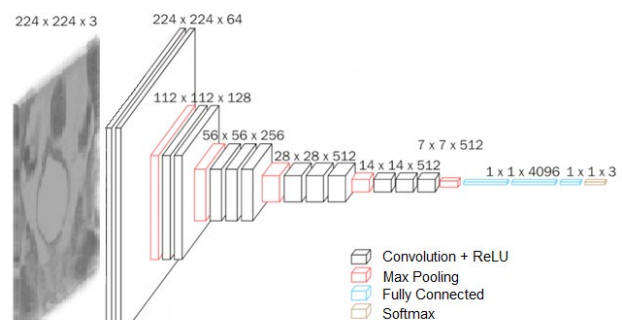
شبکه های GoogLeNet, AlexNet, ResNet, VGG اشاره کرد. با مروری بر مطالعات پیشین می توان به این امر اشاره کرد که از میان همه این شبکه ها، شبکه VGG-16 به دلیل ساختار و توابع فعال ساز بکار رفته در لایه های مختلف آن قابلیت بسیار خوبی در استخراج ویژگی و طبقه بندی از تصاویر را دارد (۱۷). لذا ما نیز در این مطالعه از شبکه عصبی کانولوشنی VGG-16 با لایه های مختلف است بهره برده ایم. مورد مهم در طراحی شبکه تعیین ساختار و تنظیم پارامترهای شبکه است که برای مورد اول از پیش فرض شبکه VGG کمک گرفته شده و برای تنظیم پارامترها با بکارگیری یک روش وقفی، پارامتر بهینه انتخاب شده است. در مجموع این شبکه دارای ۱۳ لایه کانولوشن، ۱۵ تابع تبدیل ReLU، ۵ لایه Maxpooling، ۳ لایه Fullyconnected، دولا لایه Dropout، یک لایه Softmax و یک لایه طبقه بندی در خروجی است (شکل ۳). ورودی مدل پیشنهادی تصاویر تشدید مغناطیسی با ابعاد ۲۲۴×۲۲۴×۳ می باشند.



شکل (۱): مراحل روش پیشنهادی



شکل (۲): تصویر MRI بیمار مبتلا به سرطان تهاجمی روده بزرگ



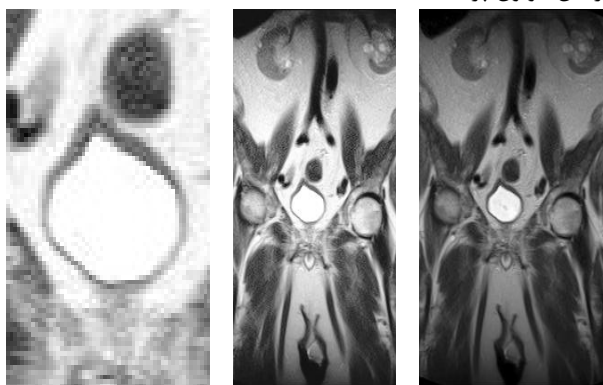
شکل (۳): ساختار شبکه کانولوشنی بکار رفته در مطالعه

³ 10-fold cross validation

¹ Relu

² Epoch

نشان‌دهنده مقادیر صحت، حساسیت و اختصاصیت در سه طبقه داده است می‌توان دریافت که مدل آموزش دیده شده در تمایز گروه دوم داده‌ها (طبقه ۱) از سایر طبقات بهتر عمل کرده که این امر ناشی از تعداد بیشتر داده‌ها در این طبقه است. پرواضح است که الگوریتم‌های یادگیری ماشین بدلیل ماهیت آموزش‌پذیر بودنشان، روی طبقه‌ای از داده‌ها که تعداد بیشتری داده وجود دارد بهتر آموزش دیده و لذا صحت بهتری در مرحله آزمایش خواهند داشت. جدول (۳) نتایج گرفته شده از این مطالعه را با پژوهش‌های پیشین مقایسه کرده که در ادامه به تفصیل نقاط ضعف و قوت هر مطالعه را بررسی خواهیم کرد. برای بررسی جامع مطالعات انجام شده در زمینه مرحله‌بندی سرطان کولون این مطالعات را به دو دسته تقسیم می‌کنیم. دسته اول مطالعاتی هستند که از تصاویر تشدید مغناطیسی جهت مرحله‌بندی استفاده نموده و دسته دوم مطالعاتی هستند که از تصاویری غیر از تصاویر تشدید مغناطیسی استفاده کرده‌اند. مطالعات دسته دوم طیف وسیعی از کل مطالعات انجام شده را در برمی‌گیرند که در غالب این مطالعات نویسندگان با استفاده از پروتکل‌های تصویرگیری مانند تصاویر پاتولوژیک و یا آندوسکوپیک صرفاً به پیش‌بینی اندازه تومور و یا فقط درگیری غدد لنفاوی بعنوان یک فاکتور پیش‌بینی‌گر میزان پیشرفت سرطان کولون پرداخته‌اند.



