



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

### هیات تحریریه

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

### هیات 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 پنجم - بهار ۱۴۰۳

فهرست مقالات

ردیف	عنوان مقاله / نویسندگان	صفحه
۱	مدل سازی دینامیکی تولید برق پاک مبتنی بر روش شبیه سازی گذرا و روش شناسی سطح پاسخ عباس مطلبی، سید احمد شایان نیا <sup>*</sup> ، مهدی امیر میاندرق، ابراهیم نیک نقش	۱
۲	طراحی شبکه عصبی کانولوشن با وزن های موثر با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای طبقه بندی تصاویر مجتبی سجادی، محمد باقر توکلی <sup>*</sup> ، فرید ستوده، امیر حسین سالمی	۱۶
۳	به دام انداختن ذرات پلی استایرن با استفاده از انبرک پلاسمونیک ابراهیم فولادی، مجتبی صادقی <sup>*</sup> ، زهرا عادل پور، فرهاد بهادری جهرمی	۲۶
۴	رویکردهای همسایگی جدید در الگوریتم ممتیک برای یافتن نوع مشتری حامد شرافت مولا، هادی یعقوبیان <sup>*</sup> ، راضیه ملک حسینی، کرم الله باقری فرد	۳۴
۵	برداشت انرژی از ماهیچه دیافراگم با استفاده از خاصیت پیزوالکتریکی سپهر خلف زاده، فرشاد پسران <sup>*</sup> ، نبی اله شیری	۴۵
۶	طراحی و تست آنتن دو بانده 4G/5G برای باندهای فرکانسی ۲/۶ GHz و ۳/۵ GHz امیر رضاقلی <sup>*</sup> ، حسین زرگر، ایران سرافراز	۵۲



Islamic Azad University , Shiraz Branch

نشریه تحلیل مدارها، داده‌ها و سامانه‌ها  
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis

sanad.iau.ir/journal/jcdsa



# Dynamic modeling of clean electricity generation based on transient simulation method and response surface methodology

Abbas Motallebi<sup>1</sup>, seyed Ahmad Shayanniya<sup>2\*</sup>, Mehdi Amirmiandargh<sup>3</sup>, Ebrahim Niknaghsh<sup>4</sup>

<sup>1</sup> PhD student, Faculty of Industrial Management, Firozko Branch, Islamic Azad University, Firozko, Iran  
[motallebi4saipa@gmail.com](mailto:motallebi4saipa@gmail.com)

<sup>2</sup> Assistant Professor, Faculty of Industrial Management, Firozko Branch, Islamic Azad University, Firozko, Iran  
[sheibat@yahoo.com](mailto:sheibat@yahoo.com)

<sup>3</sup> Assistant Professor, Faculty of Mathematics, Firozko Branch, Islamic Azad University, Firozko, Iran  
[miandargh@iaufb.ac.ir](mailto:miandargh@iaufb.ac.ir)

<sup>4</sup> Assistant Professor, Faculty of Industrial Management, Firozko Branch, Islamic Azad University, Firozko, Iran  
[niknaghsh@yahoo.com](mailto:niknaghsh@yahoo.com)

**Abstract:** This article examines the simulation, optimization and dynamic modeling of a multi-source energy production system. This system includes solar panels and CCHP devices as the main energy production equipment and the target functions also include: total electricity consumption, total gas consumption, CCHP fuel consumption as well as return on investment, as the economic and energy response of the system. Further analysis of the dynamic results of the system includes: temperature changes, efficiency and average daily electricity produced by solar panels, average daily absorbed energy in solar collectors, hourly changes in electricity demand, electricity produced by solar panels and electricity produced by CCHP, the hourly changes in electricity demand, the total electricity produced and the hourly changes in gas consumption demand of the system and the complex will be investigated throughout the year. The results show that the utility distribution in the optimization section is 0.735. This number shows that the system is in a suitable and ideal state and the return on investment can be justified with 1.64 years. Also, even though the amount of solar radiation is higher in the hot months of the year, but due to the increase in the temperature of the solar cell, the efficiency of the solar panel decreases. These systems are also able to use solar energy to provide part of the heating needs of the complex's hot water system. The design and use of the combined optimal system of CCHP and solar panels allow the complex to fully and sustainably supply its electricity needs provide and even sell the excess amount of electricity to the public power grid and use it as a source of additional income.

**Keywords:** Simulation, dynamic modeling, response surface, transient simulation.

JCDSA, Vol. 2, No. 5, Spring 2024  
Received: 2024-02-26

Online ISSN: 2981-1295  
Accepted: 2024-06-09

Journal Homepage: <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa>  
Published: 2024-06-16

## CITATION

Motallebi, A., et. al., " *Dynamic modeling of clean electricity generation based on transient simulation method and response surface methodology*", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 2, No. 5, pp. 1-15, 2024.

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

Photovoltaic solar cells (PV) have emerged as the primary technology for producing green electricity. This innovation uses direct sunlight to generate electricity and its installation flexibility has led to significant investment in PV panels. Despite the many advantages, these cells are hampered by the decrease in efficiency caused by the increase in cell temperature. In this way, researchers have conducted extensive research on possible solutions with the aim of increasing the performance of photovoltaic cells using different techniques. This review provides a thorough analysis of cooling techniques for photovoltaic panels. It includes both passive and active cooling methods, including air cooling, phase change materials, and various approaches. Within each category, detailed subcategories such as evaporative cooling, water immersion, floating systems, water pipes, cooling channels, water sprinklers, jet impingement, geothermal cooling, and natural convection transfer are explored with PV designs. Also, forced displacement using cooling ducts, heat sinks and air collectors, along with the integration of phase change materials (PCM), nanofluids, radiant cooling, thermoelectric methods, heat pipes, heat pumps and other techniques. covers innovative Each of these approaches is shown with specific schematics and has been fully discussed and compared, the results show that with the decrease in the temperature of the solar panels, we see an increase in efficiency.

### Methodology

This paper examines the simulation, optimization and dynamic modeling of a multi-source energy production system. At first, the model is implemented using TRANSIS software; In the following, using Design Expert software, the optimal model is executed again in TRANSIS software and its dynamic results are analyzed. This system includes solar panels and CCHP device as the main energy production equipment. The objective functions include total electricity consumption, total gas consumption, CCHP fuel consumption as well as return on investment as the economic and energy response of the system. In the continuation of the analysis of the dynamic results of the system including: changes in temperature, efficiency and average daily electricity production of solar panels, average daily absorbed energy in solar collectors, average daily changes in electricity production, exhaust heat and fuel consumption in CCHP, hourly changes in electricity demand, Electricity produced by solar panels and electricity produced by CCHP, hourly changes in electricity demand, total electricity produced, and hourly changes in system and complex gas consumption demand will be investigated throughout the year.

In order to obtain the best state of energy, environmental and economic efficiency of the reviewed model, the response surface test design method is used. Also, the impact of changes in the effective factors of the combined

system was studied on the target and the specified energy, environmental and economic responses. Factors are independent variables for making accurate decisions in the discussion of the design of the combined system under investigation. On the other hand, the responses show the energy, environmental and economic performance indicators of the combined system under the influence of the factors selected for optimization. A response surface is a statistical method used to optimize a specific response, where the response is influenced by multiple factors.

The aim of this study is to optimize the combined system by considering energy, environmental and economic aspects, that is, more than one answer should be optimized. For this purpose, a method called utility function is used. In this method, each response is converted into a specific utility function. The studied utility function changes between zero and one values; That is, for the worst case, the numerical value of the utility function is zero. While the utility function is equal to a state indicator with ideal conditions.

### Results and discussion

To calculate the best combination of selected variables, the method of experiment design and response level optimization was used. Table (5) shows the values predicted by the response level for the variables in such a way as to achieve the optimal system. Also, the values of each goal for optimal conditions are specified in Table (6). The combined utility of 0.724 was obtained for the optimal solution, which is close to the ideal of  $CD=1$ . Figure (2), which shows the contours, shows the effects of changing the solar panel area factors and the CCHP power on the energy-economic responses. This contour plot is a flat curve that shows how these changes affect energy-economic responses based on different values of solar panel area and CCHP power. In other words, this graph shows that at each point of the graph, the energy-economic response value obtained for that point is The results of the simulation using the response surface methodology showed that the area of the photovoltaic panels in the optimal state is equal to 11770 square meters and the optimal CCHP power is equal to 1986 kW. Also, in optimal conditions, the system performs best; The combined utility, which is equal to 0.724, indicates that the performance of the optimal system is close to the ideal state.

### Conclusion

In the results, it was observed that the simultaneous production system using photovoltaic panels and CCHP can be a suitable solution for the production of electrical and thermal energy, taking into account the needs of production and office halls. This system provides the ability to adjust and optimize fuel consumption and reduce energy costs. The simulation results show that the studied hybrid system is capable of producing electrical and thermal energy throughout the year, according to the weather conditions of the study area.





# مدل سازی دینامیکی تولید برق پاک مبتنی بر روش شبیه سازی گذرا و روش شناسی سطح پاسخ

عباس مطلبی<sup>۱</sup>، سید احمد شایان نیا<sup>۲\*</sup>، مهدی امیر میاندرق<sup>۳</sup>، ابراهیم نیک نقش<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مدیریت صنعتی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزکوه، ایران (motallebi4saipa@gmail.com)

۲- استادیار، دانشکده مدیریت صنعتی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزکوه، ایران (sheibat@yahoo.com)

۳- استادیار، دانشکده ریاضی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزکوه، ایران (miandargh@iaufb.ac.ir)

۴- استادیار، دانشکده مدیریت صنعتی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزکوه، ایران (niknaghsh@yahoo.com)

**چکیده:** این مقاله شبیه سازی، بهینه سازی و مدل سازی دینامیکی یک سیستم چندمنبعی تولید انرژی را مورد بررسی قرار می دهد. این سیستم شامل پنل های خورشیدی و دستگاه تولید همزمان برق، گرما و سرما (CCHP) به عنوان تجهیزات اصلی تولید انرژی و توابع هدف نیز شامل: کل مصرف برق، مصرف کل گاز، مصرف سوخت CCHP و همچنین بازگشت سرمایه به عنوان پاسخ اقتصادی و انرژی سیستم می باشد. در ادامه تحلیل نتایج دینامیکی سیستم شامل: تغییرات دما، بازدهی و متوسط روزانه برق تولیدی پنل های خورشیدی، انرژی جذب شده متوسط روزانه در کلکتورهای خورشیدی، تغییرات ساعتی تقاضای برق، برق تولید شده توسط پنل های خورشیدی و برق تولید شده توسط CCHP، تغییرات ساعتی تقاضای برق، کل برق تولید شده و تغییرات ساعتی تقاضای مصرف گاز سیستم و مجموعه در طول سال بررسی خواهد شد، نتایج نشان می دهد که تابع مطلوبیت در بخش بهینه سازی ۰.۷۳۵ می باشد که این عدد نشان می دهد سیستم در حالت مناسب و ایدآل بوده و بازگشت سرمایه نیز با ۱.۶۴ سال قابل توجیه می باشد. همچنین با وجود اینکه در ماه های گرم سال میزان تشعشع خورشید بیشتر است، اما به دلیل افزایش دمای سلول خورشیدی، بازدهی پنل خورشیدی کاهش می یابد. همچنین این سیستم ها قادر به استفاده از انرژی خورشید برای تأمین بخشی از نیازهای گرمایشی سیستم آب گرم مجموعه نیز هستند. طراحی و استفاده از سیستم بهینه ترکیبی CCHP و پنل های خورشیدی به مجموعه امکان می دهد تا به طور کامل و پایدار برق مورد نیاز خود را تأمین کند و حتی میزان اضافی از برق را به شبکه برق عمومی فروخته و از آن به عنوان منبع درآمد اضافی بهره برداری کند.

**واژه های کلیدی:** شبیه سازی، مدل سازی دینامیکی، سطح پاسخ، شبیه سازی گذری

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۰۷

خنک کننده غیرفعال و فعال، از جمله خنک کننده آب و هوا، مواد تغییر فاز و رویکردهای مختلف است. در هر دسته، زیرمجموعه های دقیقی مانند سرمایش تبخیری، غوطه وری در آب، سیستم های شناور، لوله های آب، کانال های خنک کننده، پاشش کننده های آب، برخورد جت، خنک کننده زمین گرمایی، و انتقال همرفت طبیعی با طراحی های PV بررسی می شود. همچنین جابجایی اجباری را با استفاده از مجراهای خنک کننده، سینک های حرارتی و کلکتورهای هوا، در کنار ادغام مواد تغییر فاز (PCM)، نانوسیالات، خنک کننده تابشی، روش های ترموالکتریک، لوله های حرارتی، پمپ های حرارتی و سایر تکنیک های نوآورانه پوشش می دهد. هر یک از این رویکردها با شماتیک های خاص نشان داده شده و به طور کامل مورد بحث و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد با کاهش دمای پنل های خورشیدی شاهد افزایش

## ۱- مقدمه

سلول های فتوولتائیک خورشیدی (PV<sup>2</sup>) به عنوان فناوری اولیه برای تولید برق سبز ظاهر شده اند. این نوآوری از نور مستقیم خورشید برای تولید برق استفاده می کند و انعطاف پذیری نصب آن باعث سرمایه گذاری قابل توجهی در پانل های PV شده است. علیرغم مزایای متعدد، این سلول ها با کاهش کارایی ناشی از افزایش دمای سلول مواجه می شوند. به این ترتیب، محققان تحقیقات گسترده ای را در مورد راه حل های ممکن با هدف افزایش عملکرد سلول های فتوولتائیک انجام داده اند. این تحقیق، تجزیه و تحلیل کاملی از تکنیک های خنک کننده برای پانل های فتوولتائیک ارائه می دهد. این روش شامل هر دو روش

\* نویسنده مسئول

<sup>2</sup> Photovoltaics

<sup>3</sup> Phase-change material



کارایی هستیم [۱]. کارایی پنل‌های فتوولتائیک خورشیدی زمانی که دمای آنها در شرایط عادی عملیاتی افزایش می‌یابد، کاهش می‌یابد و در نتیجه توان خروجی بسیار کاهش می‌یابد. این پدیده به ویژه در مناطقی با پتانسیل فتوولتائیک بالا که در آن تابش و دمای محیط نیز زیاد است، مرتبط است. برای غلبه بر این مسئله، یک سیستم خنک‌کننده فشرده برای پنل‌های فتوولتائیک تجاری مبتنی بر سرمایه‌گذاری زمین گرمایی کم‌آنتالپی پیشنهاد شده است. گرمای بیش از حد از پنل خورشیدی توسط یک سیستم خنک‌کننده حلقه نزدیک تک‌فاز تخلیه می‌شود که از یک هیت‌سینک طبیعی زیرزمینی که در دمای ثابت و پایین است بهره می‌برد. یک نمونه اولیه که یک مکانیسم ردیابی خورشید تک‌محور را ادغام می‌کند، در ژوئن ۲۰۲۲ در آکالا دهنارس، مادرید، اسپانیا در شرایط بیرونی مونتاژ و آزمایش شده است. همانطور که به طور تجربی نشان داده شده است، با دبی مایع خنک‌کننده ۱.۸ لیتر در دقیقه در هر متر مربع از سطح پنل، سیستم خنک‌کننده دمای پنل خنک‌شده را تا  $20^{\circ}\text{C}$  کاهش می‌دهد، که منجر به بهبود واقعی کارایی پنل تا ۱۳.۸٪ شد. در نهایت، یک تحلیل حساسیت از افزایش توان خالص و انرژی اضافی خالص تولید شده توسط پنل خنک‌شده ارائه شده است [۲].

در مطالعه‌ای، چهار مدل نصب سیستم‌های ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی (PVT<sup>۱</sup>) و سایر دستگاه‌های ساخته شده در برنامه شبیه‌سازی سیستم‌های گذرا با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس<sup>۲</sup> تجزیه و تحلیل می‌شود. ایده این مطالعه در رویکرد بلندمدت به بهره‌برداری از پنل‌های PVT در شرایط اقلیمی انتخاب شده نهفته است. نتایج نشان داد که نوع سلول مورد استفاده ممکن است تولید انرژی الکتریکی سالانه از PVT را حتی تا ۷٪ کاهش دهد. از سوی دیگر از جنبه بلند مدت تشدید فرآیند دریافت گرما از PVT با استفاده از پمپ حرارتی، باعث افزایش ۶٪ این تولید نسبت به مدل پایه شد [۳]. در مطالعه‌ای دیگر یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت فعال با یک گیرنده لوله جاذب داخلی در شهر السماوه عراق ساخته و مورد آزمایش قرار دادند. کلکتور خورشیدی پیشنهادی از یک لوله مسی صاف با قطر داخلی و خارجی به ترتیب ۹.۵ و ۱۲ میلی‌متر و طول کل ۱۰۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. یک مدل ترنسیس از یک کلکتور صفحه تخت ادغام شده با یک لوله جاذب با استفاده از داده‌های تجربی توسعه، شبیه‌سازی و اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که دمای خروجی کلکتور خورشیدی از ۵۲ تا ۶۱ درجه سانتیگراد با میانگین ۵۸ درجه سانتیگراد متغیر است. کارایی کلکتور خورشیدی پیشنهادی بین ۴۵ تا ۶۷٪ با میانگین ۵۸٪ متغیر است [۴]. عملکرد یک PTC<sup>۳</sup> برای ماه‌های مختلف شهر تهران با استفاده از تحلیل‌های انرژی، انرژی، برون اقتصادی و برون محیطی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که PTC بیشترین بازده انرژی (۷۳.۶٪) در ماه جولای و بالاترین کارایی اکسرژی (۲۰.۱۱٪) در ژانویه را داشته است. از تجزیه

و تحلیل‌های انرژی اقتصادی و انرژی محیطی مشخص شد که کلکتور خورشیدی در ماه ژوئن دارای کمترین هزینه به ازای هر واحد اکسرژی مفید تولید شده ( $70.17 \text{ GJ}/\text{\$}$ )، بالاترین امتیاز به دلیل صرفه‌جویی در تولید دی‌اکسید کربن ( $0.0193 \text{ \$}$  در ساعت) بوده است. نتایج نشان می‌دهد که کارایی انرژی و هزینه کل PTC بهینه‌سازی شده (برای ژانویه که حداکثر بازده اکسرژی را داشت) به ترتیب ۲۶.۳۸٪ و ۰.۶۱ دلار در ساعت است. بهبود ۶.۲۷٪ کارایی اکسرژی و ۲۰.۳۶٪ در هزینه کل سیستم را نشان می‌دهد. سیستم‌های خنک‌کننده حرارتی خورشیدی برای کاربردهای مسکونی یک جایگزین امیدوارکننده برای چیلرهای تراکمی الکتریکی هستند [۵].

سیستم‌های تولید همزمان به دلیل کارایی بالا، هزینه کم و سازگاری با شبکه به طور فزاینده‌ای در ساختمان‌های مسکونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این تحقیق شبیه‌سازی دینامیکی یک سیستم جدید تولید همزمان خورشیدی یکپارچه با ساختمان هوشمند با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس برای تامین نیاز برق تجهیزات سیستم و برق، گرمایش، سرمایش و آب شیرین مورد نیاز یک ساختمان مسکونی معمولی در ایران را پیشنهاد می‌کند. این سیستم مجهز به پنل‌های فتوولتائیک، کلکتورهای لوله تخلیه، چیلر جذبی دو اثره، واحد نمک زدایی آب اسمز معکوس و توربین میکرو گاز به عنوان سیستم پشتیبان می‌باشد. استفاده از سنسورهای دمای فصل و کنترلرهای دیفرانسیل به نظارت و کنترل نرخ انرژی در بخش‌های مختلف سیستم و ساختمان با مقایسه دمای بیرون و رطوبت نسبی با شرایط آسایش به روشی هوشمند کمک می‌کند. عملکرد سیستم از دیدگاه انرژی، انرژی، انرژی، هوایی ایران را پوشش می‌دهند، ارزیابی و مقایسه می‌شود. در طول یک سال در این سیستم به ترتیب ۱۰.۱ کیلووات ساعت و ۱.۳۷ کیلووات ساعت است. همچنین، توان مازاد تولید شده برای جبران برخی از هزینه‌های سربار سیستم به شبکه فروخته می‌شود. نتیجه بهینه‌سازی سه هدفه نشان می‌دهد که مقادیر بازده انرژی، انتشار  $\text{CO}_2$  و هزینه محصول واحد این سیستم در بهترین نقطه به ترتیب ۴۴.۹، ۰.۱۵۸ تن/MWh و ۱۲.۲۶ €/MWh در استان تهران است. بر اساس نتایج، شاخص‌های عملکرد سیستم در مقایسه با فناوری‌های مشابه موجود در ادبیات بهبود یافته است [۶]. در تحقیق انجام شده مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک سیستم هیبریدی فتوولتائیک/حرارتی خورشیدی برای ۵ کیلووات بر ثانیه با استفاده از ترنسیس برای انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی برای کاربردهای آب گرم خانگی بررسی شده است. پارامترهای برجسته مورد استفاده برای تعیین کارایی الکتریکی، کارایی حرارتی، کارایی حرارتی کلی، کارایی حرارتی الکتریکی و کارایی انرژی عبارتند از تابش خورشیدی، ولتاژ، جریان، دمای محیط، نرخ جریان جرمی آب، مساحت ماژول پنل فتوولتائیک و غیره. نتایج نشان داد که سیستم هیبریدی خورشیدی برای نرخ جریان آب بهینه ۲۵ کیلوگرم در ساعت

<sup>1</sup> Photovoltaic-thermal (PVT)

<sup>2</sup> TRNSYS

<sup>3</sup> Positive Temperature Coefficient



انتقال انرژی از سوخت‌های فسیلی به انرژی‌های تجدیدپذیر، یک حوزه نسبتاً جدید است. عربستان سعودی یکی از تولیدکنندگان بزرگ میوه خرما است که مقدار زیادی ضایعات نخل خرما تولید می‌کند. استفاده مناسب از این زباله‌ها در عربستان سعودی وجود ندارد، روش سطح پاسخ<sup>۴</sup> برای طراحی تجربی، بهینه‌سازی، و اثرات فردی و تعاملی پارامترها بر روی ترکیبات  $H_2$  و  $CO$  برای یافتن مقادیر بهینه آنها به کار گرفته شد. دما موثرترین عامل برای ترکیب  $H_2$  است و از ۶ تا ۱۸٪ حجمی متغیر است که در مقایسه با دبی هوا و اندازه ذرات خوراک بیشتر است. الگوی مشابهی از عوامل تأثیرگذار برای ترکیب  $CO$  مشاهده شد که از ۸٪ تا ۲۰٪ متغیر است. غنی‌سازی  $H_2$  و  $CO$  به دلیل فعال شدن واکنش‌های گرماگیر در دمای بالا است [۱۱]. یکی از عوامل ضروری برای انتخاب فرآیند خشک کردن، مصرف انرژی است. این مطالعه با هدف بهینه‌سازی درمان خشک کردن کپر با استفاده از همرفت، پنجره انکساری و خشک کردن خلاء همراه با پیش‌تیمار اولتراسونیک با رویکرد مقایسه‌ای بین شبکه‌های عصبی مصنوعی و روش سطح پاسخ انجام شد. برای این منظور، تأثیر دمای خشک کردن (۵۰، ۶۰، ۷۰ درجه سانتی‌گراد)، زمان فراصوت (۰، ۲۰، ۴۰ دقیقه) و روش خشک کردن بر مقدار انرژی بررسی شد. مقادیر بهینه، دمای خشک کردن-زمان فراصوت را تعیین کرد که SEC انرژی را به حداقل می‌رساند. ۵۰ درجه سانتی‌گراد-۳۵.۵ دقیقه، ۷۰ درجه سانتی‌گراد-۴۰ دقیقه و ۷۰ درجه سانتی‌گراد-۲۴ دقیقه به ترتیب برای رفتار مدل با ضریب همبستگی برای آموزش (۰/۹۷۶)، تست (۰/۹۷۱) و اعتبارسنجی (۰/۹۷۲) مشهود است که مناسب بودن بالای مدل را برای بهینه‌سازی مصرف انرژی ویژه نشان می‌دهد [۱۲].

هر ساله تعداد قابل توجهی از سازه‌های بتن مسلح از خوردگی ناشی از یون‌های تهاجمی رنج می‌برند که یک مسئله مهم در دوام و کاهش مقاومت سازه‌ها ایجاد می‌کند. بنابراین، شناسایی سهم هر یون در نابودی بتن بسیار مهم است. این مطالعه از روش سطح پاسخ برای بررسی اثرات جفت یون‌ها و مقادیر مختلف و سهم مربوطه به درجه خوردگی ساختار بتن یک برج خنک‌کننده با خوردگی‌های شدید ناشی از حملات یونی استفاده کرد. نتایج این مطالعه نشان داد که یون‌های کلرید و سولفات بیشترین تأثیر را در تخریب بتن داشتند و بیشترین تأثیر منفی را بر فرسودگی بتن مسلح داشتند. در مقابل، یون‌های منیزیم و کلسیم کمترین سهم را در خوردگی بتن مسلح داشتند [۱۳].

مبدل حرارتی سیم‌پیچ دابل هلیکس که عملکرد انتقال حرارت بالایی دارد، به طور فزاینده‌ای در سیستم‌های انتقال حرارت مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله، یک مدل عددی سه بعدی برای شبیه‌سازی عملکرد انتقال حرارت سیم پیچ دوتایی مارپیچ ایجاد شده است. سپس از روش سطح پاسخ برای ایجاد مدل‌های سطح پاسخ پارامترهای ورودی (پیچ سیم داخلی، گام سیم پیچ خارجی، قطر مارپیچ داخلی، قطر مارپیچ خارجی و قطر سیم پیچ) استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد در مقایسه با طرح اولیه، افت فشار ۱۹.۹۸٪ کاهش

تجزیه و تحلیل می‌شود. کارایی الکتریکی، کارایی حرارتی، کارایی حرارتی کلی، کارایی حرارتی معادل، کارایی انرژی به ترتیب ۳۴، ۶۰، ۳۵ و ۱۳٪ است. میانگین دمای مخزن ۵۰ درجه است [۷].

یک مدل کامل ترنسیس برای مقایسه پیکربندی با ذخیره‌سازی گرم (با ظرفیت معمولی ۴۰ لیتر بر متر مربع سطح کلکتور خورشیدی) و پیکربندی با هر دو انبار گرم و سرد توسعه داده شده است. نتایج نشان داد مناسب‌ترین پیکربندی برای ناحیه کلکتور خورشیدی بسیار معقول است. با افزایش سطح کلکتور، مزایای یک انبار سرد از بین می‌رود. افزایش سطح کلکتور باعث افزایش دمای انبار گرم می‌شود که منجر به تلفات حرارتی بالاتر هم در کلکتور و هم در مخزن می‌شود. هنگامی که حجم ذخیره‌سازی در یک مخزن متمرکز می‌شود، این اثرات کاهش می‌یابد. تأثیر سایر متغیرها بر پیکربندی بهینه نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد [۸]. این مقاله مقایسه چندین سیستم گرمایشی/اسرامیسی نیروگاه مرکزی خورشیدی، حرارتی، تولید همزمان و حرارتی را ارائه می‌کند که در یک آپارتمان معمولی متوسط، واقع در کلگری، آلبرتا، کانادا اجرا شده است. ترنسیس برای مدل‌سازی سیستم و پیش‌بینی مصرف انرژی اولیه و ثانویه، انتشار گازهای گلخانه‌ای<sup>۱</sup> و هزینه‌های آب و برق سالانه سیستم‌های مختلف و در مقایسه با حالت پایه استفاده می‌شود. بالاترین هزینه سالانه آب و برق و صرفه‌جویی در انتشار گازهای گلخانه‌ای با بهره‌برداری از یک دستگاه تولید همزمان در اولویت در یک نیروگاه حرارتی خورشیدی<sup>۲</sup>، تولید همزمان با پمپ حرارتی جذبی، پیش‌بینی کاهش ۲۱٪ هزینه برق سالانه و کاهش ۱۶٪ در انتشار گازهای گلخانه‌ای به دست آمد. با این حال، سیستم مصرف انرژی ثانویه بالاتری دارد. بهره‌برداری از کلکتورهای حرارتی خورشیدی در اولویت نسبت به واحد تولید همزمان در همان نیروگاه مرکزی، بیشترین صرفه‌جویی در انرژی اولیه و ثانویه را به دست آورد و ۱۶٪ و ۱۸٪ صرفه‌جویی نسبت به حالت پایه داشت. کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ۱۶٪ با هر دو استراتژی عملیاتی پیش‌بینی شد [۹].

این مقاله نتایجی را در مورد شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و کنترل سیستم انرژی خورشیدی هیبریدی برای تأمین انرژی یک نیروگاه نمک‌زدایی ارائه می‌کند. هدف اصلی طراحی یک سیستم انرژی پاک برای پاس‌خگویی به بار الکتریکی مورد نظر کارخانه نمک‌زدایی با کسر تجدیدپذیر بالا، هزینه کم انرژی و انتشار گاز دی‌اکسید کربن کم است. نتایج نشان می‌دهد که سیستم برق خورشیدی شبکه‌ای/اینورتر بهترین عملکرد را در مقایسه با ژنراتور/دیزل/باتری/اینورتر ارائه می‌دهد. کل انرژی سیستم خورشیدی متصل به شبکه هیبریدی برای پاس‌خگویی به بار AC کارخانه نمک‌زدایی تقریباً بدون کمبود برق و توان اضافی استفاده می‌شود. سیستم قدرت هیبریدی پیشنهادی برای نیروگاه نمک‌زدایی پایدار، از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست است: کسر انرژی تجدیدپذیر بالا (۴۷.۳٪)، توان اضافی کم (۰.۱۵٪)، هزینه کم انرژی (۹۰ \$/MWh) و گاز  $CO_2$  کم. انتشار (۲۶۴.۲۵ کیلوگرم  $CO_2$ /MWh) است [۱۰].

<sup>3</sup> carbon dioxide

<sup>4</sup> Response surface method

<sup>1</sup> Greenhouse Gases

<sup>2</sup> Solar thermal power station





می‌یابد، اتلاف انرژی ۸.۷٪ کاهش می‌یابد، و ضریب انتقال حرارت کلی ۵.۳۴٪ افزایش می‌یابد [۱۴]. سیستم BIM<sup>۱</sup> روشی است که به معماران اجازه می‌دهد تا طراحی خود را به صورت دیجیتالی شبیه‌سازی کرده و تمام اطلاعات مربوط به یک پروژه معماری را مدیریت کنند. در پایداری، سه جنبه اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی به طور کامل با یکدیگر در تعامل هستند و اکثر محققان پایداری را در این سه جنبه اصلی پایداری زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی بررسی می‌کنند. بنابراین در این تحقیق چهار هدف را بررسی کرده‌ایم که ابتدا با استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان تاثیر جهت‌گیری ساختمان بر کاهش مصرف انرژی را ارزیابی کرده و بهترین جهت را مشخص می‌کند. سپس با استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان به بررسی تاثیر قرارگیری نورگیرها و بازشوها بر کاهش مصرف انرژی می‌پردازیم. در نهایت به بررسی تاثیر استفاده از نماهای سبز و هوشمندی ساختمان بر مصرف انرژی ساختمان می‌پردازیم. در نهایت با مقایسه نتایج به دست آمده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت بهترین حالتها مشخص می‌شود [۱۵].

ویژگی‌های انتقال حرارت و مصرف انرژی مهمترین پارامترهای عملکرد صفحه سرد برای مدیریت حرارتی بسته باتری لیتیوم یون خودروی الکتریکی است. در این کار، به منظور پرداختن به موضوع بهینه‌سازی چندهدفه صفحه سرد چندکاناله تحت جریان ضربانی متناوب، روش‌شناسی سطح پاسخ نتایج نشان می‌دهد که عبارت خطی بیشترین تاثیر را بر روی پارامترها دارد. با توجه به راه‌حل بهینه پارتو به دست آمده، توابع هدف بهینه برابر با  $W, W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1} 394.7012$  و  $A = 0.1086 J$  و متغیرهای طراحی مربوطه  $vin = 0.02392 m/s$ ،  $e = 3.1846$  و  $0.1778$  هستند [۱۶]. ساختمان سبز مفهومی در توسعه پایدار است که هدف آن کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن از ساختمان‌ها است. در این مطالعه سعی شده است یک سیستم HVAC<sup>۲</sup> سبز جدید طراحی و معرفی شود که مصرف انرژی و تولید کربن ساختمان‌ها را کاهش می‌دهد. نتایج نشان داد که سیستم خنک‌کننده خورشیدی یک انتخاب عالی برای تامین نیازهای خنک‌کننده در آب و هوای گرم است. با اتصال این نوع سیستم خنک‌کننده با بخاری‌های سوخت زیستی، سیستم تهویه مطبوع پایدار می‌تواند ساختمان‌های سبز<sup>۳</sup> را حتی در آب و هوای سرد یا خنک توسعه دهد. افزودن تولیدکنندگان برق سبز مانند پنل‌های فتوولتائیک به این سیستم و ساختمان موفقیت‌آمیز بود. حداکثر انرژی سبز تولیدی در ساختمان‌ها ۱۷/۹ مگاوات ساعت در سال محاسبه شد [۱۷]. برج‌های خورشیدی از هلیوستات برای هدایت نور خورشید به یک گیرنده استفاده می‌کنند. هنگامی که تابش خورشیدی متمرکز به گرما

تبدیل می‌شود، می‌تواند یک توربین بخار متصل به یک ژنراتور برق را به حرکت درآورد که برق تولید می‌کند. هر دو نرم افزار ترنسیس برای چنین هدفی استفاده می‌شوند. نیروگاه مورد نظر از دو بخش یک چرخه خورشیدی با نمک مذاب به عنوان سیال عامل و یک چرخه رانکین با سیال کاری آب برای تولید برق تشکیل شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که نیروگاه خورشیدی بیشترین تولید برق را در ماه‌های ژوئن و جولای دارد. کارایی در این دو ماه برای نانوسیال نمک مذاب ۲۵٪ و برای نمک مذاب ۲۴٪ است. علاوه بر این، استفاده از نانوسیال نمک مذاب می‌تواند انتقال حرارت در گیرنده خورشیدی را بهبود بخشد و در مقایسه با استفاده از نمک مذاب، برق بیشتری در نیروگاه تولید کند. علاوه بر این، استفاده از دو پیش گرم‌کن به جای یک، کارایی چرخه را تا ۳٪ افزایش می‌دهد [۱۸].

این مقاله عمدتاً مهندسی عملی در مورد شبیه‌سازی سیستم پمپ حرارتی هوا-خاک در یک ساختمان اداری در شن یانگ، چین را بررسی می‌کند. این سیستم در فصل زمستان از منبع هوا به عنوان منبع اصلی گرما و منبع خاک به عنوان منبع گرمای کمکی برای گرمایش استفاده می‌کند، در تابستان فقط از پمپ حرارتی منبع خاک برای سرد کردن استفاده می‌کند. این مقاله شبیه‌سازی هوای سیستم پمپ حرارتی خاک و مقایسه با یک منبع حرارتی را تحلیل مهندسی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد از نظر مصرف انرژی، مصرف انرژی سالانه سیستم پمپ حرارتی دو منبع حرارتی ۲۵۹۶۲.۲۳ کیلووات ساعت است. مصرف انرژی سالانه سیستم پمپ حرارتی تک منبع خاک ۴۵۵۷۳.۷۸ کیلووات ساعت است که در حدود ۴۳.۰۳٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌کند [۱۹]. این مطالعه تاثیر ارتفاع زمین، فاصله ماژول، ارتفاع و زاویه شیب را بر خروجی انرژی سالانه یک سیستم فتوولتائیک مسکونیدر مقیاس کوچک بررسی می‌کند. برای بررسی این سیستم از روش سطح پاسخ ادغام شده با ابزار شبیه‌سازی پی وی سیستم استفاده شده است. دو سهم قابل توجه در این مطالعه نشان داده شد: یک تحلیل پارامتری که تاثیر چندین پارامتر را بر تولید انرژی سالانه ارزیابی می‌کند و یک تحلیل آماری دقیق که از سطح پاسخ با بهینه‌سازی استفاده می‌کند. برای طرح آزمایشی از طرح مرکب مرکزی با ۳۰ اجرا استفاده شد، یافته‌ها نشان می‌دهد که ارتفاع زمین، فاصله ماژول‌ها و زاویه شیب ماژول به طور قابل توجهی بر تولید انرژی سالانه تأثیر می‌گذارد. تجزیه و تحلیل بهینه‌سازی نشان می‌دهد که بالاترین خروجی انرژی سالانه سیستم زمانی به دست می‌آید که ارتفاع زمین روی ۰.۸۲ تنظیم شود، فاصله ماژول ۸.۹۵ متر، ارتفاع ماژول ۱.۳۵ متر و زاویه شیب ماژول ۳۵.۷ اینچ باشد [۲۰].