الف) تصویر اولیه (ب) همسان سازی (ج) ناحیه‌بندی شده

شکل (۴): مراحل آماده‌سازی دادگان.

جدول (۱): مشخصه‌های T و N داده‌های استفاده شده در مطالعه.

تعداد داده	T	N	Description	Output
۳۶۸ (۲۸٪)	0	0	نبود تومور، عدم درگیری غدد لنفاوی	0
۶۰۴ (۴۶٪)	3	1	وجود تومور، درگیری ۲ یا ۳ گره لنفاوی	1
۳۴۰ (۲۶٪)	3	2	وجود تومور، درگیری بیش از ۳ گره لنفاوی	2

جدول (۲): کارایی روش پیشنهادی در تمایز طبقات مختلف داده‌ها.

اختصاصیت	حساسیت	صحت	طبقه
۹۷/۵ (±۱/۱)	۹۵/۷ (±۰/۹)	۹۶/۳ (±۰/۷)	0
۹۸/۶ (±۰/۹)	۹۸/۵ (±۰/۴)	۹۸/۷ (±۰/۸)	1
۹۱/۳ (±۰/۵)	۹۵ (±۰/۸)	۸۷/۶ (±۰/۷)	2

طبقه‌بندی از موارد مهم کاربردی در بحث استفاده از آنها است. عبارت دیگر این شبکه‌ها قادرند علاوه بر استخراج انواع مختلفی از ویژگی‌ها به طبقه‌بندی داده‌ها با استفاده از ویژگی‌های استخراج شده بصورت توام نیز مبادرت ورزند. ساختار این شبکه در قسمت روش کار توضیح داده شده که در اینجا فقط به توضیح کارکرد کلی و نتایج حاصله اکتفا خواهیم کرد. شبکه پیشنهادی متشکل از چندین لایه کانولوشن جهت استخراج ویژگی است که در این مطالعه خروجی‌های لایه آخر کانولوشن که شامل ۵۱۲ ماتریس ویژگی ۷×۷ است بعنوان ویژگی‌های نهایی مورد استفاده قرار گرفته است. پس از این لایه نوبت به شبکه تمام اتصال می‌رسد که شامل ۴۰۹۶ نرون بوده که این نرون‌ها ویژگی‌های مذکور را بعنوان ورودی دریافت کرده و در آخرین لایه که شامل ۳ نرون با تابع فعالسازي Softmax است کار طبقه‌بندی داده‌ها به سه طبقه را انجام می‌دهند. لازم به ذکر است که داده‌های موجود در دیتابیس مطابق آنچه که در جدول (۱) آورده شده شامل سه دسته هستند لذا لایه خروجی شبکه در این پژوهش به شکلی طراحی شده که دارای سه طبقه خروجی باشد. نکته مهم دیگر در بحث استفاده از روش‌های یادگیری ماشین بکارگیری روش‌های اعتبارسنجی است. در این مطالعه از روش اعتبارسنجی متقابل ۱۰ لایه بهره گرفته شده است.