<sup>3</sup> Green Building

<sup>1</sup> Building Information Modeling

<sup>2</sup> Heating, Ventilation, and Air Conditioning

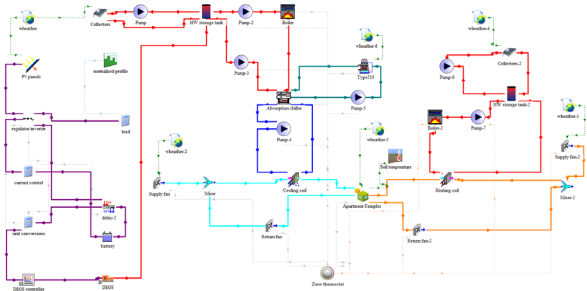


جدول (۱): برخی از تحقیقات انجام شده در خصوص موضوع

ردیف	نویسندگان	سال انتشار	موضوع	نتایج
۱	جعفریان و همکاران	۲۰۲۰	تجزیه و تحلیل انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم ترکیبی خنک‌کننده، گرما، برق و آب همراه با کلکتورهای فتوولتائیک/حرارتی و سیستم‌های اسمز معکوس	این مطالعه با استفاده از روش‌شناسی سطح پاسخ <sup>۱</sup> (RSM) بهترین راه‌اندازی یک سیستم ترکیبی خنک‌کننده، گرمایش، برق و آب <sup>۲</sup> جدید را برای مناطق ساحلی ارائه می‌کند، نتایج برای شرایط آب و هوایی و الگوهای مصرف دبی و بارسلون (به عنوان دو مطالعه موردی) نشان می‌دهد که مصرف کل برق و گاز سیستم را می‌توان به ترتیب ۷۲.۳٪ و ۶۴.۶٪ نسبت به سیستم پایه کاهش داد.
۲	رحیمی و همکاران	۲۰۲۴	بررسی عملکرد یک سیستم انرژی تجدیدپذیر مستقل با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM): تجزیه و تحلیل E <sub>4</sub> و بهینه‌سازی چند هدفه	این مطالعه با هدف شناسایی و ارائه یافته‌های جدید در زمینه سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر ترکیبی متناسب با عملیات خارج از شبکه از طریق یک بررسی عددی-تجربی انجام شد، پارامترهای بهینه‌شناسایی شده شامل تنظیم زمان ۱۲:۳۵ بعد از ظهر، چگالی جریان 0.693 A/cm <sup>2</sup> ، دمای آب ورودی 326.2 K و فشار ورودی توربین ORC در حدود ۵۸۰ کیلو پاسکال است. این پارامترها به نتایج چشمگیر E <sub>4</sub> منجر می‌شوند: ۵۰.۹٪ کارایی انرژی، ۵۴.۷٪ کارایی انرژی، ۰.۵۳ دلار هزینه انرژی و شاخص پایداری ۲.۱.
۳	مانیا و همکاران	۲۰۲۲	مطالعه تجربی و عددی برای توسعه مدل ترنسیس برای یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت فعال با یک گیرنده لوله سرپانتین داخلی	در این مطالعه، یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت فعال (FPSC) با یک گیرنده لوله جاذب داخلی در شهر السماوه عراق (عرض جغرافیایی ۳۱/۱۹ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۵/۱۷ درجه شرقی) ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که دمای خروجی کلکتور خورشیدی از ۵۲ تا ۶۱ درجه سانتیگراد با میانگین ۵۸ درجه سانتیگراد متغیر است. کارایی کلکتور خورشیدی پیشنهادی بین ۴۵ تا ۶۷٪ با میانگین ۵۸٪ متغیر است.
۴	قربانی و همکاران	۲۰۱۹	توسعه یک سیستم تولید همزمان نوآورانه برای تولید آب شیرین و انرژی توسط انرژی‌های تجدیدپذیر با استفاده از سیستم ذخیره انرژی حرارتی	در این مقاله از دیش کلکتورهای خورشیدی همراه با ذخیره مواد تغییر فاز برای تامین انرژی حرارتی مورد نیاز یک نیروگاه بخار با ظرفیت خالص تولید ۱۰۶۳ مگاوات استفاده شده است. نتایج نشان داد کارایی انرژی کل سازه یکپارچه ۵۲/۲۳٪ است و بیشترین سهم تخریب انرژی در بین تجهیزات مربوط به مبدل‌های حرارتی و کلکتورها به ترتیب ۴۶/۸۳٪ و ۴۰/۹۳٪ است، در ضمن مصرف برق ۴۶٪ کاهش داشته است.
۵	جهانگیر و همکاران	۲۰۲۲	بررسی انرژی در ساختمان‌هایی که از چیلر جذب خورشیدی همراه با بخاری‌های سوخت زیستی و سیستم‌های گرمایش/سرمایش خورشیدی در آب و هوای مختلف استفاده می‌کنند.	این سیستم از چیلرهای جذبی خورشیدی برای تامین نیازهای سرمایشی ساختمان‌ها استفاده می‌کند. علاوه بر این، دیگ‌های بخار با سوخت زیستی (بیوگاز) نیز برای تامین نیازهای گرمایشی اضافه می‌شوند. نتایج مدل‌سازی این سیستم HVAC سبز برای ۱۰ اقلیم مختلف حاکی از مزایای قابل توجه این سیستم نسبت به سیستم‌های سنتی است. سیستم تهویه مطبوع سبز می‌تواند حداکثر ۵۰ مگاوات ساعت انرژی در یک ساختمان چهار طبقه را ذخیره کند. در صورت تجهیز ساختمان مذکور به این سیستم جدید تهویه مطبوع، حداکثر ۳۱ تن کربن صرفه‌جویی و حداکثر انرژی سبز تولیدی در ساختمان‌ها ۱۷/۹ مگاوات ساعت در سال محاسبه شد.
۶	سید محمدی و همکاران	۲۰۲۴	تجزیه و تحلیل E <sub>4</sub> و بهینه‌سازی سه هدفه یک سیستم جدید نسل چهارم خورشیدی برای یک ساختمان مسکونی هوشمند در اقلیم‌های مختلف ایران	این تحقیق شبیه‌سازی دینامیکی یک سیستم جدید تولید همزمان خورشیدی یکپارچه با ساختمان هوشمند با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس برای تامین نیاز برق تجهیزات سیستم و برق، گرمایش، سرمایش و آب شیرین مورد نیاز یک ساختمان مسکونی معمولی در ایران را پیشنهاد می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که سیستم می‌تواند تمامی نیازهای انرژی ساختمان را برآورده کند و به‌طور میانگین میزان تولید ساعتی انرژی سرمایشی و گرمایشی در طول یک سال در این سیستم به ترتیب ۱۰۱ کیلووات ساعت و ۱۳۷ کیلووات ساعت است. همچنین، توان مازاد تولید شده برای جبران برخی از هزینه‌های سربار سیستم به شبکه فروخته می‌شود.
۷	چاو و همکاران	۲۰۲۳	تجزیه و تحلیل انرژی، انرژی، صرفه‌جویی در انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی یک سیستم خنک‌کننده، گرمایش و توان ترکیبی (CCHP) تحت استراتژی‌های عملیاتی مختلف: شبیه‌سازی گذرا	عملکرد سیستم CCHP تحت استراتژی‌های عملیاتی مختلف به صورت پویا توسط نرم افزار ترنسیس از انرژی، اکسرژی، صرفه‌جویی در انرژی، اقتصاد و محیط زیست شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که میانگین COP و LWHWP به ترتیب ۲۲.۶۹٪ و ۴.۷۵٪ بیشتر از COP رتبه‌بندی شده است همچنین کارایی انرژی و بازده انرژی سیستم در حالت FEL در تابستان ۱۹.۹۶٪ و ۴۱.۹۰٪ و در زمستان ۲۵.۱۳٪ و ۵۹.۳۶٪ می‌باشد.

<sup>1</sup> Response surface methodology (RSM)<sup>2</sup> Combined Cooling, Heat, Power, and Water generation (CCHPW)

## ۲- اهداف مطالعه



شکل (۱): پیاده‌سازی پنل فتوولتائیک و دی‌لزتراتور در ترنسیس

### ۳-۱- معادلات حاکم بر بهینه‌سازی سیستم

برای به‌دست آوردن بهترین وضعیت کارایی انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی مدل بررسی شده، از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ استفاده می‌شود. همچنین، تاثیر تغییرات فاکتورهای موثر سیستم ترکیبی مورد بررسی بر روی هدف و پاسخ‌های مشخص شده انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی مورد مطالعه قرار گرفت. فاکتورها، متغیرهای مستقلی برای تصمیم‌گیری دقیق در بحث طراحی سیستم ترکیبی مورد تحقیق هستند. از طرفی، پاسخ‌ها شاخص‌های انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی عملکرد سیستم ترکیبی را تحت تاثیر فاکتورهای انتخاب شده برای بهینه‌سازی نشان می‌دهند. سطح پاسخ یک روش آماری است که برای بهینه‌سازی یک پاسخ خاص، در جایی که پاسخ تحت تاثیر فاکتورهای متعددی باشد، استفاده می‌شود [۲۱]. بر اساس فاکتورهای انتخابی، سطح پاسخ مجموعه‌ای از آزمایشات و یا شبیه‌سازی‌های کامپیوتری را طراحی و پیشنهاد می‌کند که پاسخ‌ها باید در آن نقاط ارزیابی و شبیه‌سازی شوند. سطح پاسخ یک معادله درجه دوم برای پیش‌بینی رابطه بین هدف‌های انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی انتخاب شده و فاکتورهای مستقل بهینه‌سازی تشکیل می‌دهد، که مطابق معادله زیر استفاده می‌شود:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{N_f} \beta_i z_i + \sum_{i=1}^{N_f} \beta_{ii} z_i^2 + \sum_{i < j=2}^{N_f} \sum \beta_{ij} z_i z_j \quad (1)$$

که در آن،  $y$  پاسخ انرژی-اقتصادی در نظر گرفته شده،  $Z$  عامل انتخابی برای بهینه‌کردن،  $i$  و  $j$  شمارنده تعداد فاکتورهای مستقل و  $N_f$  تعداد فاکتورها است. علاوه بر این،  $\beta$  ها ضرایب مجهول استفاده شده هستند که با معادلات و تحلیل رگرسیون به دست می‌آیند [۲۱].

### ۳-۱-۱- بهینه‌سازی چند پاسخی

هدف این مطالعه بهینه‌سازی سیستم ترکیبی با در نظر گرفتن جنبه‌های انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی می‌باشد، یعنی باید بیش از یک پاسخ بهینه شود. برای این هدف از روشی به اسم تابع مطلوبیت<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. در این روش، هر پاسخ به یک تابع مطلوبیت خاص تبدیل می‌گردد. تابع مطلوبیت مورد مطالعه بین مقادیر صفر و یک

این مقاله شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و مدل‌سازی دینامیکی یک سیستم چند منبعی تولید انرژی را مورد بررسی قرار می‌دهد. در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس مدل پیاده‌سازی می‌شود؛ در ادامه با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت مدل بهینه و سپس مجدداً در نرم‌افزار ترنسیس اجرا و نتایج دینامیکی آن تحلیل می‌شود. این سیستم شامل پنل‌های خورشیدی و دستگاه CCHP به‌عنوان تجهیزات اصلی تولید انرژی است. توابع هدف شامل کل مصرف برق، مصرف کل گاز، مصرف سوخت CCHP و همچنین بازگشت سرمایه به عنوان پاسخ اقتصادی و انرژی سیستم می‌باشد. در ادامه تحلیل نتایج دینامیکی سیستم شامل: تغییرات دما، بازدهی و متوسط روزانه برق تولیدی پنل‌های خورشیدی، انرژی جذب شده متوسط روزانه در کلکتورهای خورشیدی، تغییرات متوسط روزانه برق تولیدی، گرمای اگزاست و مصرف سوخت در CCHP، تغییرات ساعتی تقاضای برق، برق تولید شده توسط پنل‌های خورشیدی و برق تولید شده توسط CCHP، تغییرات ساعتی تقاضای برق، کل برق تولید شده و تغییرات ساعتی تقاضای مصرف گاز سیستم و مجموعه در طول سال بررسی خواهد شد. جداول (۲-۳) اطلاعات ساعت کاری و تعداد نفرات حاضر در محل و اطلاعات ساختمان‌های تولیدی و اداری در پروژه مورد بررسی را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است محل پروژه در شهر تهران و فعالیت شرکت در زمینه تولید بدنه خودرو می‌باشد. اطلاعات ارائه شده در این دو جدول از طرف واحدهای مهندسی، منابع انسانی و انرژی شرکت سایپا پرس ارسال شده است.

### ۳- پیاده‌سازی مدل

جهت شبیه‌سازی سیستم تولید انرژی ترکیبی با محوریت انرژی‌های تجدیدپذیر از نرم‌افزار ترنسیس استفاده شده است. شکل (۱) که برگرفته از نرم‌افزار ترنسیس می‌باشد، نحوه پیاده‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول (۲): اطلاعات ساعت حضور و تعداد افراد

شیفت	ساعت کارکرد	تعداد نفرات	محل فعالیت
یک	۷ الی ۱۶	۴۰۰	تولیدی و ستادی
دو	۱۶ الی ۲۴	۱۷۰	تولیدی
سه	۲۴ الی ۷	۱۶۰	تولیدی

جدول (۳): اطلاعات مصرف انرژی ساختمان‌ها

نام ساختمان	کاربری	متراز (متر مربع)	تعداد نفرات شاغل در محل	میزان مصرف برق (KW)
سالن تولید	پرسکاری	۱۷۰۰۰	۳۰۰	۱۵۰۰
ساختمان اداری	ستادی	۱۱۰۰	۳۰	۳۰۰



پایین نیز صفر است. بنابراین برای پنل‌های فتوولتائیک به عنوان عامل اول، بازه ۰ تا ۲۴۰۰۰ متر مربع و برای توان دیزل ژنراتور به عنوان عامل دوم، بازه ۰ تا ۳۰۰۰ کیلو وات که بیشترین حد مصرف برق کل می باشد در نظر گرفته شده است [۲۲]. برای عامل‌ها و متغیرها، در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت روش طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ، تعداد  $N_{exp} = 13$  آزمایش همراه با طراحی مرکب مرکزی  $2^{[23]}$  پیشنهاد شده است. در ضمن طراحی آزمایش  $3^3$  و محاسبات سطح پاسخ با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت [۲۴] انجام شد. هدف از بهینه‌سازی، کمینه‌سازی هر پنج پاسخ (تابع هدف) در نظر گرفته شده به صورت همزمان است [۲۵].

#### ۴- نتایج بهینه‌سازی و شبیه‌سازی دینامیکی

برای محاسبه بهترین ترکیب متغیرهای انتخاب شده، روش طراحی آزمایش و بهینه‌سازی سطح پاسخ استفاده شد. جدول (۵) مقادیر پیش‌بینی شده توسط سطح پاسخ برای متغیرها را به گونه‌ای که به سیستم بهینه دست پیدا کنیم، نشان می‌دهد. همچنین، مقادیر هر هدف برای شرایط بهینه در جدول (۶) مشخص شده است. مطلوبیت ترکیبی  $0.724$  برای جواب بهینه، که نزدیک به ایده‌آل  $CD = 1$  است، به دست آمد.

شکل (۲) که کانتورها را نشان می‌دهد، اثرات تغییر عوامل مساحت پنل‌های خورشیدی و توان CCHP را بر پاسخ‌های انرژی-اقتصادی نشان می‌دهد. این نمودار کانتورها، منحنی‌های همسطحی است که براساس مقادیر مختلف مساحت پنل‌های خورشیدی و توان CCHP، نشان می‌دهد که چگونه این تغییرات بر پاسخ‌های انرژی-اقتصادی تأثیر می‌گذارند. به عبارت دیگر، این نمودار نشان می‌دهد که در هر نقطه از نمودار، مقدار پاسخ انرژی-اقتصادی به دست آمده برای آن نقطه است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش‌شناسی سطح پاسخ نشان داد که مساحت پنل‌های فتوولتائیک در حالت بهینه برابر با  $11770$  مترمربع و توان CCHP بهینه برابر با  $1986$  کیلووات است. همچنین، در شرایط بهینه، سیستم بهترین عملکرد را دارد؛ مطلوبیت ترکیبی که برابر با  $0.724$  است، نشان می‌دهد که عملکرد سیستم بهینه نزدیک به حالت ایده‌آل است. از نظر مصرف انرژی، سیستم بهینه به مصرف کل برق  $1079120$  کیلووات، کل مصرف گاز  $375371$  مترمکعب، کل مصرف سوخت دیزل  $2466476$  لیتر و دوره بازگشت سرمایه  $1.61$  سال دست پیدا می‌کند. با توجه به شکل (۲)، می‌توان نقاط بهینه را شناسایی کرده و تغییرات مساحت پنل‌ها و توان CCHP را به گونه‌ای انجام داد که مقادیر پاسخ انرژی-اقتصادی به حداکثر برسند. بنابراین، با بررسی شکل (۶) و تحلیل کانتورها، می‌توان نتیجه گرفت که بهینه‌سازی عوامل مساحت پنل‌های خورشیدی و توان CCHP می‌تواند بهبود قابل توجهی در پاسخ‌های انرژی-اقتصادی داشته باشد.

تغییر می‌کند؛ یعنی برای بدترین حالت، مقدار عددی تابع مطلوبیت صفر است. درحالی‌که تابع مطلوبیت برابر با یک نشان‌دهنده حالتی با شرایط ایده‌آل می باشد. بعد از این، توابع مطلوبیت پاسخ‌ها با یکدیگر ترکیب می‌شوند و مطلوبیت ترکیبی  $1$  (CD) به دست می‌آید که مطلوبیت کلی پژوهش بر این اساس، CD به شرح (۲) محاسبه می‌شود:

$$CD = (de_1 \times de_2 \times \dots \times de_{N_r})^{\frac{1}{N_r}} = \left( \prod_{i=1}^{N_r} de_i \right)^{\frac{1}{N_r}} \quad (2)$$

که  $de_i$  مطلوبیت پاسخ  $i$  ام و  $N_r$  تعداد پاسخ‌ها است. لازم ذکر است که مقصود بهینه‌سازی چند هدفه، به حداکثر رساندن مطلوبیت ترکیبی است.

#### ۳-۱-۲- مصرف برق

مصرف برق توسط انواع تجهیزات مصرف‌کننده نظیر انواع الکتروموتورها و موتورهای پرسی و یا فعالیت‌های جوشکاری در طول سال، مشخص می‌شود، که از (۳) به دست می‌آید:

$$AEC = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} (PC_{pump} \cdot f_{pump} + PC_{fan} \cdot f_{fan} + PC_{HW} \cdot f_{HW} + PC_{DW} \cdot f_{DW})}{3600} \quad (3)$$

که  $N_t$  تعداد قدم‌های زمانی در حل عددی برای کل مدت زمان شبیه‌سازی است.  $PC$  مصرف انرژی است.  $f$  ضریبی از وضعیت روشن یا خاموش بودن هر یک از اجزاء است؛ زمانیکه وسیله مصرف‌کننده روشن باشد  $f$  برابر یک و زمانی که خاموش باشد،  $f$  برابر صفر است.

#### ۳-۱-۳- کل مصرف گاز طبیعی

یک دیگ کمکی با سوخت مصرفی گاز طبیعی، برای پشتیبانی کردن از چرخه‌ی خورشیدی و به منظور بازیابی آبگرم، استفاده شده است. برای افزایش دمای سیال عامل تا یک دمای مشخص ( $T_{set}$ )، مصرف سالانه گاز طبیعی (ANGC) از (۴) به دست می‌آید:

$$ANGC = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} (\dot{m}_f c_f (T_{set} - T_{f,in}) \cdot f_{boiler})}{\eta_{boiler} LHV} \quad (4)$$

که  $\eta_{boiler}$  بازده دیگ و LHV ارزش حرارتی پایینی گاز طبیعی مصرفی است.

#### ۳-۲- عامل‌ها و پاسخ‌های در نظر گرفته شده برای

##### بهینه‌سازی

دو عامل مساحت پنل‌های فتوولتائیک و توان CCHP متغیرهای اصلی طراحی سیستم است. دامنه تغییرات متغیرها در جدول (۴) مشخص شده است. حداکثر فضای در دسترس جهت نصب پنل‌های خورشیدی  $24000$  متر مربع است؛ به همین دلیل حد بالا  $24000$  متر مربع در نظر گرفته شده است؛ همچنین وقتی هیچ پنلی در مدار نباشد

<sup>2</sup> Central composite design

<sup>3</sup> Design of experiment (DOE)



<sup>1</sup> Composite desirability (CD)

جدول (۴): دامنه تغییرات متغیرهای در نظر گرفته شده

در روش‌شناسی سطح پاسخ

واحد	دامنه تغییرات	عامل
m <sup>2</sup>	۰ - ۲۴۰۰۰	مساحت پنل‌های خورشیدی
kW	۰ - ۳۰۰۰	توان دیزل ژنراتور

جدول (۵): اهداف در نظر گرفته شده در روش‌شناسی سطح پاسخ

Response	Name	Field
R1	Net electricity consumption	energy
R2	Total natural gas consumption	energy
R3	Total diesel consumption	energy
R4	Payback period	economic

جدول (۶): مقادیر بهینه به دست آمده برای متغیرهای انتخاب شده در روش‌شناسی سطح پاسخ

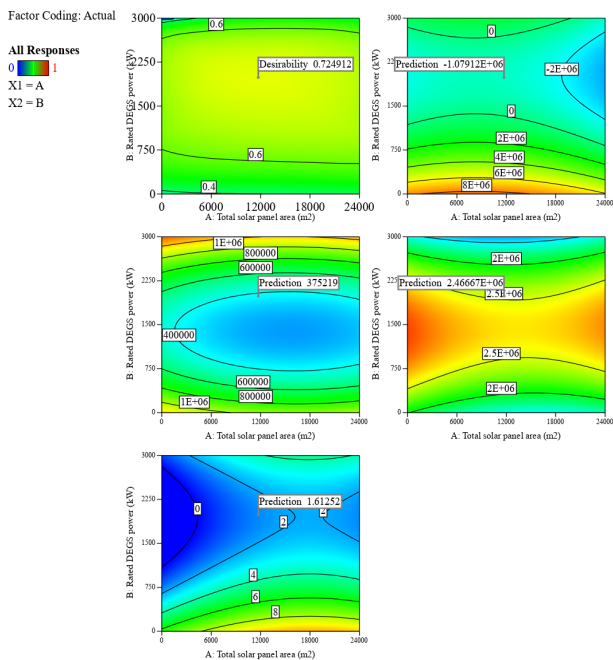
واحد	مقدار بهینه	عامل
m <sup>2</sup>	۱۱۷۷۰	مساحت پنل‌های خورشیدی
kW	۹۸۴	توان دیزل ژنراتور

جدول (۷): مقادیر به دست آمده برای هدف‌ها

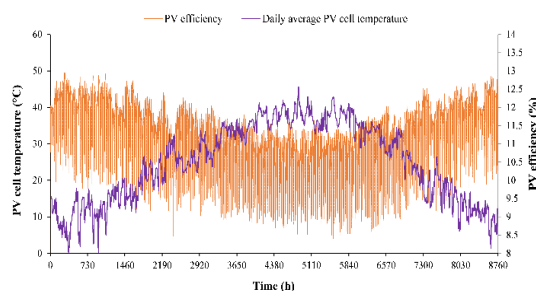
در سیستم روش‌شناسی سطح پاسخ

واحد	نتایج بهینه	پاسخ‌ها	جنبه‌های انرژی-اقتصادی
kWh	-۱۰۷۹۱۲۰	مصرف کل برق	انرژی
m <sup>3</sup>	۳۷۵۳۷۱	کل مصرف گاز	
L	۲۴۶۶۴۷۶	کل مصرف سوخت دیزل	
سال	۱.۶۱	دوره بازگشت سرمایه (PBP)	اقتصادی

با توجه به شکل (۴)، که تغییرات متوسط روزانه برق تولیدی در پنل‌های خورشیدی در طول سال را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که در فصول سرد سال، میزان نوسانات برق تولیدی پنل‌ها بسیار بیشتر از نوسانات در فصل‌های گرم است. در فصول سرد سال، میزان تولید برق پنل‌ها بین ۱۰ تا ۳۰۰ کیلووات متغیر است. اما در فصل‌های گرم سال، میزان تولید برق بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ کیلووات نوسان می‌کند که نشان می‌دهد، میزان تولید برق در این فصل‌ها پیوسته‌تر است و تداوم بیشتری دارد. این میزان بالاتر تولید برق در فصل‌های گرم می‌تواند به دلیل دریافت میزان تشعشع خورشیدی بیشتر و افزایش زمان تابش خورشید در این فصول باشد. همچنین، با توجه به شکل (۵)، که نشان‌دهنده انرژی جذب شده متوسط روزانه در کلکتورهای خورشیدی با مساحت ۱۰۰ متر مربع (برای پیش‌گرمایش آب) است، مشاهده می‌شود که در طول سال، کلکتورهای خورشیدی توانسته‌اند میزانی بین ۳۰ تا ۷۰ کیلووات انرژی را جذب کنند. این انرژی جذب شده می‌تواند در گرم کردن آب مورد استفاده در سیستم پیش‌گرمایش به بویلر کمک کند.



شکل (۲): کانتورهای اثرات تغییر عامل‌های مساحت پنل‌های خورشیدی و توان CCHP روی پاسخ‌های انرژی-اقتصادی



شکل (۳): تغییرات دما و بازدهی پنل‌های خورشیدی در طول سال

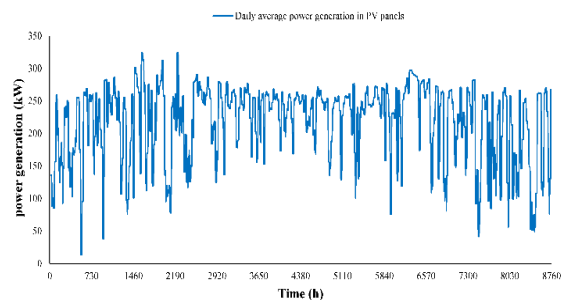
### ۴-۱- نتایج دینامیکی

در این بخش نتایج دینامیکی مختلف به صورت ساعتی در طول سال گزارش شده‌است. بر اساس تحلیل شکل (۳)، می‌توان به ارتباط عکس بین دمای سلول خورشیدی و بازدهی پنل خورشیدی در طول سال پی برد. در شبیه‌سازی انجام شده، دو بازه زمانی از ساعت ۰ تا ۲۱۹۰ و از ساعت ۶۵۷۰ تا ۸۷۶۰ در نظر گرفته شده است. این بازه‌ها به ترتیب ماه‌های سرد و گرم سال را نمایش می‌دهند. در ماه‌های سرد سال، به دلیل دمای محیط پایین‌تر، دمای سلول خورشیدی کاهش می‌یابد و در نتیجه بازدهی پنل خورشیدی بیشتر است. این بازه‌ها شامل ساعاتی از ساعت ۰ تا ۲۱۹۰ و از ساعت ۶۵۷۰ تا ۸۷۶۰ می‌شوند. در این بازه‌ها، بازدهی پنل خورشیدی در حدود ۲۵ تا ۴۸٪ نوسان می‌کند. از ساعت ۲۱۹۰ تا ۶۵۷۰، که ماه‌های گرم سال را شامل می‌شود، دمای سلول خورشیدی بین ۳۰ تا حدود ۴۵ درجه سانتی‌گراد متغیر است. در این بازه زمانی، بازدهی پنل خورشیدی کاهش می‌یابد و بین ۸ تا حدود ۳۰٪ تغییر می‌کند.

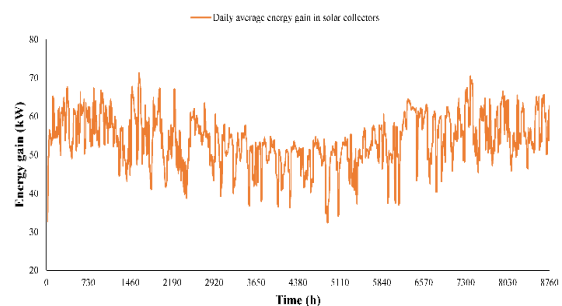


این میزان انرژی جذب شده توسط کلکتورهای خورشیدی نشان می‌دهد که این سیستم‌ها قادر به استفاده از انرژی خورشید برای تأمین بخشی از نیازهای گرمایشی سیستم آب گرم مجموعه هستند. با استفاده از این روش، می‌توان به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با آنها کمک کرد. شکل (۶) تغییرات متوسط روزانه برق تولیدی در CCHP در طول سال را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در طول سال، متوسط تولید روزانه برق در CCHP تغییر می‌کند. مشاهده می‌شود که در فصول گرم سال، میزان برق تولیدی دیزل ژنراتور کمتر از فصول سرد سال است. دلیل این امر این است که در فصول گرم سال، به دلیل تشعشع خورشیدی بیشتر و تعداد روزهای ابری کمتر، پنل‌های خورشیدی توانسته‌اند بیشترین میزان برق را تولید کنند و نیاز مجموعه را تأمین کنند. این به این معنی است که در فصول گرم سال، نیاز به پشتیبانی تولید برق از طریق CCHP کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، در این فصول کمتر به کار گرفته می‌شوند زیرا تولید برق از پنل‌های خورشیدی برای تأمین نیاز مجموعه کافی است. شکل (۷) تغییرات ساعتی گرمای اگزاست CCHP و مصرف سوخت در طول سال را نشان می‌دهد. با توجه به توضیحات ارائه شده، شکل (۸) تغییرات ساعتی گرمای اگزاست CCHP و مصرف سوخت آن در این سیستم در طول سال را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که در فصول گرم سال، میزان سوخت مصرفی CCHP کمتر است و به طبع آن، میزان گرمای دریافتی از اگزاست دیزل ژنراتور نیز کمتر است. دلیل این امر این است که در فصول گرم سال، نیاز به گرمایی که توسط CCHP تأمین می‌شود، کاهش می‌یابد. به دلیل اینکه در این فصول دمای هوا افزایش می‌یابد و نیاز به گرمایی اضافی کاهش می‌یابد. در نتیجه، سیستم CCHP کمتر به کار گرفته می‌شود و مصرف سوخت آن کاهش می‌یابد. از طرفی میزان تولید برق پنل‌های خورشیدی نیز در فصل گرم بیشتر است. بنابراین میزان مصرف سوخت CCHP هم کاهش داشته است چون نیاز کمتری به سیستم پشتیبان وجود داشته است.

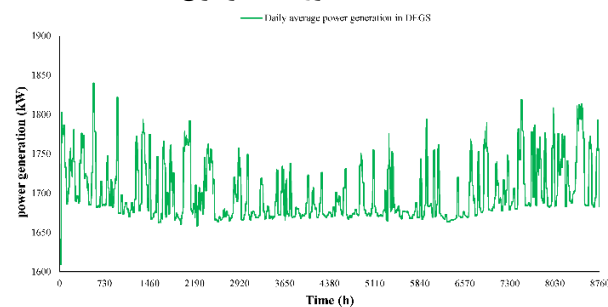
شکل (۹) تغییرات ساعتی تقاضای برق، برق تولید شده توسط پنل‌های خورشیدی و برق تولید شده توسط دیزل ژنراتور در طول سال را نشان می‌دهد. از تحلیل این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که سیستم بهینه ترکیبی طراحی شده برای مجموعه نه تنها قادر به تأمین کل برق مورد نیاز مجموعه است، بلکه میزان اضافی از برق نیز برای فروش به شبکه باقی می‌ماند. در نمودار، میزان برق تولید شده توسط CCHP و پنل‌های خورشیدی در برخی اوقات بیشتر از تقاضای برق مجموعه است. این به این معنی است که در این زمان‌ها، سیستم توانایی تأمین برق مورد نیاز مجموعه را دارد و حتی میزان اضافی از برق تولید می‌شود که می‌تواند به شبکه برق عمومی فروخته شود. از مزیت‌های استفاده از سیستم بهینه ترکیبی CCHP و پنل‌های خورشیدی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:



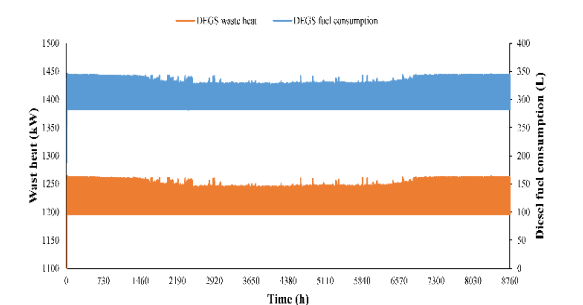
شکل (۴): تغییرات متوسط روزانه برق تولیدی در پنل‌ها در طول سال



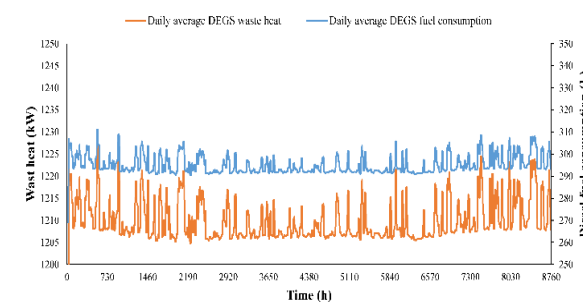
شکل (۵): انرژی جذب شده متوسط روزانه در کلکتورهای خورشیدی (مساحت کلکتور: ۱۰۰ متر مربع)



شکل (۶): تغییرات متوسط روزانه برق در CCHP در طول سال



شکل (۷): تغییرات ساعتی گرمای اگزاست CCHP و مصرف سوخت در طول سال



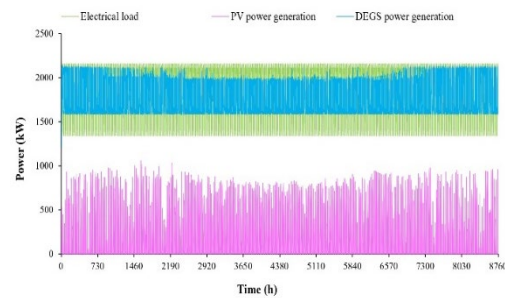
شکل (۸): تغییرات متوسط روزانه گرمای اگزاست CCHP و مصرف سوخت در طول سال

اضافی استفاده کرد. برق تولیدی از برق مصرفی مجموعه کمتر است و این میزان به شبکه فروخته می‌شود.

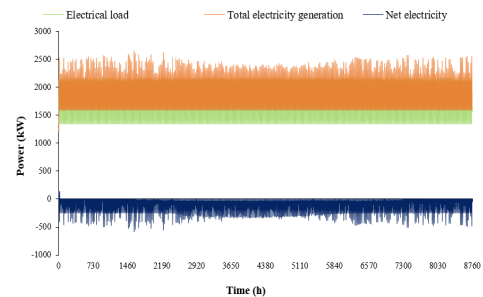
شکل (۱۱) تغییرات ساعتی تقاضای مصرف گاز سیستم و مجموعه، معادل مترمکعب گاز حاصل از انرژی جذب شده از طریق کلکتورهای خورشیدی و معادل مترمکعب گاز حاصل از انرژی اگزاست CCHP را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که مصرف گاز در ماه‌های سرد سال بیشتر از سایر ماه‌ها است. در فصل سرما، نیاز به گرمایش بیشتر است و در نتیجه مصرف گاز افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، در فصل تابستان که هوا گرم‌تر است، نیاز به گرمایش کاهش می‌یابد و بنابراین مصرف گاز نیز کاهش می‌یابد. در نمودار، مشاهده می‌شود که میزان گرمای اتلافی که از اگزاست CCHP تولید می‌شود، در طول سال تقریباً ثابت است. این یعنی CCHP برای تأمین گرما در طول سال به صورت پایدار عمل می‌کند و برای مصرف گاز به شدت وابسته به فصل نیست. از این رو، بهبود کارایی CCHP و استفاده از انرژی اگزاست در تولید گرما، می‌تواند به کاهش مصرف گاز در مجموعه کمک کند. در عین حال، میزان گرمای جذب شده توسط کلکتورهای خورشیدی در تابستان بیشتر از زمستان است.

## ۵- بحث و نتیجه‌گیری

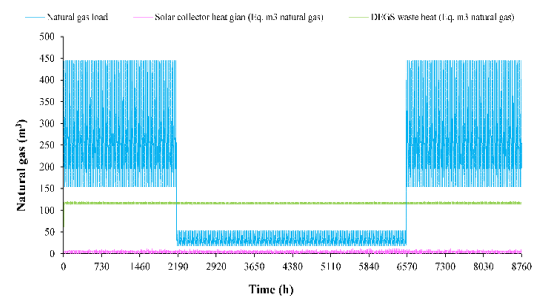
در نتایج مشاهده شد که سیستم تولید همزمان استفاده از پنل‌های فتوولتائیک و CCHP می‌تواند یک راهکار مناسب برای تولید انرژی الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن نیازهای سالن‌های تولیدی و اداری باشد. این سیستم قابلیت تنظیم و بهینه‌سازی مصرف سوخت و کاهش هزینه‌های انرژی را فراهم می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم ترکیبی مورد مطالعه با توجه به شرایط آب و هوایی محل مطالعه، قادر به تولید انرژی الکتریکی و حرارتی در طول سال است. با استفاده از روش سطح پاسخ نشان داده شد که مساحت پنل‌های فتوولتائیک در حالت بهینه برابر با ۱۱۷۷۰ مترمربع و توان CCHP بهینه برابر با ۱۹۸۶ کیلووات است. همچنین، در شرایط بهینه، سیستم بهترین عملکرد را دارد؛ مطلوبیت ترکیبی که برابر با ۰.۷۲۴ است، نشان می‌دهد که عملکرد سیستم بهینه نزدیک به حالت ایده‌آل است. از نظر مصرف انرژی، سیستم بهینه به مصرف کل برق ۱۰۷۹۱۲۰ کیلووات، کل مصرف گاز ۳۷۵۳۷۱ مترمکعب، کل مصرف سوخت CCHP ۲۴۶۶۴۷۶ لیتر و دوره بازگشت سرمایه ۱.۶۱ سال دست پیدا می‌کند. در بخش تغییرات دما و بازدهی پنل‌های خورشیدی در طول سال در این بازه زمانی، بازدهی پنل خورشیدی کاهش می‌یابد و بین ۸٪ تا حدود ۳۰٪ تغییر می‌کند. این نشان می‌دهد که با وجود اینکه در ماه‌های گرم سال میزان تشعشع خورشید کمتر است، اما به دلیل افزایش دمای سلول خورشیدی، بازدهی پنل خورشیدی کاهش می‌یابد. با توجه به تحلیل فوق، می‌توان نتیجه گرفت که بازدهی پنل خورشیدی به دمای سلول خورشیدی وابسته است و با افزایش دما، بازدهی کاهش می‌یابد. همچنین در طول سال، دمای سلول خورشیدی و متغیرهای محیطی دیگر تأثیر قابل توجهی بر عملکرد آن دارند. این نشان می‌دهد که با



شکل (۹): تغییرات ساعتی تقاضای برق، برق تولیدی توسط پنل‌های خورشیدی و برق تولید شده توسط CCHP در طول سال



شکل (۱۰): تغییرات ساعتی تقاضای برق، کل برق تولید شده (مجموع برق پنل‌های خورشیدی و برق تولید شده توسط CCHP) و مصرف کل برق (تفاضل تقاضای برق و کل برق تولیدی) در طول سال



شکل (۱۱): تغییرات ساعتی تقاضای مصرف گاز سیستم و مجموعه، معادل مترمکعب گاز حاصل از انرژی جذب شده از طریق کلکتورهای خورشیدی و معادل مترمکعب گاز حاصل از انرژی اگزاست دیزل

استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر: با استفاده همزمان از CCHP و پنل‌های خورشیدی، مجموعه از منابع انرژی تجدیدپذیر بهره‌برداری می‌کند. این کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی را نشان می‌دهد و به حفظ محیط زیست کمک می‌کند.

تأمین برق پایدار: سیستم بهینه ترکیبی توانایی تأمین برق پایدار را دارد. با توجه به نمودار، مجموعه قادر است در همه زمان‌ها، حتی در ساعات‌های بار پایین، برق مورد نیاز را تأمین کند.

کاهش هزینه‌های سوخت: استفاده از پنل‌های خورشیدی در ساعات‌های بار پایین میزان مصرف سوخت CCHP را کاهش می‌دهد. این بهبود در بهره‌وری سیستم باعث کاهش هزینه‌های سوخت و مدت بازگشت سرمایه سیستم می‌شود.

فروش برق اضافی: در زمان‌هایی که تولید برق توسط CCHP و پنل‌های خورشیدی بیشتر از تقاضای برق مجموعه است، می‌توان این اضافه برق را به شبکه برق عمومی فروخت و به عنوان یک منبع درآمد



برق عمومی فروخته و از آن به عنوان منبع درآمد اضافی بهره‌برداری کند. این نتیجه نشان می‌دهد که سیستم بهینه ترکیبی CCHP و پنل‌های خورشیدی از مزایای اقتصادی، محیط زیستی و پایداری برخوردار است و می‌تواند به عنوان یک راه حل مناسب برای تأمین برق در مجموعه‌های صنعتی و تجاری مورد استفاده قرار گیرد.

تغییرات ساعتی تقاضای مصرف گاز سیستم و مجموعه، معادل متر مکعب گاز حاصل از انرژی جذب شده از طریق کلکتورهای خورشیدی و معادل متر مکعب گاز حاصل از انرژی اگزاست CCHP، نشان می‌دهد که با استفاده از سیستم کلکتورهای خورشیدی و CCHP به عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر در این مجموعه، مزایایی مانند کاهش هزینه‌ها و استفاده بهینه از فضا را به مجموعه ارائه می‌دهد. با توجه به تغییرات فصلی در مصرف گاز و تأمین انرژی از کلکتورهای خورشیدی و CCHP، میزان مصرف گاز در فصول سرد سال کاهش می‌یابد و در فصل تابستان به حداقل می‌رسد. این بهبود کارایی انرژی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی می‌تواند به حمایت از محیط زیست و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند.

همانطور که در بخش‌های قبلی ذکر شد، طراحی دقیق سیستم‌های CCHP به گونه‌ای که همه پارامترها در حالت بهینه خود باشند بسیار مهم است. از این رو در این پژوهش نیز از یک روش بهینه‌سازی برای دستیابی به بهترین طراحی ممکن در نرم افزار ترنسیس استفاده شد. در این پژوهش از روش طراحی آزمایش به کمک روش سطح پاسخ یا RSM استفاده شده و در نهایت خروجی نرم‌افزار ترنسیس موارد دینامیکی پژوهش را پیاده‌سازی می‌کند. در نتایج این پژوهش، مشاهده شد که سیستم تولید همزمان کوپل شده با استفاده از پنل‌های خورشیدی و CCHP می‌تواند یک راهکار مناسب برای تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن نیازهای ساختمان‌ها باشد. این سیستم قابلیت تنظیم و بهینه‌سازی مصرف سوخت و کاهش هزینه‌های انرژی را فراهم می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سیستم ترکیبی مورد بررسی با توجه به شرایط آب و هوایی محل مطالعه، قادر به تولید انرژی الکتریکی و حرارتی در طول سال است. همچنین، با اضافه کردن یک چیلر جذبی، سیستم قادر به تأمین نیازهای سرمایشی ساختمان نیز می‌باشد. این سیستم از نظر عملکرد، بهینه‌سازی مصرف سوخت و تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی، عملکرد قابل قبولی دارد. با توجه به نتایج این تحقیق، سیستم ترکیبی پیشنهاد شده می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسب در صنعت و ساختمان‌ها برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، این سیستم می‌تواند به کاهش آلودگی محیطی و انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند. در نتیجه، استفاده از سیستم تولید همزمان کوپل شده با پنل‌های خورشیدی و CCHP به عنوان یک راهکار پایدار و اقتصادی برای تأمین انرژی الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن نیازهای ساختمان‌ها و شرایط آب و هوایی محل مطالعه، توصیه می‌شود.

در تحقیق انجام شده موارد ذیل مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در مقایسه با سایر پژوهش‌ها مشخص شده است:

وجود اینکه در ماه‌های سرد سال میزان تشعشع دریافتی از خورشید کمتر از ماه‌های گرم سال است، اما به دلیل پایین‌تر بودن دمای سلول خورشیدی در فصل سرد، بازدهی پنل‌ها به مراتب بیشتر بوده‌است.

از تغییرات متوسط روزانه برق تولیدی در پنل‌ها در طول سال مشاهده می‌شود که در فصول سرد سال، میزان نوسانات برق تولیدی پنل‌ها بسیار بیشتر از نوسانات در فصل‌های گرم است. این نتیجه می‌تواند به دلیل تغییرات دما و شدت نور خورشید در طول فصول سال باشد. در فصل‌های سرد، به دلیل کاهش شدت تشعشع خورشیدی، عملکرد پنل‌های خورشیدی کاهش می‌یابد و بنابراین میزان تولید برق نیز کاهش می‌یابد. این تغییرات دما و نور در فصل‌های سرد سال می‌تواند به دلیل آسمان ابری و کاهش زمان تابش خورشید در این فصول باشد، در نتیجه، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات فصلی و نوسانات در شدت نور و دما، تأثیر قابل توجهی بر تولید برق پنل‌های خورشیدی دارند. این نتایج می‌تواند در توسعه و بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های خورشیدی مورد استفاده قرار گیرند و برای برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر منابع انرژی خورشیدی مورد استفاده قرار گیرند.