همانگونه که در قسمت مواد و روش‌ها توضیح داده شد در روش متقابل ۱۰ لایه داده‌ها به ده قسمت تقسیم شده و ده بار آموزش و تست شبکه روی داده‌ها انجام می‌شود. لذا باید صحت، اختصاصیت و حساسیت مدل در این ده بار تکرار را بدست آورده و متوسط آنها گزارش گردد. مقادیر صحت، اختصاصیت و حساسیت مدل عبارت است از ۹۴/۲، ۹۵/۸۰ و ۹۶/۴۰. همانگونه که اشاره شد در این مقاله داده‌ها در سه دسته طبقه‌بندی شده‌اند که جهت تعیین کارایی و دقت مدل ارائه شده، پارامترهای صحت، حساسیت و اختصاصیت مدل برای هر سه کلاس بطور جداگانه محاسبه گردید که در ادامه هر یک به تفصیل توضیح داده خواهد شد. نکته اینکه در مسائلی که تعداد کلاس‌ها بیش از دو مورد است، روش‌های تعیین حساسیت، صحت و اختصاصیت از روش One vs. all استفاده کرده و عبارت دیگر مثلاً صحت تعیین هر کلاس نسبت به بقیه کلاس‌ها جداگانه محاسبه و اعلام می‌گردد. جدول (۲)، صحت، حساسیت و اختصاصیت مد در تعیین کلاس‌های ۰، ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. نتایج موجود در این جدول نشان می‌دهد که بهترین کارایی در تمایز طبقات مختلف داده از هم مربوط به طبقه ۲ است که این امر می‌تواند به دلیل تعداد داده کمتر مربوط به این طبقه باشد. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که طبق آزمون ANNOVA اختلاف معناداری بین مقادیر میانگین پارامترها در سه طبقه وجود نداشت.

۴- بحث

هدف در این مطالعه بهره‌گیری از یک پروتکل تصویربرداری ایمن و در دسترس مانند رزونانس مغناطیسی جهت تعیین اندازه تومور و درگیری غدد لنفاوی سرطان کولون و مقایسه آن با روش‌های دیگر مانند پاتولوژی، CT، PET/CT و سونوگرافی است. از جدول (۲) که



روش پیشنهادی از محدودیت هایی نیز رنج می برد. از جمله این محدودیت ها تعداد داده کم بکار رفته جهت آموزش شبکه است. شبکه های عمیق جهت یادگیری مناسب نیازمند تعداد داده زیاد هستند و در صورت نبود تعداد داده کافی فرآیند آموزش شبکه به درستی انجام نشده و خروجی مطلوب حاصل نمی گردد. لذا استفاده از دیتابیس های جمع آوری شده بصورت آینده نگر پیشنهاد می گردد. از معضلات دیگر روش پیشنهادی عدم بکارگیری داده های کلینیکی بیماران مانند سن، جنسیت، اطلاعات ژنتیکی و وراثتی در تخمین پارامترهای هدف است. در روش پیشنهادی فقط از اطلاعات موجود در تصویر جهت تخمین مرحله تومور استفاده شده است در صورتی که در صورت استفاده از داده های کلینیکی مهم دیگری مانند گرید، سن، جنسیت و... در کنار ویژگی های تصویری احتمال دستیابی به نتیجه بهتر وجود داشت. محدودیت دیگر این مطالعه عدم استفاده از روش های کلاسیک طبقه بندی مانند درخت تصمیم، شبکه های عصبی معمولی، جنگل تصادفی و... است که می توان نتایج این روش ها را با روش شبکه عصبی عمیق استفاده شده مورد مقایسه قرار داد. در آخر ذکر این نکته خالی از لطف نیست و آن اینکه متاسفانه در دیتابیس استفاده شده فقط سه دسته ممکن (T_3N_0 , T_3N_1 و T_3N_2) از کل حالات مختلف استیج سرطان کولون وجود داشت که این امر لزوم بهره گیری از یک دیتابیس جامع تر را ضروری می سازد.