تغییرات متوسط روزانه برق تولیدی در CCHP در طول سال در فصول سرد سال، احتمالاً به دلیل کاهش تشعشع خورشیدی و افزایش تعداد روزهای ابری است، که تولید برق از پنل‌های خورشیدی کاهش می‌یابد و نیاز به پشتیبانی تولید برق از طریق CCHP افزایش می‌یابد. در نتیجه، در فصول سرد سال، CCHP بیشتر به کار گرفته می‌شوند تا نیاز به برق مجموعه را تأمین کنند. به طور کلی، این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از پنل‌های خورشیدی در فصول گرم سال می‌تواند به کاهش نیاز به پشتیبانی تولید برق از طریق CCHP و در نتیجه کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با آنها کمک کند. تغییرات ساعتی گرمای اگزاست CCHP و مصرف سوخت آن در طول سال و تغییرات متوسط روزانه گرمای اگزاست CCHP و مصرف سوخت دیزل در طول سال، منجر به کاهش مصرف سوخت در CCHP در فصول گرم سال می‌شود که می‌تواند به دلیل استفاده بیشتر از پنل‌های خورشیدی برای تأمین نیازهای گرمایشی باشد. از آنجا که در این فصول تشعشع خورشیدی بیشتر است، پنل‌های خورشیدی می‌توانند بیشترین میزان انرژی را تولید کنند و نیاز به استفاده از CCHP کمتر می‌شود. به طور کلی، این نتایج نشان می‌دهند که در فصول گرم سال، میزان مصرف سوخت و نیاز به گرمای CCHP کاهش می‌یابد. این می‌تواند به کاهش هزینه‌های سوخت و انتشار آلاینده‌های مرتبط با سوخت‌های فسیلی کمک کند. همچنین، استفاده از پنل‌های خورشیدی در این فصول می‌تواند به استفاده بهینه از منابع انرژی تجدیدپذیر و کاهش تأثیرات محیط زیستی مرتبط با مصرف سوخت‌های فسیلی کمک کند.

از تحلیل تغییرات ساعتی تقاضای برق، برق تولید شده توسط پنل‌های خورشیدی و برق تولید شده توسط CCHP در طول سال می‌توان نتیجه گرفت که طراحی و استفاده از سیستم بهینه ترکیبی CCHP و پنل‌های خورشیدی به مجموعه امکان می‌دهد تا به طور کامل و پایدار برق مورد نیاز خود را تأمین کند و حتی میزان اضافی از برق را به شبکه



- در تحقیق حاضر، آنالیز حساسیت انجام شده است تا تأثیر عوامل مساحت پنل‌های خورشیدی و توان CCHP بر تابع مطلوبیت سیستم را بررسی کند. به عبارت دیگر، این تحلیل به ما این امکان را می‌دهد که درک بهتری از تأثیر تغییرات در این دو عامل بر عملکرد بهینه سیستم پیدا کنیم. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار تابع مطلوبیت (CD) برابر با ۰.۷۲۵ است. این نشان می‌دهد که با ترکیب بهینه از دو عامل، سیستم به یک حالت بهینه می‌رسد و مقدار تابع مطلوبیت به ۰.۷۲۵ نزدیک می‌شود. این مقدار نزدیک به بیشترین مقدار ممکن تابع مطلوبیت (۱) است در تحقیق‌های مشابه پیشینه تحقیق تابع مطلوبیت‌های مختلفی از ۰.۶۴، ۰.۵۶، ۰.۸۲ ارائه شده است؛ لیکن تابع مطلوبیت بالای ۰.۷ دارای حالت بهینه بوده و نشان‌دهنده این مورد می‌باشد که سیستم در حالت بهینه طراحی شده است. در ضمن تابع مطلوبیت به‌دست آمده بر اساس موقعیت جغرافیای و ظرفیت در نظر گرفته شده بر اساس تجهیزات موجود به‌دست آمده است.

- در تحقیق حاضر، تأثیر عوامل مساحت پنل‌های خورشیدی و توان CCHP بر مصرف کل برق بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش توان CCHP از ۰ تا ۳۰۰۰ کیلووات، مصرف کل برق از حدود ۷۰۰۰۰۰۰ کیلووات ساعت در سال به تقریباً ۲۵۰۰۰۰۰ کیلووات ساعت در سال کاهش می‌یابد. این مورد نشان می‌دهد سیستم تولید برق بیشتر از نیاز مصرفی مجموعه تولید شده و بخشی از برق تولیدی به شبکه برق عرضه می‌گردد. این کاهش حدود ۶۴٪ بوده و در تحقیق‌های دیگری که در بخش پیشینه تحقیق اشاره شده این مقدار در عددهای مختلف نظیر ۱۰٪، ۳۵٪، ۶۰٪ نیز مشاهده شده است. لازم به توضیح می‌باشد در تحقیق انجام شده با توجه به موقعیت جغرافیایی و ظرفیت در نظر گرفته شده و همچنین آنالیز حساسیت انجام شده بهینه‌ترین حالت را طراحی و کاهش ۶۴٪ را به‌دنبال داشته است.

- در نتایج حاصل از پژوهش، تأثیر تغییرات عوامل مساحت پنل‌های خورشیدی و توان CCHP بر کل مصرف گاز سیستم و مجموعه مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش توان CCHP از ۰ تا حدود ۱۶۰۰ کیلووات، مصرف کل گاز با کاهش ۷۷.۱٪، معادل ۱۳۰۹۹۸۵ مترمکعب در سال به تقریباً ۳۰۰۰۰۰ مترمکعب در سال کاهش داده شد. این کاهش در مصرف گاز به دلیل استفاده از گرمای خروجی در CCHP و افزایش دمای آب مخزن ذخیره آب گرم می‌باشد. با افزایش دما، نیاز به استفاده از بویلر در سیستم کمتر می‌شود و بویلر کمتری برای تأمین گرمای مورد نیاز مورد استفاده قرار می‌گیرد در بخش پیشینه تحقیق این کاهش با اعدادی ۴۶.۸۳٪، ۶۰٪ مشاهده شده ولیکن در تحقیق انجام شده با توجه به موقعیت جغرافیایی و ظرفیت در نظر گرفته شده این مقدار ۷۷.۱٪ شده است که نشان می‌دهد سیستم در شرایط بسیار مناسبی طراحی شده است.

- همچنین تأثیر تغییرات عوامل مساحت پنل‌های خورشیدی و توان CCHP بر مصرف سوخت دیزل مورد بررسی قرار گرفته است. می‌توان از نتایج شبیه‌سازی به این نتیجه رسید که تغییرات مصرف گاز و مصرف سوخت دیزل در CCHP روندی بر عکس یکدیگر دارند. در واقع، کاهش

همزمان مصرف گاز و سوخت در CCHP امکان‌پذیر نیست و روند آن‌ها عکس یکدیگر است. نتایج نشان می‌دهد که باید تصمیم‌گیری درباره استفاده بیشتر از کدام سوخت صورت گیرد. بسته به کمبود گاز طبیعی در کشور و کاهش فشار در شبکه، می‌توان تمرکز را بر روی افزایش توان CCHP تا ۱۶۰۰ کیلووات قرار داد. در این صورت، مصرف گاز کمتری رخ می‌دهد، اما مصرف سوخت CCHP بیشتر است. با استفاده از بهینه‌سازی با استفاده از روش RSM، نقطه بهینه در مساحت پنل‌ها با اندازه ۱۱۷۱۶.۸۹ مترمربع و توان CCHP با اندازه ۱۹۸۶.۶۹ کیلووات مشخص شده است. در این نقطه بهینه، مصرف کلی سوخت دیزل برابر با ۲۴۶۶۴۷۶.۴ لیتر در سال است، در پژوهش‌های دیگری که در پیشینه تحقیق اشاره شده این مقدار در بازه ۱ میلیون تا ۴ میلیون متغیر می‌باشد، ولیکن در تحقیق انجام شده با توجه به موقعیت جغرافیایی و ظرفیت در نظر گرفته شده بهینه‌ترین حالت را طراحی و میزان سوخت مورد نیاز حدود ۲.۵ میلیون لیتر محاسبه شده است.

- همچنین، نصب سیستم‌های خنک‌کننده و اطمینان از تهویه مناسب می‌تواند به کاهش اثرات گرما بر کارایی پنل خورشیدی کمک کند. در پیشینه تحقیق مشخص شد که با استفاده از تکنیک خنک نمودن پنل‌های خورشیدی با روش‌های مختلف تأثیر بسزایی در افزایش کارایی از ۶٪ تا ۸۲.۶٪ انجام شده است. ابتدا از تکنیک استفاده از اسپری آب بر روی پنل‌های خورشیدی استفاده شده است که در این روش ۷.۶٪ تا ۲۳٪ را به‌دنبال داشته است. مورد بعدی اضافه نمودن نانو سیال جهت بالا بردن کارایی تأثیر ۲۴٪ را نشان می‌دهد. در بخش دیگر با استفاده از فن‌های خنک‌کننده بازده پنل‌ها با افزایش ۳.۳۵٪ تا ۱۰.۵٪ را به‌دنبال داشته است. با توجه به تحقیق کاربردی انجام شده مشخص است که تأثیر دما بر روی کارایی مستقیم بوده و در تحقیق انجام شده بین ۷ تا ۳۰٪ متغیر می‌باشد که این نتایج با توجه به موقعیت جغرافیایی و ظرفیت طراحی در حالت ایده‌آل محاسبه شده است.

همچنین در ژوئن ۲۰۲۲ در آکالا دهنارس اسپانیا در شرایط بیرونی آزمایشی مبنی بر خنک کردن پنل و تأثیر دما بر کارایی انجام شد. دبی مایع خنک‌کننده ۳ لیتر در دقیقه (۱.۸ لیتر در دقیقه در هر متر مربع پنل خورشیدی) است. در نتیجه، پنل خورشیدی خنک می‌شود و دما به  $1 \pm 20^\circ\text{C}$  با میانگین روزانه  $1 \pm 15^\circ\text{C}$  کاهش می‌یابد. به دلیل خنک شدن خورشید، بازده پانل به طور قابل توجهی تا  $0.8 \pm 13.8\%$  افزایش یافته است. همانطور که در نتایج تحقیق به‌دست آمده مقدار تأثیر دما بر روی افزایش کارایی ۸٪ تا ۳۰٪ به‌دست آمده که در حالت بهینه می‌باشد. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، استفاده از سیستم کلکتورهای خورشیدی و CCHP به عنوان منابع انرژی مجدداً تأیید می‌کند که این روش‌ها می‌توانند به کاهش مصرف گاز و بهره‌وری انرژی در مجموعه کمک کنند.

## مراجع

- [1] M. A. Obalanlege, J. Xu, C. N. Markides, and Y. Mahmoudi, "Techno-economic analysis of a hybrid photovoltaic-thermal solar-assisted heat pump system for domestic hot water and power generation," *Renewable Energy*, vol. 196, pp. 720–736, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.044>.



- intermittent pulsating flow by RSM and NSGA-II for thermal management of electric vehicle lithium-ion battery pack”, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.129085
- [17] M. H. Jahangir, A. Kargarzadehand F. Javanshir, “Energy investigation in buildings applying a solar adsorption chiller coupled with biofuel heaters and solar heating/cooling systems in different climates”, vol. 8, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.10.428.
- [18] N. H. Abu-Hamdeh, “Numerical investigation of molten salt/SiO<sub>2</sub> nano-fluid in the solar power plant cycle and examining different arrangements of shell and tube heat exchangers and plate heat exchangers in these cycles”, vol. 124, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.JTICE.2021.05.018.
- [19] H. Wang, “Simulation and Analysis of Air-Ground Dual source Heat Pump Operating Efficiency☆”, vol. 121, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.PROENG.2015.09.052.
- [20] A. Radwan, A. Mdallal, S. Haridy, M. A. Abdelkareem, A. H. Alamiand A. Olabi, “Optimizing the annual energy yield of a residential bifacial photovoltaic system using response surface methodology”, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.renene.2023.119914.
- [21] G. A. Lujan-Moreno, G. A. Lujan-Moreno, P. Howard, O. Rojasand D. C. Montgomery, “Design of experiments and response surface methodology to tune machine learning hyperparameters, with a random forest case-study”, vol. 109, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.ESWA.2018.05.024.
- [22] G. C. Derringer and R. C. Suich, “Simultaneous Optimization of Several Response Variables”, vol. 12, no. 4, Oct. 1980, doi: 10.1080/00224065.1980.11980968.
- [23] Y. Li, L. Luand H. Yang, “Energy and economic performance analysis of an open cycle solar desiccant dehumidification air-conditioning system for application in Hong Kong”, vol. 84, no. 12, Dec. 2010, doi: 10.1016/J.SOLENER.2010.09.006.
- [24] W. A. Jensen, “Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments 4th edition”, vol. 49, no. 2, Nov. 2017, doi: 10.1080/00224065.2017.11917988.
- [25] Varghese, E., & Hemavathi, M. (2023). Design Expert Software for RSM and ME: Overview, Design Generation and Analysis.
- [2] D. Lopez-Pascual, I. Valiente-Blanco, O. Manzano-Narro, M. Fernandez-Munoz, and E. Diez-Jimenez, “Experimental characterization of a geothermal cooling system for enhancement of the efficiency of solar photovoltaic panels,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 756–763, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.154>.
- [3] S. Pater, “Long-Term Performance Analysis Using TRNSYS Software of Hybrid Systems with PV-T,” *Energies*, vol. 14, no. 21, p. 6921, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/en14216921>.
- [4] A. Al-Manea, R. Al-Rbaihat, H. T. Kadhim, A. Alahmer, T. Yusafand K. Egab, “Experimental and Numerical Study to Develop TRANSYS Model for an Active Flat Plate Solar Collector with an Internally Serpentine Tube Receiver”, vol. 15, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.ijft.2022.100189.
- [5] M. H. Nasr Esfahani, A. Hajizadeh Aghdamand A. H. Refahi, “Energy, exergy, exergoeconomic, exergoenvironmental (4E) assessment, sensitivity analysis and multi-objective optimization of a PTC –tehran climate data case study”, vol. 415, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137821.
- [6] B. Saadmohammadi and B. Sajadi, “4E analysis and tri-objective optimization of a novel solar 4th cogeneration system for a smart residential building in various climates of Iran”, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.118177.
- [7] R. Geetha, M. M. Vijayalakshmiand E. Natarajan, “Modeling and Simulation Assessment of Solar Photovoltaic/Thermal Hybrid Liquid System Using TRNSYS”, Nov. 2015, doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.813-814.700.
- [8] N. Molero-Villar, J. M. Cejudo-López, F. Dominguez-Muñozand A. Carrillo-Andres, “A comparison of solar absorption system configurations”, vol. 86, no. 1, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.SOLENER.2011.09.027.
- [9] M. Kegel, J. Tamasauskasand R. Sunye, “Solar Thermal Trigenation System in a Canadian Climate Multi-unit Residential Building”, vol. 48, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2014.02.101.
- [10] C. Ghenai, A. Merabet, T. Salamehand E. C. Pigem, “Grid-tied and stand-alone hybrid solar power system for desalination plant”, vol. 435, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.DESAL.2017.10.044.
- [11] A. M. Ali, “Process optimization and economic evaluation of air gasification of Saudi Arabian date palm fronds for H<sub>2</sub>-rich syngas using response surface methodology”, vol. 316, May 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.123359.
- [12] H. Demir, “Optimization of Caper Drying Using Response Surface Methodology and Artificial Neural Networks for Energy Efficiency Characteristics”, vol. 16, no. 4, Feb. 2023, doi: 10.3390/en16041687.
- [13] A. Khaloo, M. Vasheghaniand J. Sedeghi, “Contribution of water-soluble ions in the corrosion of reinforced concrete cooling towers using the response surface method”, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e02966.
- [14] J. Huang, “Multi-objective optimization of a double helical coil heat exchanger using response surface method and genetic algorithm”, May 2024, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.108927.
- [15] Samami, H., Naghibi Irvani, S., Arash Sohrabi, S., Gheitarani, N., & Dehghan, S. (2024). Evaluation and Optimization of Building Greening Methods in Four Different Climates Using Building Information Modeling (BIM). *European Online Journal of Natural and Social Sciences*, 13(1), pp-27.
- [16] W. Zuo, D. Li, Q. Li, Q. Cheng, K. Zhouand J. E, “Multi-objective optimization of multi-channel cold plate under



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



## Designing CNNs with Effective Weights Using Genetic Algorithm for Image Classification

Mojtaba Sajadi<sup>1</sup>, Mohammad Bagher Tavakoli\*<sup>2</sup>, Farbod Setoudeh<sup>3</sup>, Amir Hossein Salemi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

[sajadiarak@gmail.com](mailto:sajadiarak@gmail.com)

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

[mb-tavakoli@iau-arak.ac.ir](mailto:mb-tavakoli@iau-arak.ac.ir)

<sup>3</sup>Department of Electrical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

[f.setoudeh@arakut.ac.ir](mailto:f.setoudeh@arakut.ac.ir)

<sup>4</sup>Department of Electrical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

[ah-salemi@iau-arak.ac.ir](mailto:ah-salemi@iau-arak.ac.ir)

**Abstract:** Convolutional neural networks (CNNs) are the most important branch of deep learning (DL) and have experienced rapid development in recent years. A major challenge in using these networks is their large number of parameters, which result in high computational and time costs in real-world applications. In many cases, this increase in costs is due to the design of deeper networks with more parameters for achieving higher accuracy. The present paper employed evolutionary algorithms (EAs) to introduce a method that can identify the best weights and use them to construct more accurate CNNs, hence eliminating the need for deeper networks. At the end of the article, the CNN obtained from the proposed algorithm is compared with the best existing CNNs; which shows that the proposed CNN has increased the classification accuracy, while the number of its parameters is much less, and as a result, it saves computing resources and time.

**Keywords:** Convolutional neural network, Genetic algorithm, Effective weights, Image Classification.

JCDSA, Vol. 2, No. 5, Spring 2024

Received: 2023-12-23

Online ISSN: 2981-1295

Accepted: 2024-05-11

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

Published: 2024-06-05

### CITATION

Sajadi, M., et. al., "Designing CNNs with Effective Weights Using Genetic Algorithm for Image Classification", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 2, No. 5, pp. 16-25, 2024.

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

### 1- Introduction

Convolutional Neural Networks (CNN) is one of the most popular and widely used deep learning techniques, which has made significant progress in most machine learning methods in recent years [1-3]. The most important advantage of these networks compared to previous techniques is the extraction of features from images automatically without the need for the presence of a human observer [1]. This has caused the creation of convolutional neural networks with different architectures, each of which contains millions of parameters in convolutional layers to extract features from images. The large number of these parameters makes learning the network very time-consuming, and it also makes it difficult to hyper-adjust the parameters related to learning because every small change in the network configuration will cause a change in several million parameters, and due to the long learning time, behavior analysis The network becomes a problem [4, 5]. Due to the necessity of multiple training of these networks in real applications, it is necessary to use methods to reduce the number of parameters or design a network with optimal parameters [6, 7].

### 2- Methodology

Before convolutional neural networks entered the field of competition, the most important obstacle for image classification algorithms was the selection of appropriate features from images. These features should be selected considering the desired application in such a way that they represent the desired entity and are resistant to changes such as rotation, resizing, brightness, color, and occlusion. With the advent of convolution networks by Alex and his colleagues [22], finding these filters is done automatically. In this way, at first, thousands of filters are considered in the form of convolution layers, and during learning, suitable values for these filters are obtained. In other words, at the end of learning, we have filters by which we can extract the features that are effective in learning. Fully connected layers (FC) also perform classification work.

In this article, we have designed a mechanism by which more effective filters can be found and used in network training. By using this mechanism, the accuracy increases significantly and there is no need to increase the depth to achieve higher accuracy.