۵- نتیجه

این مطالعه با هدف تعیین اندازه تومور و میزان درگیری غدد لنفاوی سرطان کولون با استفاده از تصاویر تشدید مغناطیسی روی ۱۳۱۲ بیمار انجام شده است. نتایج حاصله از یافته های این مطالعه (۹۴/۲٪) حاکی از آن است که می توان بدون استفاده از مدالیته های تصویرگیری سرطانزا مانند CT و دیگر مدالیته های تهاجمی مانند آندوسکپی و یا پاتولوژی میزان سرایت تومورهای کولون به غدد لنفاوی و متاستاز را بصورت همزمان بررسی نمود. توجه شود که در این مطالعه داده ها بر اساس دو پارامتر T و N به سه طبقه دسته بندی شده که این طبقه بندی در کارهای کلینیکی بسیار متداول بوده لذا می توان ادعا نمود که روش بکاررفته بر عکس مطالعات پیشین که فقط روی یک دسته خاص از بیماران (مثلا فقط T1b) متمرکز است قادر است جامعه کلی تری از بیماران را مورد بررسی قرار دهد. از نوآوری های دیگر بکار رفته در مطالعه استفاده از تصاویر ایمن و بدون خطر پرتو گیری است.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از کلیه کسانی که در بررسی های اولیه، جمع آوری و آنالیز داده ها کمک گر بوده کمال تشکر را دارند. با توجه به اینکه داده های بکار رفته در این مطالعه از پایگاه داده با دسترسی همگانی و آزاد TCIA جمع آوری شده لذا ضرورت به اخذ کد اخلاق وجود ندارد. نویسندگان مقاله تعارض منافی برای انتشار این مقاله ندارند.

در این مطالعه فقط به مطالعاتی پرداخته شده که هدف آن ها پیش بینی اندازه تومور و میزان درگیری غدد لنفاوی با استفاده از تصاویر پزشکی بوده است و لذا از بررسی مطالعاتی که صرفا به بررسی آماری داده های پرونده بیماران اکتفا کرده [13] و بدنبال یافتن یک اختلاف معنادار بین بیماران دارای استیج های متفاوت از لحاظ پارامتر T و یا N بوده صرف نظر شده است. تعداد معدودی مقاله به تخمین مرحله سرطان کولون از روی تصاویر CT با استفاده از روش های یادگیری ماشین مبادرت ورزیده اند، که از این تعداد فقط یک مقاله به تخمین پارامترهای T و N پرداخته اند [14]. معضل بزرگ روش های تعیین مرحله سرطان با استفاده از تصاویری غیر از تصاویر تشدید مغناطیسی (دسته دوم مطالعات بررسی شده) به فرآیند تصویرگیری آنها برمی گردد. در تصاویر پاتولوژیک عموما نیاز به جراحی و برداشتن نمونه تومور وجود دارد و لذا در مواردی که امکان جراحی وجود نداشته و یا بیمار رغبتی به انجام آن ندارد امکان پذیر نیست. مشکل دیگر تصاویر پاتولوژیک لوکال بودن نمونه و اطلاعات اخذ شده از آن است. عبارت دیگر چون امکان نمونه گیری از کل نواحی تومور عملا وجود ندارد لذا نتایج گرفته شده قابل تعمیم به کل تومور نیستند. در مورد تصاویر آندوسکپیک نیز بدلیل تهاجمی بودن روش، عدم رغبت بیمار به انجام آن، عدم امکان انجام آندوسکپی در برخی بیماران و عدم امکان تعمیم نتایج به کل تومور استفاده از این روش متداول نیست. در مورد تصاویر CT مشکلات ذکر شده وجود نداشته و فقط بحث دوز جذبی بیمار مطرح است. در بررسی مطالعاتی که از تصاویر MR استفاده کرده اند ذکر یک نکته حائز اهمیت است و آن اینکه بسیاری از این مطالعات صرفا به بررسی یکی از پارامترهای مرحله بندی (T_1 , T_2 , N) پرداخته اند. در سایر کارها صرفا تمایز میان استیج های T3 از T4 مطرح بوده و یا بر پایه تشخیص درگیری غدد لنفاوی به تنهایی بنا نهاده شده است. حال آنکه پزشک انکولوژیست جهت تعیین درمان مناسب نیازمند دانستن همه پارامترهاست. لذا در این مطالعه سعی شده است تا حد ممکن به این سمت حرکت کرده و در تخمین پارامترهای بیشتری نسبت به سایر مطالعات پیشین گام برداشته شود. از مزایای این مطالعه و روش پیشنهادی آن در مقایسه با مطالعات قبلی میتوان به مواردی که در ادامه می آید اشاره کرد. در بسیاری از مطالعات قبلی صرفا به تخمین اندازه تومور بعنوان یک فاکتور پیش بینی گر پیشرفت تومور پرداخته شده حال آنکه در این مطالعه علاوه بر تخمین اندازه تومور وضعیت گسترش به غدد لنفاوی هم تخمین زده شده است. نکته دیگر آنکه تخمین میزان گسترش غدد لنفاوی انجام شده در این مطالعه صرفا با استفاده از تصویر تومور و بدون نیاز به سایر اقدامات پاتولوژیک و یا تصویرگیری اضافه از خود غدد لنفاوی انجام شده که این امر برتری کار حاضر نسبت به مطالعات پیشین را نشان می دهد. در مورد روش کار نیز ذکر این نکته حائز اهمیت است که در روش بکاررفته از هیچ گونه ویژگی از پیش تعیین شده استفاده نشده و ویژگی های عمیق مستخرج از شبکه کانولوشن نماینده ای جامع و تمام عیار از تمامی ویژگی های مورد نیاز جهت طبقه بندی داده ها هستند.