The output of the proposed algorithm is a convolution network that has the same architecture, but its weights are selected in such a way that it has maximum accuracy. This algorithm consists of the well-known steps of the genetic algorithm, the parts of generating the initial population, evaluating the population, producing offspring, and selecting the new generation will be described in the following subsections. At the stage of initial population production, to build the initial population, first  $N$  convolution networks are built with the architecture mentioned in the input of the algorithm and their weights

are assigned with random values. Then, based on the input  $F$ , a subset of the training database, whose number of members ( $K$ ) is calculated at the beginning of the algorithm in Table 2, is randomly selected and the desired CNN is trained with it. To calculate the fit of each of the networks (individuals), we use the test dataset, which is defined as the input of the algorithm. This dataset is given to each person and their accuracy in classification constitutes the fit value. In most famous datasets, a subset of data is introduced as the test set, which we use to evaluate people [23, 28]. The pseudo code of this section is given in Table 3.

### 3- Results and discussion

Although all CNN architectures can be used as the basic architecture in the proposed algorithm, it is better to use architectures that have less diversity in their layers. The existence of several FC layers or the use of layers with different filter sizes reduces our control over the analysis of algorithm behavior. Considering this point, we have used Resnet-32 architecture as the basic architecture. Another reason for choosing this architecture is that there are deeper versions of this architecture with more parameters and the results obtained from the final network can be compared with them. The following results are the result of running the proposed algorithm on a Geforce GTX 1080 Ti GPU card. DenseNet-BC and Resnet-32-GA have relatively similar accuracy, but the number of parameters of Resnet-32-GA is about 66% less. But in the case of VGG-19, although the number of parameters of the proposed algorithm is only 0.01 of the parameters of VGG-19, it has increased the accuracy to 2.31%. Genetic CNN and CNN-GA algorithms are algorithms in which the design of the final network is done automatically - for this reason, the time cost of these algorithms is very high and in the range of several GPU days. However, Resnet-32-GA has a 2.51% increase in accuracy compared to the network produced by Genetic CNN, and it has approximately the same accuracy as CNN-GA.

### 4- Conclusion

The subject of this article was to present a method to find more effective parameters in deep networks and as a result achieve higher accuracy and reduce time and processing costs, while with this work, the need to design deeper networks is eliminated. In order to complete this work, a method based on genetic algorithm was presented, which significantly improved the accuracy compared to the existing methods. Since most of the filters of convolution layers of deep networks are  $3 \times 3$  filters, our focus in this article has been to select effective filters with the same dimensions, for this reason, Resnet-32 was chosen for conducting tests, and most of its filters have dimensions of  $3 \times 3$ . But in future work, this algorithm can be extended to select filters with other dimensions and, as a result, the ability to implement on more complex networks.





# طراحی شبکه عصبی کانولوشن با وزن های موثر با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای طبقه بندی تصاویر

مجتبی سجادی<sup>۱</sup>، محمد باقر توکلی<sup>۲\*</sup>، فرید ستوده<sup>۳</sup>، امیر حسین سالمی<sup>۴</sup>

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

۲- گروه مهندسی برق، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران (mb-tavakoli@iau-arak.ac.ir)

۳- گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران (f.setoudeh@arakut.ac.ir)

۴- گروه مهندسی برق، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران (ah-salemi@iau-arak.ac.ir)

**چکیده:** شبکه های عصبی کانولوشن مهمترین شاخه یادگیری عمیق هستند و در سال های اخیر، توسعه سریعی را تجربه کرده اند. یک چالش عمده در استفاده از این شبکه ها، تعداد زیاد پارامترهای آن هاست که منجر به هزینه های محاسباتی و زمانی بالا در برنامه های کاربردی دنیای واقعی می شود. در بسیاری از موارد، این افزایش هزینه ها به دلیل طراحی شبکه های عمیق تر با پارامترهای بیشتر برای دستیابی به دقت بالاتر است. مقاله حاضر از الگوریتم های تکاملی برای معرفی روشی استفاده کرده که می تواند بهترین وزن ها را شناسایی کرده و از آنها برای ساخت شبکه های دقیق تر استفاده کند؛ در نتیجه نیاز به شبکه های عمیق تر را از بین می برد. در پایان مقاله، شبکه ی به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی با بهترین شبکه های موجود مقایسه شده است که نشان می دهد شبکه ی پیشنهادی دقت طبقه بندی را افزایش داده است؛ در حالی که تعداد پارامترهای آن بسیار کمتر است و در نتیجه، باعث صرفه جویی در منابع محاسباتی و زمان می شود.

**واژه های کلیدی:** شبکه عصبی کانولوشن، الگوریتم ژنتیک، وزن های موثر، طبقه بندی تصاویر

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲

پارامتر خواهد شد و با توجه به زمان زیاد یادگیری، تحلیل رفتار شبکه مشکل می شود [۴، ۵].

با توجه به لزوم آموزش چندباره ی این شبکه ها در کاربردهای واقعی، به کاربردن روش هایی جهت کم کردن تعداد پارامترها و یا طراحی شبکه با پارامترهای بهینه ضروری است [۶، ۷]. تاکنون تلاش های زیادی در همین جهت صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می کنیم. یک ایده، حذف قسمتی از اطلاعات است به گونه ای که تا حد ممکن، به دقت شبکه صدمه ای وارد نشود. برای مثال، چاکرابورتی در [۸] برای کم تر کردن هزینه های محاسباتی و فضای ذخیره سازی تعدادی از نقشه ویژگی های<sup>۲</sup> لایه های کانولوشن را به صورت تصادفی حذف کرده است. این روش می تواند برای مساله هایی که پیچیدگی کمتری دارند مانند طبقه بندی پایگاه داده ی MNIST<sup>۳</sup> [۹] مفید باشد. اما در طبقه بندی تصاویر پیچیده تر (مانند Caifar10<sup>۴</sup> و IMAGENET)

## ۱- مقدمه

شبکه های عصبی کانولوشن<sup>۱</sup> یکی از محبوب ترین و پراستفاده ترین روش های یادگیری عمیق می باشد که در سال های اخیر در اکثر روش های یادگیری ماشین پیشرفت های چشم گیری داشته است [۱-۳]. مهم ترین مزیت این شبکه ها نسبت به روش های پیشین، استخراج ویژگی ها از تصاویر به صورت اتوماتیک و بدون نیاز به حضور ناظر انسانی می باشد [۱]. همین امر سبب شده که شبکه های عصبی کانولوشن با معماری های مختلف که هر کدام شامل میلیون ها پارامتر در لایه های کانولوشن جهت استخراج ویژگی ها از تصاویر هستند به وجود آیند. تعداد زیاد این پارامترها سبب می شود که یادگیری شبکه، بسیار زمان بر شود، همچنین تنظیم هایپر-پارامترهای مربوط به یادگیری را مشکل می کند؛ زیرا هر تغییر کوچک در پیکربندی شبکه باعث تغییر در چند میلیون

<sup>۴</sup> این پایگاه داده ها حاوی تصاویری از دنیای واقعی هستند که به دلیل وجود زاویه های مختلفی از اشیاء، چرخش، رنگ بندی های متفاوت و حتی پوشانده شدن قسمتی از اشیاء در تصاویر فرآیند طبقه بندی آن ها از پیچیدگی های بالایی برخوردار است.

<sup>۱</sup> Convolutional neural networks (CNNs)

<sup>۲</sup> Feature Map

<sup>۳</sup> این پایگاه داده حاوی تصاویر اعداد دست نویس انگلیسی می باشد که با در نظر گرفتن اندازه ی کوچک تصاویر، تعداد اعداد و پس زمینه ی ساده، از پیچیدگی کمتری نسبت به سایر پایگاه داده های این حوزه برخوردار است.



اندازه، روشنایی، رنگ و انسداد، مقاوم باشند. نکته‌ی قابل توجه این است که در استخراج اکثر این ویژگی‌ها، از عملیات کانولوشن<sup>۴</sup> استفاده می‌شود. برای مثال، می‌توان به استخراج ویژگی‌هایی نظیر لبه [۱۸]، انحنای [۱۹]، گوشه [۲۰]، SIFT [21] و... اشاره کرد. در واقع، چالش اصلی در این زمینه، یافتن فیلترهایی با ضرایب مناسب بود تا با اعمال آن‌ها بر روی تصاویر، ویژگی‌های مورد نظر استخراج شوند. با ظهور شبکه‌های کانولوشن توسط الکس و همکارانش [۲۲] یافتن این فیلترها به صورت اتوماتیک انجام می‌شود. به این صورت که در ابتدا هزاران فیلتر در قالب لایه‌های کانولوشن در نظر گرفته می‌شوند و در خلال یادگیری مقادیر مناسب برای این فیلترها به دست می‌آید. به عبارت دیگر در پایان یادگیری، ما فیلترهایی داریم که توسط آن‌ها می‌توان ویژگی‌های موثر در یادگیری را استخراج نمود. لایه‌های تماماً متصل نیز کار طبقه‌بندی را انجام می‌دهند. حال سوال اینجاست که چه تعداد فیلتر برای طراحی یک شبکه کانولوشن می‌بایست در نظر گرفته شود تا به دقت مورد نظر برسیم؟ متأسفانه برای این سوال جواب واضحی وجود ندارد و در بسیاری از معماری‌ها به صورت تجربی در مورد انتخاب تعداد لایه‌ها و تعداد فیلترها تصمیم‌گیری می‌شود و در صورت عدم دستیابی به جواب مناسب، شبکه‌های عمیق‌تر با تعداد فیلتر بیشتر آزمایش می‌شود. به همین دلیل است که در بسیاری از معماری‌ها چندین نسخه با عمق‌های مختلف وجود دارد. اما آیا به تمام فیلترهایی که در خلال یادگیری به دست می‌آیند نیاز است؟ و آیا می‌توان میزان تاثیر این فیلترها در دقت خروجی را به دست آورد و از فیلترهای موثرتر در کاربردهای مشابه استفاده نمود؟ ما در این مقاله مکانیزمی طراحی کرده‌ایم که توسط آن می‌توان فیلترهای موثرتر را پیدا کرده و در آموزش شبکه از آن‌ها استفاده کرد. با استفاده از این مکانیزم دقت به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند و احتیاج به افزایش عمق برای دست‌یابی به دقت بالاتر نیست.

### ۳- الگوریتم پیشنهادی

در این بخش، ابتدا در زیر بخش ۳-۱ چارچوب کلی الگوریتم را بیان می‌کنیم و سپس در زیر بخش‌های ۳-۲ تا ۳-۵ جزئیات هرگام را شرح خواهیم داد. در هر قسمت علاوه بر آوردن شبه کد، جزئیات هر گام نیز شرح داده شده است.

#### ۳-۱- الگوریتم کلی

چارچوب کلی الگوریتم پیشنهادی در جدول (۱) آمده است. در ورودی الگوریتم می‌بایست معماری مورد نظر را معرفی کنیم. تنظیمات مربوط به الگوریتم ژنتیک - اندازه جمعیت و تعداد نسل‌ها- از دیگر ورودی‌های الگوریتم پیشنهادی هستند. همچنین داده‌های آموزش و تست مورد استفاده را نیز در این قسمت مشخص می‌کنیم. خروجی الگوریتم پیشنهادی یک شبکه‌ی کانولوشن است که همان معماری را دارد اما وزن‌های آن به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که دارای دقت ماکزیمم باشد.

دقت را به شدت کاهش می‌دهد؛ زیرا هیچگونه ارزش‌گذاری روی اطلاعات حذف شده صورت نمی‌پذیرد و ممکن است نقشه ویژگی‌های حذف شده حاوی اطلاعات مهمی برای طبقه‌بندی باشند. ایده‌ی دیگر هرس کردن، وزن‌ها است. مهم‌ترین چالش در هرس کردن، تشخیص وزن‌های با ارزش در یادگیری می‌باشد. یک راه، استفاده از یک مقدار آستانه و حذف وزن‌های با مقادیر کمتر از آن است [۱۰]. در روش‌های کارا تر سعی شده از اطلاعات آماری مانند نرم ۲ و تبدیل مسئله به یک مسئله‌ی بهینه‌سازی توسط سری تیلور<sup>۱</sup> یا شیوه‌های مبتنی بر شبکه بیزین<sup>۲</sup> برای شناسایی وزن‌های با ارزش و حذف دیگر وزن‌ها استفاده شود [۱۱-۱۳]. اما در کل اندازه‌گیری اهمیت پارامتر در شبکه‌های کانولوشن به دلیل تاثیرات متقابل نرون‌ها بسیار مشکل می‌باشد و ممکن است در ابتدا یک اتصال به دلیل وجود وزن‌های مشابه، کم اهمیت به نظر برسد؛ اما با حذف سایر وزن‌ها وجود آن حیاتی خواهد بود.

مقداردهی اولیه به وزن‌ها از مواردی است که در دقت شبکه‌ی نهایی می‌تواند بسیار موثر باشد [۱۴]. یک راه برای مقداردهی اولیه به وزن‌ها استفاده از وزن‌های شبکه‌هایی است که قبلاً آموزش داده شده‌اند. در این روش که به یادگیری انتقالی<sup>۳</sup> موسوم است هم‌خوانی معماری شبکه‌ها و اتخاذ راه‌هایی برای پرهیز از یادگیری بیش از حد، حائز اهمیت است [۱۵]. در دسته‌ی دیگری از پژوهش‌ها تحت عنوان جستجوی معماری عصبی (NAS) سعی می‌شود فرآیند یافتن معماری شبکه‌های عصبی کانولوشنی به صورت اتوماتیک انجام شود. در این دسته از الگوریتم‌ها مانند CNN-GA [16] و ENAS [17] بلوک‌هایی متشکل از چندلایه کانولوشن توسط ناظر طراحی می‌شوند و کار الگوریتم پیدا کردن تعداد این بلوک‌ها و نحوه‌ی اتصال آنها به یکدیگر است؛ به طوری که شبکه‌ی حاصل بهترین دقت طبقه‌بندی را ارائه دهد. مشکل این دسته از الگوریتم‌ها زمان بسیار زیاد اجرا (حدود بیست روز) و نیاز آن‌ها به منابع محاسباتی فراوان می‌باشد.

تمامی کارهای پیشین در این زمینه بر انتخاب لایه‌های کانولوشن و چیدمان آن‌ها تمرکز داشته‌اند؛ در حالیکه هیچ تلاشی برای انتخاب فیلترهای مناسب درون لایه‌ها صورت نگرفته است. در این مقاله، ما روشی را پیشنهاد می‌کنیم که می‌تواند به طور خودکار وزن‌های با ارزش‌تر را شناسایی کند و از آن‌ها برای ساخت شبکه نهایی استفاده کند. در این روش، ساختار شبکه حفظ شده و هر زمان که لازم باشد همه‌ی وزن‌ها شانس حضور در شبکه‌ی نهایی را خواهند داشت.

#### ۲- پیش زمینه

پیش از آنکه شبکه‌های عصبی کانولوشن به میدان رقابت وارد شوند، مهم‌ترین مانع پیش روی الگوریتم‌های طبقه‌بندی تصویر، انتخاب ویژگی‌های مناسب از تصاویر بود. این ویژگی‌ها می‌بایست با در نظر گرفتن کاربرد مورد نظر، به گونه‌ای انتخاب می‌شدند که هم معرف موجودیت مورد نظر باشند و هم در برابر تغییراتی نظیر چرخش، تغییر

<sup>3</sup> Transfer learning

<sup>4</sup> convolution



<sup>1</sup> Taylor expansion

<sup>2</sup> Bayesian optimization-based method

### ۲-۲- توليد جمعيت اوليه

در اين مرحله براي ساختن جمعيت اوليه ابتدا  $N$  شبکه‌ی کانولوشن با معماری‌ای که در ورودی الگوریتم آمده است، ساخته شده و وزن‌هایشان با مقادیر تصادفی مقداردهی می‌شوند. سپس بر اساس ورودی  $F$ ، یک زیرمجموعه از پایگاه داده‌ی آموزش که تعداد اعضای آن ( $K$ ) در ابتدای الگوریتم جدول (۲) محاسبه می‌شود، به صورت تصادفی انتخاب شده و  $CNN$  مورد نظر با آن آموزش می‌بیند. برای پایگاه داده‌هایی مانند *Imagenet* [23] و *Ms coco* [24] که حاوی تعداد زیادی نمونه در هر کلاس هستند مقدار  $F$  برابر با  $N$  در نظر گرفته می‌شود. اما در پایگاه داده‌هایی که تعداد نمونه‌های هر کلاس کم می‌باشد مانند *Caltech* [25] و *CIFAR100* [26] می‌بایست مقدار  $F$  کوچکتر از  $N$  در نظر گرفته شود تا داده‌های بیشتری برای آموزش هر شبکه انتخاب شده و از یادگیری بیش از حد<sup>۱</sup> پرهیز شود. همچنین با توجه به این که هر یک از شبکه‌ها فقط با قسمتی از پایگاه داده آموزش می‌بینند احتمال اتفاق افتادن یادگیری بیش از حد افزایش می‌یابد. بنابراین حتماً می‌بایست در آموزش از افزایش داده‌ها<sup>۲</sup> استفاده گردد [۲۷]. آموزش تا جایی ادامه می‌یابد که شبکه‌ها همگرا شوند. از آن جا که آموزش شبکه‌ها به صورت مستقل از یکدیگر انجام می‌شود، برای بالا رفتن سرعت می‌توان این کار را به صورت موازی و روی چند کامپیوتر نیز انجام داد. شبه‌کد مربوط به این بخش در جدول (۲) آمده است.

### ۳-۳- ارزیابی جمعیت

برای محاسبه‌ی برازش<sup>۳</sup> هر یک از شبکه‌ها (افراد) از دیتاست *Test* که به عنوان ورودی الگوریتم تعریف شده است استفاده می‌کنیم. این دیتاست به هر یک از افراد داده شده و میزان دقت آن‌ها در طبقه‌بندی، مقدار برازش را تشکیل می‌دهد. در اکثر دیتاست‌های معروف یک زیرمجموعه از داده‌ها به عنوان مجموعه تست معرفی شده است که ما از همان دیتاست به منظور ارزیابی افراد استفاده می‌کنیم [۲۳، ۲۸]. شبه‌کد این قسمت در جدول (۳) آورده شده است.

### ۴-۳- توليد نسل جديد

جزئیات توليد نسل جديد در الگوریتم جدول (۴) آمده است. در این مقاله برای توليد نسل جديد از استخر فیلتر<sup>۴</sup> استفاده خواهیم کرد. در این الگوریتم ابتدا استخر فیلترها از جمعیت کنونی تهیه می‌شوند، به این صورت که  $k$  فرد ( $k \geq 2$ ) که هرکدام یک شبکه عصبی کانولوشنی هستند به صورت تصادفی انتخاب شده و به ازای هر لایه کانولوشن موجود در مدل‌ها، یک استخر فیلتر تشکیل می‌شود. برای مثال اگر  $k=4$  و معماری مورد استفاده *Resnet-32* باشد از آنجایی که این شبکه دارای ۳۰ لایه کانولوشن است، ۳۰ استخر فیلتر خواهیم داشت و در استخر فیلتر مربوط به لایه اول که دارای  $64 \times 64$  فیلتر است،  $4 \times 64$  فیلتر قرار می‌گیرد. سپس استخرهای ایجاد شده را به فرایند توليد فرزندان

این الگوریتم، از گام‌های شناخته شده‌ی الگوریتم ژنتیک تشکیل شده است که قسمت‌های توليد جمعیت اوليه، ارزیابی جمعیت، توليد فرزندان و انتخاب نسل جديد در زیربخش‌های بعد شرح داده خواهند شد.