جدول (۳): مقایسه نتایج مطالعه حاضر با مطالعات پیشین.

مطالعه-سال انتشار	تصاویر	روش کار	هدف	صحت
[15] آوان و همکاران-۲۰۱۷	پاتولوژیک	CNN	تعیین گرید تومورهای کولون	۹۱٪
[29] ایترو و همکاران-۲۰۱۸	آندوسکوپیک	CNN	تفکیک استیج‌های T1a و T1b	۸۱٪
[17] جیان و همکاران-۲۰۱۸	MRI	CNN	ناحیه‌بندی تصاویر MRI	عملکرد بهتر VGG نسبت به سایر شبکه‌های کانولوشن
[18] کیم و همکاران-۲۰۱۹	MRI	CNN	تفکیک استیج‌های T3 و T4	۹۴٪
[19] لی و همکاران-۲۰۲۱	MRI	CNN و کلاسیک	تعیین درگیری غدد لنفاوی	عملکرد بهتر روش‌های یادگیری عمیق
[14] بولیول و همکاران-۲۰۲۳	CT	کلاسیک	تعیین اندازه تومور و درگیری غدد لنفاوی	۷۷٪
مطالعه حاضر	MRI	CNN	تعیین اندازه تومور و درگیری غدد لنفاوی	۹۴/۳٪