#### جدول (۱): شبه کد مربوط به الگوریتم کلی

---

P: Population size  
M: Maximal generation number  
D: Training images dataset  
F: Fitness function

**Begin**  
 $P_0 \leftarrow$  The initial population generated by the pseudo code of Table 2  
 $t \leftarrow 0$   
**while**  $t < M$  **do**  
    Fitness evaluation for all individual using pseudo code of Table 3  
     $G_t \leftarrow$  new generation from the selected parent using pseudo code of Table 4  
     $P_{t+1} \leftarrow$  New population selection from  $P_t \cup G_t$  pseudo code of Table 6  
     $t \leftarrow t + 1$   
**end while**  
**Return** individual with highest fitness as CNN with best weights

---

#### جدول (۲): شبه کد مربوط به الگوریتم توليد جمعیت اوليه

---

N: Population size  
Model: CNN Architecture Model  
T: Precision threshold  
F: Subset fraction factor

**Begin**  
 $M_{1, \dots, N} \leftarrow$  initiate n network based on Model  
 $K \leftarrow$  number of dataset elements  $\times (1/F)$   
 $P_0 \leftarrow \emptyset$   
**for**  $i = 1$  **to**  $N$  **do**  
     $D_i \leftarrow$  Random subset of dataset with K element  
    Train  $M_i$  while satisfying T  
     $P_0 \leftarrow P_0 \cup M_i$   
**end for**

**Return** The initialized population as  $P_0$

---

#### جدول (۳): شبه کد مربوط به الگوریتم ارزیابی جمعیت

---

P: Population  
Dt: Test dataset for evaluation

**Begin**  
**for** all individuals in P **do**  
    value  $\leftarrow$  classification accuracy on Dt  
**end for**  
**Return** The Population P of the individuals with their fitness values

---

<sup>3</sup> Fitness

<sup>4</sup> Filter pool

Overfitting  
<sup>2</sup> data augmentation



**جدول (۵): شبه کد مربوط به فرایند تولید فرزندان**

L: Number of convolutional layers with  $\dim 3 \times 3$   
Pool: input pool from pseudo code of **Table 4**

**Begin**

$C \leftarrow$  initiate a model with desired architecture

**for**  $i = 1, \dots, L$  **do**

SelectedWeights  $\leftarrow \emptyset$

$N_p \leftarrow$  Number of filters in C. layer $_i$

FilterCollection  $\leftarrow$  **RandomSelect**(Pool $_i$ ,  $N_p$ )

SelectedWeights  $\leftarrow$  SelectedWeights  $\cup$

FilterCollection

\* **Load** SelectedWeights to layer $_i$  of C

**end**

**Return** The generated child as C

**function** *RandomSelect*(Pool,  $N_p$ )

**Begin**

outFilters  $\leftarrow \emptyset$

**for**  $i = 1, \dots, N_p$  **do**

SelectedFilter  $\leftarrow$  random select from Pool

outFilters  $\leftarrow$  outFilters  $\cup$  SelectedFilter

**end for**

**Return** outFilters

**جدول (۶): شبه کد مربوط به الگوریتم انتخاب نسل بعد**

$P_t$ : The Parent population in epoch t

$G_t$ : Population of offspring produced in epoch t

**Begin**

$A \leftarrow P_t \cup G_t$

$P_{t+1} \leftarrow \emptyset$

**while**  $|P_{t+1}| < 0.2 \times |P_t|$  **do**

$p \leftarrow$  individual with the best fitness in A

$P_{t+1} \leftarrow P_{t+1} \cup p$

**end while**

**while**  $|P_{t+1}| < |P_t|$  **do**

$p_1, p_2 \leftarrow$  Randomly select two individual  
from A

$p \leftarrow$  Select the one with better fitness  
from  $\{p_1, p_2\}$

$P_{t+1} \leftarrow P_{t+1} \cup p$

**end while**

**Return** The next generation population  $P_{t+1}$

**۳-۵- انتخاب نسل بعد**

یک راه برای انتخاب نسل بعدی، انتخاب اعضای با بهترین مقدار برازش می‌باشد [۲۹]. اگرچه این راه باعث همگرا شدن سریع الگوریتم می‌شود، خطر قرار گرفتن در نقطه‌ی بهینه‌ی محلی را تشدید می‌کند. برای غلبه بر این مشکل ما از روش جستجوی باینری استفاده کرده‌ایم [۲۹، ۳۰]. با استفاده از این روش اعضای با برازش پایین‌تر نیز شانس حضور در نسل بعد را دارند. اما این مشکل وجود دارد که ممکن است اعضای با داشتن بیشترین برازش در نسل بعد حضور نداشته باشند که باعث همگرایی دیرتر می‌شود. برای غلبه بر این مشکل، ما از روشی شبیه به آنچه در [۱۶] گفته شده استفاده می‌کنیم. به این ترتیب که ۲۰ درصد

(جدول (۵)) ارسال می‌کنیم که خروجی آن تولید یک فرزند جدید می‌باشد. تمرکز ما در الگوریتم پیشنهادی روی انتخاب فیلترها با ابعاد  $3 \times 3$  جهت ساختن لایه‌های کانولوشن می‌باشد. بر حسب این که چه معماری پایه‌ای انتخاب شده باشد، فرزند تولید شده ممکن است دارای لایه‌هایی با انواع دیگر نیز باشد (*shortcut, Fc*...) که پارامترهای آن‌ها به صورت تصادفی مقدار دهی شده‌اند. در نتیجه مقدار برازش فرزند تولید شده به شدت کاهش می‌یابد.

برای غلبه بر این مشکل، پس از تولید فرزند جدید آن را به تعداد  $E$ ، تکرار آموزش می‌دهیم. مقدار  $E$  به معماری پایه‌ی انتخاب شده بستگی دارد. برای معماری‌هایی که تنوع لایه‌های آن‌ها کمتر است، عدد کوچکتر و برای معماری‌های پیچیده‌تر، عدد بزرگتری برای  $E$  در نظر گرفته می‌شود. در آزمایشات مشاهده شد با انتخاب  $E = 1$  برای معماری‌های ساده‌تر و انتخاب  $E \leq 3$  برای معماری‌های پیچیده‌تر دقت به میزان مورد نظر خواهد رسید. در ادامه به شرح فرایند تولید نسل که در جدول (۵) آمده، خواهیم پرداخت. در ابتدای این الگوریتم، یک شبکه با معماری مورد نظر ساخته می‌شود که وزن‌های آن با مقادیر تصادفی مقداردهی شده‌اند. پس از آن که تعداد فیلترهای مورد نظر ( $N_p$ ) مشخص شد، تابع *RandomSelect* فراخوانی می‌شود. در این تابع به تعداد  $N_p$ ، هر بار یک فیلتر به صورت تصادفی از استخر مرتبط انتخاب می‌شود و در نهایت فیلترهای انتخاب شده به الگوریتم اصلی باز می‌گردند. در خطی که با \* مشخص شده است تمام وزن‌های یک لایه کانولوشن که در *SelectedWeights* قرار دارند در لایه متناظر در مدل خروجی بارگذاری شده و عملیات برای لایه‌های دیگر ادامه خواهد یافت. و در زیر بخش ۴-۳ نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم پیشنهادی با نتایج کارهای دیگر مقایسه شده است.

**جدول (۴): شبه کد مربوط به الگوریتم تولید نسل جدید**

P: The Population

E: Number of epochs to train new child

L: Number of convolutional layers with  $\dim 3 \times 3$

**Begin**

$G \leftarrow \emptyset$

**while**  $|G| < |P|$  **do**

$k \leftarrow$  Randomly select a number  
in range  $[2, |P|]$

$S \leftarrow$  Randomly select k individual from P

**for**  $l = 1, \dots, L$  **do**

Pool $_l \leftarrow \emptyset$

$F \leftarrow$  Aggregate filters in  
layer l of S elements

Pool $_l \leftarrow$  Pool $_l \cup F$

**end for**

newChild  $\leftarrow$  the returned individual from  
pseudo code of **Table 5**

**Train** newChild for E epochs

$G \leftarrow G \cup$  newChild

**end**

**Return** The new generation has been produced as G





جمعیت را از اعضای با بیشترین برآزش انتخاب می‌کنیم و سپس باقی اعضا با الگوریتم جستجوی باینری از مجموعه‌های  $P_t$  و  $Q_t$  انتخاب می‌شوند. شبه‌کد این قسمت در جدول (۶) آمده است.

## ۴- نتایج

برای ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی، تعدادی از الگوریتم‌ها انتخاب شده‌اند که در زیربخش ۴-۱ به آنها اشاره شده است. در زیربخش ۴-۲ ساختار دیتاست مورد استفاده برای انجام آزمایشات شرح داده شده است.

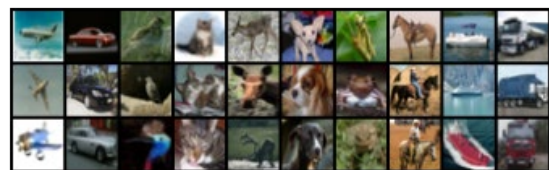
### ۴-۱- رقبا

برای مقایسه کارایی الگوریتم پیشنهادی، شبکه‌های با بیشترین دقت در این حوزه انتخاب شده‌اند که شامل *ResNet* [31]، *DenseNet* و *VGGNet* [32] می‌شوند و همگی جزو برندگان مسابقات *Large-Scale Visual Recognition Challenges* در سال‌های اخیر بوده‌اند [۳۳، ۳۴]. از انواع مختلف *Resnet*، دو مدل *Resnet-110* به علت این که بهترین دقت را در میان مدل‌های *Resnet* دارد و *Resnet-1202* به عنوان پیچیده‌ترین مدل *ResNet* با داشتن بیشترین پارامتر انتخاب شده‌اند [۳۵]. به علاوه از میان انواع مختلف *DenseNet*، مدل *DenseNet-BC* که دارای بهترین دقت در میان مدل‌های *DenseNet* است انتخاب شده است [۳۶]. همچنین دو الگوریتم دیگر که در طراحی آن‌ها از الگوریتم ژنتیک استفاده شده نیز انتخاب شده‌اند. در *Genetic CNN* یک معماری اولیه توسط طراحان در نظر گرفته می‌شود و از الگوریتم ژنتیک به منظور یافتن جای مناسب لایه‌ها استفاده می‌شود [۳۷]؛ به عبارتی طراحی شبکه به صورت نیمه اتوماتیک انجام می‌شود. اما در *CNN-GA* تمام طراحی شبکه از جمله نوع لایه‌ها و ترتیب قرار گرفتن آن‌ها به صورت اتوماتیک انجام می‌شود [۱۶]. البته باید توجه داشت که هیچ یک از این دو الگوریتم به پارامترهای لایه‌ها توجه ندارند و هدفشان چینی مناسب لایه‌ها در کنار یکدیگر است.

### ۴-۲- پایگاه داده‌های آزمایش

در این مقاله دو پایگاه داده *CIFAR10* و *CIFAR100* [۲۶] برای انجام آزمایشات و تعیین دقت طبقه‌بندی انتخاب شده‌اند. دلیل انتخاب این پایگاه داده‌ها، استفاده‌ی گسترده از آن‌ها به منظور طبقه‌بندی در شبکه‌های کانولوشن می‌باشد و می‌توان الگوریتم پیشنهادی را از لحاظ دقت و کارایی با الگوریتم‌های دیگر مقایسه کرد.

Airplane car bird cat deer dog frog horse ship truck



شکل (۱): کلاس‌های داده *CIFAR10* به همراه سه نمونه از آنها

پایگاه داده‌ی *CIFAR10* از ۶۰۰۰۰ تصویر با ابعاد  $32 \times 32$  تشکیل شده که ۵۰۰۰۰ داده به عنوان داده‌های آموزش و ۱۰۰۰۰ داده به عنوان داده‌های تست در نظر گرفته شده است. این پایگاه داده از ۱۰ کلاس تشکیل شده که هر کدام حاوی ۵۰۰۰ تصویر از داده‌های آموزش می‌باشند. در شکل (۱) تمام کلاس‌های این پایگاه داده به همراه ۳ نمونه از هر کدام نمایش داده شده است. ساختار *CIFAR100* همانند *CIFAR10* می‌باشد با این تفاوت که به جای ۱۰ کلاس از ۱۰۰ کلاس تشکیل شده است. بنابراین تعداد داده‌های آموزش برای هر کلاس ۵۰۰ عدد می‌باشد. همان‌گونه که در بخش‌های قبل ذکر شد هنگام استفاده از الگوریتم پیشنهادی، داده‌های آموزش به منظور یادگیری شبکه‌های مختلف به قسمت‌هایی تقسیم می‌شوند و برای پرهیز از یادگیری بیش از حد<sup>۱</sup> استفاده از مکانیزم‌های افزایش داده‌ها<sup>۲</sup> اجتناب‌ناپذیر است. به همین دلیل، هنگام انتخاب هر تصویر از داده‌های آموزش، یک یا چند مورد از تبدیل‌های چرخش، برش و آینه روی آن اعمال می‌شود [۳۸]. همچنین در آزمایش‌ها، از داده‌های تست دیتاست‌های *CIFAR10* و *CIFAR100* برای محاسبه برآزش افراد استفاده شده است.

### ۴-۳- نتایج تجربی

با اینکه از تمام معماری‌های شبکه عصبی کانولوشنی می‌توان به عنوان معماری پایه در الگوریتم پیشنهادی استفاده کرد، اما بهتر است از معماری‌هایی استفاده شود که تنوع کمتری در لایه‌های خود داشته باشند. وجود چندین لایه تماماً متصل و یا استفاده از لایه‌ها با اندازه فیلترهای متفاوت، تسلط ما را بر تحلیل رفتار الگوریتم کاهش می‌دهد. با در نظر گرفتن این نکته، ما از معماری *Resnet-32* به عنوان معماری پایه استفاده کرده‌ایم. دلیل دیگر انتخاب این معماری، این است که نسخه‌های عمیق‌تر آن با پارامترهای بیشتر وجود دارند و می‌توان نتایج به دست آمده از شبکه نهایی را با آن‌ها مقایسه کرد. نتایجی که در ادامه آمده حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی روی یک کارت *GPU Geforce GTX 1080 Ti* می‌باشد.

در ادامه ابتدا تنظیمات اولیه الگوریتم پیشنهادی و مقداردهی به پارامترها شرح داده خواهد شد. سپس نتایج به دست آمده با کارهای مشابه مقایسه می‌شود. برای تولید کردن جمعیت اولیه (الگوریتم ۲) تعداد جمعیت  $p_0 = 10$  و حد آستانه‌ی توقف  $T_s = 0.02$  در نظر گرفته شده است و با توجه به تعداد نمونه‌های هر کلاس  $F = 5$  در نظر گرفته شده است؛ یعنی هر شبکه با یک پنجم داده‌های آموزش یعنی ۱۰۰۰۰ نمونه آموزش می‌بیند. پس از آموزش شبکه‌ها، با در نظر گرفتن داده‌های تست به عنوان  $D_f$ ، مقدار برآزش برای هر یک از افراد جمعیت محاسبه می‌شود (الگوریتم ۳). دقت به دست آمده برای این شبکه‌ها حدود  $75/6\%$  می‌باشد. نکته‌ی قابل توجه این است که هر یک از شبکه‌ها قسمتی از داده‌های تست را درست طبقه بندی می‌کنند و برخی از تصاویر که در یک شبکه اشتباه تشخیص داده شده است، ممکن است در شبکه‌های دیگر درست طبقه بندی شده باشند.

<sup>2</sup> data augmentation

<sup>1</sup> overfitting



جای افزایش عمق که باعث افزایش پیچیدگی و افزایش هزینه‌های محاسباتی و زمانی می‌شود، می‌توان با استفاده از الگوریتم پیشنهادی وزن‌های بهینه را انتخاب کرده و به دقت مورد نظر دست یافت. شبکه‌های Resnet-32-GA و DenseNet-BC دارای دقت نسبتاً مشابهی هستند؛ اما تعداد پارامترها Resnet-32-GA حدود ۶۶٪ کمتر است. اما در مورد VGG-19، با این که تعداد پارامترهای الگوریتم پیشنهادی تنها ۰/۰۱ پارامترهای VGG-19 است دقت را به مقدار ۲/۳۱٪ افزایش داده‌است. الگوریتم‌های Genetic-CNN و CNN-GA الگوریتم‌هایی هستند که طراحی شبکه نهایی آن‌ها به صورت اتوماتیک صورت می‌گیرد؛ به همین دلیل هزینه زمانی این الگوریتم‌ها بسیار بالا و در حد چندین GPU Day است. با این حال Resnet-32-GA نسبت به شبکه تولید شده توسط Genetic CNN، ۲/۵۱٪ افزایش دقت داشته و دقتی مشابه CNN-GA دارد.

در جدول (۸) مقایسه بین فاکتورهای زمانی شبکه تولید شده توسط الگوریتم پیشنهادی و Resnet-32 که دارای پارامترهای یکسان هستند صورت گرفته است. همانطور که در جدول دیده می‌شود زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی اختلاف چشم‌گیری با اجرای Resnet-32 ندارد؛ در حالیکه دقت را به میزان قابل توجهی افزایش داده‌است. گفتنی است ۷۰٪ زمان الگوریتم پیشنهادی صرف مرحله‌های مقاداردهی اولیه جمعیت<sup>۱</sup> و آموزش شبکه‌های میانی (پارامتر E در الگوریتم جدول (۵)) می‌شود که هر کدام از این مرحله‌ها را می‌توان به صورت همزمان روی افراد جمعیت اجرا کرد و در صورت استفاده از یک ساختار برای موازی‌سازی، زمان اجرای الگوریتم به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت.

## ۵- نتیجه‌گیری و کارهای آتی

موضوع این مقاله ارائه روشی جهت یافتن پارامترهای موثرتر در شبکه‌های عمیق و در نتیجه دست یافتن به دقت بالاتر و کاهش هزینه‌های زمانی و پردازشی بود؛ ضمن اینکه با این کار، احتیاج به طراحی شبکه‌های عمیق‌تر از بین می‌رود. جهت انجام این کار، روشی بر پایه‌ی الگوریتم ژنتیک ارائه گردید که نسبت به روش‌های موجود، دقت به میزان قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت. از آنجایی که اکثر فیلترهای لایه‌های کانولوشن شبکه‌های عمیق را فیلترهای ۳\*۳ تشکیل می‌دهند تمرکز ما در این مقاله، انتخاب فیلترهای موثر با همین ابعاد بوده است به همین علت برای انجام تست‌ها Resnet-32 انتخاب شد که اکثر فیلترهای آن با ابعاد ۳\*۳ می‌باشد. اما در کارهای آینده می‌توان این الگوریتم را به انتخاب فیلترهای با ابعاد دیگر و در نتیجه توانایی پیاده‌سازی روی شبکه‌های پیچیده‌تر تعمیم داد. ضمناً الگوریتم پیشنهادی دارای قابلیت موازی‌سازی است که توسط آن می‌توان زمان اجرای الگوریتم را کاهش داد.

با در نظر گرفتن این مطلب و یافتن تصاویری که حداقل در یک شبکه درست طبقه بندی شده باشند در مجموع دقت تشخیص داده‌های تست ۹۷/۶٪ به دست آمد. در نتیجه می‌توان گفت تمام فیلترهایی که جهت طبقه‌بندی داده‌های تست با دقت ۹۷/۶٪ نیاز هستند، در مجموع فیلترهای این شبکه‌ها وجود دارند و فقط می‌بایست فیلترهای موثر، شناسایی شده و در ساختن شبکه نهایی به کار برده شوند که این امر هدف الگوریتم پیشنهاد شده می‌باشد. در ادامه با استفاده از الگوریتم جدول (۴) نسل جدید ساخته می‌شود. از آنجا که تنوع لایه‌ها در معماری Resnet-32 به عنوان معماری پایه انتخاب شده زیاد نیست و فقط یک لایه‌ی تماماً متصل دارد با در نظر گرفتن  $E = 1$  در الگوریتم جدول (۴)، پارامترهای لایه تماماً متصل، تنظیم شده و فرزند تولید شده مقدار برازش مورد نظر را به دست می‌آورد. در نهایت، توسط الگوریتم موجود در جدول (۶)، نسل بعدی از بین جمعیت کنونی و فرزندان تولید شده انتخاب می‌شود و یک چرخه‌ی اجرای الگوریتم به پایان می‌رسد. اجرای الگوریتم تا رسیدن به دقت مورد نظر در چرخه‌های بعد ادامه می‌یابد و در پایان شبکه نهایی که فرد با بیشترین مقدار برازش در نسل آخر است با نام Resnet-32-GA به عنوان خروجی الگوریتم در نظر گرفته می‌شود.

در جدول (۷)، نتایج به دست آمده از اجرای این شبکه با شبکه‌های دیگر مقایسه شده است. در ستون اول نام رقبا آمده است و ردیف‌های اول و دوم، دقت طبقه‌بندی روی دیتاست‌های CIFAR10 و CIFAR100 را نشان می‌دهند و در ردیف سوم، تعداد پارامترهای هر الگوریتم آورده شده است. بالاخره در ردیف آخر زمان تقریبی اجرای الگوریتم‌ها بر حسب GPU Day با یکدیگر مقایسه شده است. یک GPU Day معادل اجرای الگوریتم روی یک GPU به مدت یک روز است [۳۹]. تمام الگوریتم‌ها به غیر از الگوریتم‌هایی که با \* مشخص شده‌اند با استفاده از دیتاست‌های مشخص شده آموزش داده شده‌اند و برای مقایسه عادلانه، در آموزش آن‌ها از همان افزایش داده‌هایی که برای الگوریتم پیشنهادی استفاده کرده‌ایم، بهره برده شده‌است. در مورد الگوریتم‌هایی که با \* مشخص شده‌اند به دلیل این که زمان آموزش آن‌ها بسیار زیاد بوده و علاوه بر آن، در هر بار اجرای الگوریتم ممکن است شبکه‌ی تولید شده توسط آن‌ها دارای ساختار متفاوتی باشد، به گزارش‌های داده شده در مقالات مرتبطشان بسنده شده است [۱۶، ۳۷].