مراجع

- global dietary data,” BMC Cancer, vol. 23, no. 1, p. 144, 2023. <https://doi.org/10.1186/s12885-023-10587-x>
- [13] C. B. Finn et al., “Development of a Machine Learning Model to Identify Colorectal Cancer Stage in Medicare Claims,” JCO Clin. Cancer Informatics, vol. 7, p. e2300003, 2023. <https://doi.org/10.1200/CCI.23.00003>
- [14] H. M. Bülbül, G. Burakgazi, and U. Kesimal, “Preoperative assessment of grade, T stage, and lymph node involvement: machine learning-based CT texture analysis in colon cancer,” Jpn. J. Radiol., pp. 1–8, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11604-023-01502-2>
- [15] R. Awan et al., “Glandular morphometrics for objective grading of colorectal adenocarcinoma histology images,” Sci. Rep., vol. 7, no. 1, p. 16852, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16516-w>
- [16] N. Ito, H. Kawahira, H. Nakashima, M. Uesato, H. Miyauchi, and H. Matsubara, “Endoscopic diagnostic support system for cT1b colorectal cancer using deep learning,” Oncology, vol. 96, no. 1, pp. 44–50, 2018. <https://doi.org/10.1159/000491636>
- [17] J. Jian et al., “Fully convolutional networks (FCNs)-based segmentation method for colorectal tumors on T2-weighted magnetic resonance images,” Australas. Phys. Eng. Sci. Med., vol. 41, pp. 393–401, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13246-018-0636-9>
- [18] J. Kim et al., “Rectal cancer: Toward fully automatic discrimination of T2 and T3 rectal cancers using deep convolutional neural network,” Int. J. Imaging Syst. Technol., vol. 29, no. 3, pp. 247–259, 2019. <https://doi.org/10.1002/ima.22311>
- [19] J. Li, P. Wang, Y. Zhou, H. Liang, and K. Luan, “Different machine learning and deep learning methods for the classification of colorectal cancer lymph node metastasis images,” Front. Bioeng. Biotechnol., vol. 8, p. 620257, 2021. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.620257>
- [20] M. Yousefi and M. Hedyehzadeh, “Recurrence Detection of Non-small cell Lung Cancer (NSCLC) Tumors Using Imaging and Clinical Features,” J. Heal. Biomed. Informatics, vol. 9, no. 1, pp. 40–49, 2022.
- [21] M. Hedyehzadeh, K. Maghooli, M. MomenGharibvand, and S. Pistorius, “A Comparison of the Efficiency of Using a Deep CNN Approach with Other Common Regression Methods for the Prediction of EGFR Expression in Glioblastoma Patients,” J. Digit. Imaging, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10278-019-00290-4>.
- [22] M. Hedyehzadeh, K. Maghooli, and M. MomenGharibvand, “Glioma grade detection using grasshopper optimization algorithm-optimized machine
- [1] V. Mahadevan, “Anatomy of the caecum, appendix and colon,” Surg., vol. 38, no. 1, pp. 1–6, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mpsur.2019.10.017>
- [2] P. Boyle and J. S. Langman, “ABC of colorectal cancer: Epidemiology,” BMJ Br. Med. J., vol. 321, no. 7264, p. 805, 2000. <https://doi.org/10.1136/sbmj.0012452>
- [3] M. Araghi et al., “Global trends in colorectal cancer mortality: projections to the year 2035,” Int. J. cancer, vol. 144, no. 12, pp. 2992–3000, 2019. <https://doi.org/10.1002/ijc.32055>
- [4] M. S. Hossain et al., “Colorectal cancer: a review of carcinogenesis, global epidemiology, current challenges, risk factors, preventive and treatment strategies,” Cancers (Basel), vol. 14, no. 7, p. 1732, 2022. <https://doi.org/10.3390/cancers14071732>
- [5] Y. Xi and P. Xu, “Global colorectal cancer burden in 2020 and projections to 2040,” Transl. Oncol., vol. 14, no. 10, p. 101174, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tranon.2021.101174>
- [6] M. L. H. Ong and J. B. Schofield, “Assessment of lymph node involvement in colorectal cancer,” World J. Gastrointest. Surg., vol. 8, no. 3, p. 179, 2016. <https://doi.org/10.4240/wjgs.v8.i3.179>
- [7] D. Tamandl, T. Mang, and A. Ba-Ssalamah, “Imaging of colorectal cancer—the clue to individualized treatment,” Innov. Surg. Sci., vol. 3, no. 1, pp. 3–15, 2018. <https://doi.org/10.1515/iss-2017-0049>
- [8] R. Vikram and R. B. Iyer, “PET/CT imaging in the diagnosis, staging, and follow-up of colorectal cancer,” Cancer Imaging, vol. 8, no. Spec Iss A, p. S46, 2008. <https://doi.org/10.1102/1470-7330.2008.9009>
- [9] M. Tharwat, N. A. Sakr, S. El-Sappagh, H. Soliman, K.-S. Kwak, and M. Elmogy, “Colon cancer diagnosis based on machine learning and deep learning: Modalities and analysis techniques,” Sensors, vol. 22, no. 23, p. 9250, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22239250>
- [10] L. Buk Cardoso et al., “Machine learning for predicting survival of colorectal cancer patients,” Sci. Rep., vol. 13, no. 1, p. 8874, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35649-9>
- [11] B. Burnett et al., “Machine Learning in Colorectal Cancer Risk Prediction from Routinely Collected Data: A Review,” Diagnostics, vol. 13, no. 2, p. 301, 2023. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13020301>
- [12] H. Abdul Rahman, M. A. Ottom, and I. D. Dinov, “Machine learning-based colorectal cancer prediction using



- learning methods: The Cancer Imaging Archive study,” Int. J. Imaging Syst. Technol., vol. 31, no. 3, pp. 1670–1677, 2021. <https://doi.org/10.1002/ima.22536>
- [23] M. Hedyehzadeh, S. Y. D. Nezhad, and N. Safdarian, “EVALUATION OF CONVENTIONAL MACHINE LEARNING METHODS FOR BRAIN TUMOUR TYPE CLASSIFICATION,” COMPTES RENDUS L Acad. Bulg. DES Sci., vol. 73, no. 6, pp. 856–865, 2020. <https://doi.org/10.7546/CRABS.2020.06.14>
- [24] M. Hedyehzadeh, J. Pu, S. Leilizadeh, S. Gezer, C. Dresser, and C. A. Beeche, “A Comparison of Deep and Conventional Regression Methods for MRI-Based Estimation of Survival Time in GBM Patients,” Available SSRN 4001112. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4001112>
- [25] A. Achak and M. Hedyehzadeh, “Determining the Differentiation of Benign and Malignant NME Lesions in Contrast-Enhanced Spectral Mammography Images Based on Convolutional Neural Networks,” J. Med. Biol. Eng., vol. 43, no. 5, pp. 585–595, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40846-02300814-y>
- [26] M. Hedyehzadeh and M. Yousefi, “Application of Machine Learning Methods to Predict the Survival Rate of Glioblastoma Patients Using MR Images,” J. Heal. Biomed. Informatics, vol. 11, no. 1, pp. 1–13, 2024. <https://doi.org/10.34172/jhbmi.2024.09>
- [27] A. Achak and M. Hedyehzadeh, “Assessing the Efficiency of Deep Learning Methods in Estimating the Malignancy of Bi-Rads 4 Breast Lesions Using Contrast-enhanced Spectral Mammography Images,” Qom Univ. Med. Sci. J., vol. 17, no. 1, p. 0, 2023. <https://doi.org/10.32598/qums.17.2756.1>
- [28] K. Clark et al., “The Cancer Imaging Archive (TCIA): maintaining and operating a public information repository,” J. Digit. Imaging, vol. 26, pp. 1045–1057, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10278-013-9622-7>
- [29] M. Ito and F. Ino, “An Automated Method for Generating Training Sets for Deep Learning based Image Registration,” in BIOIMAGING, 2018, pp. 140–147. <https://doi.org/10.5220/0006634501400147>



Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA)

Volume 2, Issue 4, Winter 2025

Papers List

<u>Number</u>	<u>Paper title/Authors</u>	<u>Page</u>
1	Introducing a new CMOS-MTJ architecture for fast and highly low power 4:2 approximate compressors: insights into their applications in image processing Farahnaz Zakerian	1
2	Resistance Load production for Testing Systems Emergency Diesel Generators Seyed Hamed Hosseini nejad, Mozhd Heydarianasl	14
3	A survey on intrinsic motivation models in machine learning Saeed Jamali, Saeed Setayeshi, Mohsen Jahanshahi, Sajjad Taghvaei	24
4	Fuzzy decision-making system for prioritizing processes to determine optimal strategies Hossein Akbari, Mehdi Bagherizadeh	54
5	The effect of climatic design of the building on the reduction of Embodied energy and comparison with the consumed electricity (A case-study of Shiraz city) Azar Zinali-kharagy, Maryam Haghpanah	70
6	Using convolutional neural networks to detect the tumor size and lymph node metastasis of colon cancer patients in MRI Mohammadreza Hedyehzadeh, Mahdi Yousefi	80



Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA) Editorial Board

Director-in-Charge	Hamed Agahi	Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran
Editor-in-Chief	Taher Niknam	Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran
Internal Manager	Zahra Maghsoudzadeh	Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran

Editorial Board

Professor	Taher Niknam	Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran
Professor	Rahim Ghayour	Shiraz University, Shiraz, Iran
Professor	Habibollah Abiri	Shiraz University, Shiraz, Iran
Professor	Hamid Khaloozadeh	K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran
Professor	Asghar Keshtkar	Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
Professor	Mohammad Bagher Menhaj	Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
Professor	Mohammad Naser Moghadasi	Islamic Azad University, S&R Branch, Tehran, Iran
Professor	Hasan Tavakoli	Baqiyatollah University of Medical Sciences, Tehran, Iran
Professor	Seyedebrahim Afjeii	Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
Associate Professor	Hamed Agahi	Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran
Associate Professor	Ahmad Fakharian	Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin, Iran
Associate Professor	Amir-Masud Eftekhari-Moghadam	Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin, Iran
Associate Professor	Majid Ebnali	Shahrekord University
Associate Professor	Mohammad Sadegh Javadi Estahbanati	Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran



Islamic Azad University , Shiraz Branch
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis



نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها

Journal of Circuits, Data & Systems Analysis