دقت شبکه نهایی به دست آمده توسط الگوریتم پیشنهادی که با عنوان Resnet-32-GA شناخته می‌شود نسبت به Resnet-32، ۴/۱۳٪ افزایش داشته است؛ با اینکه هر دو دارای یک معماری با تعداد پارامترهای یکسان هستند. همچنین دقت Resnet-32-GA نسبت به دیگر شبکه‌های هم خانواده‌ی خود یعنی Resnet-110 و Resnet-1202 به ترتیب ۱/۶۵٪ و ۳/۰۶٪ افزایش داشته؛ در صورتی که تعداد پارامترهای آن نسبت به Resnet-110 و Resnet-1202 به ترتیب ۸۴٪ و ۹۷٪ کاهش داشته است. به عبارت دیگر در شبکه Resnet

<sup>1</sup> population initialization

جدول (۷): مقایسه بین الگوریتم پیشنهادی و رقبای پیشرفته از نظر صحت طبقه بندی

	Manually designed					Automatic designed		Resnet-32-GA
	Resnet-32	Resnet-110	Resnet-1202	VGG-19	DenseNet-BC	Genetic * CNN	CNN-GA*	
<b>CIFAR10 (%)</b>	91.28	93.76	92.35	93.10	95.33	92.90	95.22	95.10
<b>CIFAR100 (%)</b>	70.02	74.10	71.86	71.23	77.08	70.97	77.97	76.10
<b>Number of Parameters</b>	0.27M	1.7M	77.08M	20.04M	0.8M	-	2.9M	0.27M
<b>Execution Time</b>	Less than a GPU day	Less than a GPU day	Less than a GPU day	Less than a GPU day	Less than a GPU day	17 GPU day	35 GPU day	Less than a GPU day

- [8] Chakraborty, S., et al.: Feature map reduction in cnn for handwritten digit recognition. In Recent Developments in Machine Learning and Data Analytics. Springer, 143-148 (2019). [http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-1280-9\\_14](http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-1280-9_14).
- [9] LeCun, Y., The MNIST database of handwritten digits. <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/>, (1998).
- [10] Han, S., H. Mao., Dally, W. J.: Deep compression: Compressing deep neural networks with pruning, trained quantization and huffman coding. arXiv preprint arXiv:1510.00149, (2015).
- [11] Choudhary, T., et al.: Inference-aware convolutional neural network pruning. Future Generation Computer Systems, 135, 44-56 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.04.031>.
- [12] Molchanov, P., et al.: Pruning convolutional neural networks for resource efficient inference. arXiv preprint arXiv:1611.06440, (2016).
- [13] Guo, Y., Yao, A., Chen, Y.: Dynamic network surgery for efficient dnns. Advances in neural information processing systems, 29 (2016). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1608.04493>.
- [14] Narkhede, M.V., P.P. Bartakke, and M.S. Sutaone, A review on weight initialization strategies for neural networks. Artificial intelligence review, 2022. 55(1): p. 291-322. <https://arxiv.org/abs/2310.08109>
- [15] Xu, Z., et al., Initializing Models with Larger Ones. arXiv preprint arXiv:2311.18823, 2023. <https://arxiv.org/abs/2404.01383>.
- [16] Sun, Y., et al., Automatically designing CNN architectures using the genetic algorithm for image classification. IEEE transactions on cybernetics, 2020. 50(9): p. 3840-3854.
- [17] Xie, Y., et al., Automated design of CNN architecture based on efficient evolutionary search. Neurocomputing, 2022. 491: p. 160-171.
- [18] Ganesan, P., Sajiv, G. | A comprehensive study of edge detection for image processing applications. In 2017 international conference on innovations in information, embedded and communication systems (ICIIECS), IEEE, 1-6 (2017). <https://doi.org/10.1109/ICIIECS.2017.8275968>.
- [19] Tang, Y., et al.: Principal curvature measures estimation and application to 3D face recognition. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 59(2), 211-233 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10851-017-0728-2>.
- [20] Possa, P.R., et al.: A multi-resolution FPGA-based architecture for real-time edge and corner detection. IEEE

جدول (۸): مقایسه زمانی بین دو الگوریتم Resnet-32 و Resnet-32-GA

Resnet-32	Resnet-32-GA
397.15s	10920 s زمان لازم برای ساختن جمعیت اولیه:
زمان هر تکرار:	1110 s زمان هر تولید نسل:
تعداد تکرارها برای همگرا شدن: 60	15 تعداد نسل ها:
<b>25,814 s</b>	<b>27,570 s</b>
زمان کلی:	زمان کلی:

## مراجع

- [1] Alzubaidi, L., et al.: Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. J Big Data 8, 53 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00444-8>.
- [2] Dhillon, A., Verma, G.K.: Convolutional neural network: a review of models, methodologies and applications to object detection. Prog Artif Intell 9, 85-112 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13748-019-00203-0>.
- [3] Yao, G., Lei, T., Zhong, J.: A review of convolutional-neural-network-based action recognition. Pattern Recognition Letters, 118, 14-22 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2018.05.018>.
- [4] Andonie, R.: Hyperparameter optimization in learning systems. Journal of Membrane Computing, 1(4), 279-291 (2019). <https://doi.org/10.1007/s41965-019-00023-0>
- [5] Khalid, R., Javaid, N.: A survey on hyperparameters optimization algorithms of forecasting models in smart grid. Sustainable Cities and Society, 61, 102275 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.egyvr.2022.09.188>
- [6] Pietron, M., Wielgosz, M.: Retrain or not retrain?-Efficient pruning methods of deep CNN networks. In Computational Science-ICCS 2020: 20th International Conference, Amsterdam, The Netherlands, June 3-5, 2020, Proceedings, Part III 20. Springer International Publishing, 452-463 (2020). [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-50420-5\\_34](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-50420-5_34).
- [7] Stojanovic, V., et al.: A service-oriented approach for classifying 3D points clouds by example of office furniture classification. In Proceedings of the 23rd International ACM Conference on 3D Web Technology.1-9 (2018). <https://doi.org/10.1145/3208806.3208810>.



- [39] Shorten, C., Khoshgoftaar, T. T.: A survey on image data augmentation for deep learning. *Journal of big data*, 6(1), 1-48 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0>.
- [40] Sun, Y., et al.: Evolving deep convolutional neural networks for image classification. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 24(2), 394-407 (2019). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.10741>.
- Transactions on Computers, 63(10), 2376-2388 (2013). <http://doi.org/10.1109/TC.2013.130>.
- [21] Lowe, D.G.: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2), 91-110 (2004). <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>.
- [22] Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. E.: Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*, 60(6), 84-90 (2017). <http://dx.doi.org/10.1145/3065386>.
- [23] Russakovsky, O., et al.: Imagenet large scale visual recognition challenge. *International journal of computer vision*, 115(3), 211-252 (2015). <http://dx.doi.org/10.1007/s11263-015-0816-y>.
- [24] Lin, T. Y., et al.: Microsoft coco: Common objects in context. In *European conference on computer vision*, Springer, 740-755 (2014). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1_48).
- [25] Griffin, G., Holub, A., Perona, P.: Caltech-256 object category dataset, (2007).
- [26] Krizhevsky, A., Hinton, G.: Learning multiple layers of features from tiny images. (2009).
- [27] Perez, L., Wang, J.: The effectiveness of data augmentation in image classification using deep learning. *ArXiv preprint arXiv:1712.04621*, (2017).
- [28] Everingham, M., et al.: The pascal visual object classes (voc) challenge. *International journal of computer vision*, 88(2), 303-338 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11263-009-0275-4>.
- [29] Miller, B. L., Goldberg, D. E.: Genetic algorithms, tournament selection, and the effects of noise. *Complex systems*, 9(3), 193-212 (1995). <https://doi.org/10.1162/evco.1996.4.2.113>.
- [30] Blicke, T.: Tournament selection. *Evolutionary computation*, 1, 181-186 (2000). [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-16493-4\\_19](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-16493-4_19).
- [31] Sun, Y., et al.: Automatically designing CNN architectures using the genetic algorithm for image classification. *IEEE transactions on cybernetics*, 50(9), 3840-3854 (2020). <http://dx.doi.org/10.1109/TCYB.2020.2983860>.
- [32] Huang, G., et al.: Densely connected convolutional networks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 4700-4708 (2017). <http://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2017.243>.
- [33] Simonyan, K., Zisserman, A.: Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *ArXiv preprint arXiv:1409.1556*, (2014).
- [34] Singh, R.V.: ImageNet Winning CNN Architectures—A Review. Rajat Vikram Singh—Institute of Software Research at Carnegie Mellon University, (2015).
- [35] Kumar, N., Kaur, N., Gupta, D.: Major convolutional neural networks in image classification: a survey. In *Proceedings of International Conference on IoT Inclusive Life (ICIIL 2019)*, NITTTR Chandigarh, India, Springer, 243-258 (2020). [http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-3020-3\\_23](http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-3020-3_23).
- [36] He, K., et al.: Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 770-778 (2016). <http://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>.
- [37] Chen, L., et al.: Review of image classification algorithms based on convolutional neural networks. *Remote Sensing*, 13(22), 4712 (2021). <https://doi.org/10.3390/rs13224712>.
- [38] Xie, L., Yuille, A.: Genetic cnn. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, (2017).





Islamic Azad University, Shiraz Branch

نشریه تحلیل مدارها، داده‌ها و سامانه‌ها  
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis

sanad.iau.ir/journal/jcda



## Trapping polystyrene particles using plasmonic tweezers

Ebrahim Fooladi<sup>1</sup>, Mojtaba Sadeghi<sup>2\*</sup>, Zahra Adelpour<sup>2</sup>, Farhad Bahadori-Jahromi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Fasa Branch, Islamic Azad University, Fasa, Iran  
Fooladi57@gmail.com, bahadori.fr@gmail.com

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran  
sadeghi@unam.bilkent.edu.tr, adelpour@iaushiraz.ac.ir

**Abstract:** This research analyzes and examines the use of plasmonic tweezers in the field of biotechnology, focusing on an inclined twin-core plasmonic optical fiber tweezer. This tweezer was designed and modeled using COMSOL software and through numerical simulations, it exhibits its capacity to trap polystyrene particles on a nano-scale. The results obtained from the research show that changes in different parameters such as the wavelength used, the radius of the trapped particle, and the refractive index of the medium used, lead to changes in the trapping force. The increase in the refractive index of the environment and the dimensions of the particles causes a significant increase in the applied force, especially in short wavelengths, the problem is more visible. These findings show that the proposed plasmonic structure has a very high trapping force, and this has the ability to significantly improve compared to previous researches. These advances in the field of biotechnology not only allow for more accurate and effective manipulation of nanoscale particles, but also facilitate the creation of new technologies in the field of medicine and other biological sciences. These developments will directly and indirectly help to improve diagnostic and treatment systems.

**Keywords:** Optical fiber, Twin-core, Plasmonic, Tweezers, Trapping.

JCDSA, Vol. 2, No. 5, Spring 2024

Received: 2024-04-18

Online ISSN: 2981-1295

Accepted: 2024-06-10

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

Published: 2024-06-18

### CITATION

Fooladi, E., et. al., "Trapping polystyrene particles using plasmonic tweezers", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 2, No. 5, pp. 26-33, 2024.  
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 era of the plasmonic revolution, the use of nanoparticles in biotechnology has been recognized as a tool for scientific and technological innovations. Research studies have shown that the physical and chemical properties of nanoparticles are significantly influenced by particle size. Noble metals like silver and gold, when approaching the nanoscale, exhibit very strong absorption due to the oscillation of conduction band electrons between the nanoparticle surfaces, a phenomenon known as surface plasmon resonance. The remarkable optical properties created by gold nanoparticles have historically been used for decorating church windows and ornamental items, as seen in ancient objects like the Lycurgus Cup, which displays dichroism based on whether light shines from the front or the back. The color filtering effect caused by light scattering and absorption by nanoparticles is significant and clearly observable in the visible wavelength range.

### Governing Theory

The optical tweezer with a dual-core fiber includes a single-mode fiber, a Mach-Zehnder interferometer, and a dual-core fiber as the main components of the study, using gold and air as the core and cladding to enhance particle trapping. The image of this setup is like a Mach-Zehnder interferometer with square function. The reason for choosing a conical structure is due to the convergence of light beams and the creation of a high gradient intensity at the tip of the optical tweezer, as well as the increase in trapping force at the tip of the plasmonic tweezer.

### Simulation

In this section, the design and simulation of a dual-core plasmonic optical tweezer in the COMSOL environment are presented. Additionally, the behavior, gradient forces, and scattering forces are precisely calculated and analyzed. The use of plasmonic metallic nanostructures with localized surface plasmon resonance (LSPR) indicates significant achievements in particle trapping. The strong and focused fields, especially in metallic nanostructures with LSPR, can effectively act as nanoantennas. In this research, a conical dual-core plasmonic optical tweezer is designed and simulated to trap nanoparticles. The primary objective of this study is to enhance the optical gradient force in the system. To achieve this goal, the light field distribution from the tip of the conical fiber is calculated using the finite element method, and the electric field intensity and the system's gradient force are accurately examined and evaluated. This research is fundamentally focused on the development of optical technologies to improve the efficiency of trapping and controlling nanoparticles. The simulation of the structure is performed using COMSOL software

### Structure Design

The design is based square equation. The structure was designed in the COMSOL software, with a port placed at the left input of the structure and a port at the output to measure the power transfer from the input to the output of the structure. Since the structure and excitation mode are TM mode, the port settings are configured for TM mode, and the wavelength is varied from 1 to 2 micrometers to analyze the results.

### Results

In this study, the effect of particle size on the trapping forces in the plasmonic tweezers system was carefully examined. The results showed that with the increase in particle size, the calculated force in the x-direction also increases. This change in forces indicates the significant role that particle size plays in increasing or decreasing the trapping forces. Interestingly, with a several-fold increase in particle radius, it was observed that the amount of trapping force decreases. This change in force behavior shows that with an increase in particle size, the required laser power also decreases. Specifically, larger particles require more laser power. Consequently, the conducted studies emphasize that the physical properties of particles play an important role in the optical trapping phenomenon of this system, and this information can be used as a powerful tool to improve the performance of light-based technologies and their various applications. The proposed structure in this study has been able to create a considerable force for particles with a size of 10 nanometers. This is related to the resonance of surface plasmons and indicates the structure's ability in optical trapping and manipulation of nanoparticles. In general, this study clearly states that changes in particle properties and the optical properties of the environment have a direct impact on the trapping forces in the plasmonic tweezers system, and this knowledge is valuable for improving optical technologies and their various applications.

### Conclusion

Surface plasmon polaritons are excited by surface electrons at the interface between a metal and a dielectric. Due to their mechanical capabilities at scales much smaller than the wavelengths of ordinary light, they have found numerous applications in nanophotonics. This article examines the significant applications of these polaritons in optically trapping dielectric nanoparticles using plasmonic optical tweezers. Plasmonic optical tweezers can create strong local fields at their tips and enhance optical fields, enabling the trapping of particles much smaller than the diffraction limit. This capability makes them a desirable option for producing plasmonic optical tweezers at the nanoscale. Plasmonic optical tweezers can trap smaller particles compared to conventional optical tweezers and make sub-diffraction limit trapping possible.





## به دام انداختن ذرات پلی استایرن با استفاده از انبرک پلاسمونیک

ابراهیم فولادی<sup>۱</sup>، مجتبی صادقی<sup>۲\*</sup>، زهرا عادل پور<sup>۳</sup>، فرهاد بهادری جهرمی<sup>۳</sup>

۱- گروه مهندسی برق، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران (fooladi57@yahoo.com, bahadori.fr@gmail.com)

۲- گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران (sadeghi@unam.bilkent.edu.tr, adelpour@aut.ac.ir)

**چکیده:** این تحقیق به تحلیل و بررسی استفاده از انبرک های پلاسمونیک در زمینه بیوتکنولوژی با تمرکز بر روی یک انبرک فیبرنوری دو هسته ای پلاسمونیک متمایل می پردازد. این انبرک با استفاده از نرم افزار کامسول طراحی و مدل سازی شده و توسط شبیه سازی های عددی، ظرفیت خود در به دام اندازی ذرات پلی استایرن در مقیاس نانو را به معرض نمایش می گذارد. نتایج به دست آمده از تحقیق نشان می دهد که تغییرات در پارامترهای مختلف هم چون طول موج مورد استفاده، شعاع ذره به دام افتاده، و ضریب شکست محیط مورد استفاده، به تغییر در نیروی به دام انداز منجر می شود. افزایش ضریب شکست محیط و ابعاد ذرات باعث افزایش چشم گیر در نیروی اعمالی می گردد، به ویژه در طول موج های کوتاه این مسئله نمایان تر است. این یافته ها نشان می دهد که ساختار پلاسمونیک پیشنهادی دارای نیروی به دام انداز بسیار بالاست و این امر قابلیت ارتقاء محسوسی نسبت به تحقیقات قبلی را داراست. این پیشرفت ها در زمینه بیوتکنولوژی نه تنها امکان دستکاری دقیق تر و اثربخش تر ذرات در مقیاس نانو را ایجاد می نمایند، بلکه ایجاد فناوری های نوین در حوزه پزشکی و دیگر علوم زیستی را تسهیل می دهند. این پیشرفت ها به طور مستقیم و غیر مستقیم به بهبود سیستم های تشخیصی و درمانی نیز کمک خواهند کرد.

**واژه های کلیدی:** فیبر نوری، دو هسته ای، پلاسمونیک، انبرک، به دام اندازی.

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۱

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۳۰

فشار تابشی و نیروی تابشی، که از معادلات ماکسول<sup>۲</sup> ناشی می شوند، همراه با برهم کنش نور و دیپول های القایی درون ذره، منبع لازم برای به دام اندازی ذرات کوچک را فراهم می آورند؛ که به آن ها "انبرک نوری"<sup>۳</sup> می گویند. تحقیقات در این زمینه از زمانی که توسط اشکین و همکارانش [۱۰] در سال ۱۹۷۰ تحقق یافت، پیشرفت شگفت انگیزی کرده است. امروزه انبرک های نوری، ابزاری بسیار کاربردی در زمینه های علوم پزشکی و زیستی هستند، که برای دستکاری مواد زیستی در مقیاس های کوچک، چون سلول ها [۱۱]، باکتری ها [۱۲] و DNA های کروی [۱۳،۴] به کار می روند. دستاوردهای اخیر در این حوزه نیاز به کنترل دقیق تر ذرات زیستی کوچک تر را نشان می دهد، که این به دام انداختن، در مقیاس های نانومتری بسیار دشوارتر است؛ عمدتاً به دلیل کاهش نیروی تابشی نسبت به حرارت تصادفی و براونی حرکت کرده اند. تله اندازی با استفاده از نانوساختارهای پلاسمونی، بدون نیاز به تجهیزات اپتیکی پیچیده انجام می شود. این روش، برای کاربردهای آزمایشگاهی روی تراشه و در سیستم های میکروفلوئیدی، به صورت ساده و مؤثر مورد استفاده قرار می گیرد. این تحقیقات نخستین بار بر روی پلاسمون سطحی برای تله اندازی ذرات با استفاده از فصل مشترک

### ۱- مقدمه

در عصر انقلاب پلاسمونیک، استفاده از نانوذرات در بیوتکنولوژی به عنوان ابزاری برای ایجاد نوآوری های علمی و فناوری شناخته شده است. مطالعات تحقیقاتی نشان داده اند که خواص فیزیکی و شیمیایی نانوذرات به طور چشم گیری تحت تأثیر اندازه ذره قرار دارند [۱]. فلزات نجیب مانند نقره و طلا با نزدیک شدن به مقیاس نانو، نشان دهنده جذب بسیار قوی ناشی از نوسان الکترون های باند هدایت بین سطوح نانوذرات هستند؛ که این پدیده به عنوان جذب پلاسمون سطحی شناخته می شود [۲-۴]. ویژگی های نوری چشم گیری که توسط نانوذرات طلا ایجاد می شود، از دوران گذشته استفاده هایی هم چون تزئین پنجره های کلیساها یا وسایل تزئینی داشته اند و در اشیاء باستانی مانند جام لیکرگوس مشاهده شده اند؛ که این پدیده دو رنگی را بر اساس تابش نور از جلو یا پشت ایجاد می کند [۵]. اثر صافی سازی رنگی [۶] ناشی از پراکنده سازی و جذب نور توسط نانوذرات، بسیار حائز اهمیت است و به وضوح در محدوده طول موج مرئی قابل مشاهده است [۷-۹].

\* نویسنده مسئول

<sup>2</sup> Maxwell equations

<sup>3</sup> optical tweezer

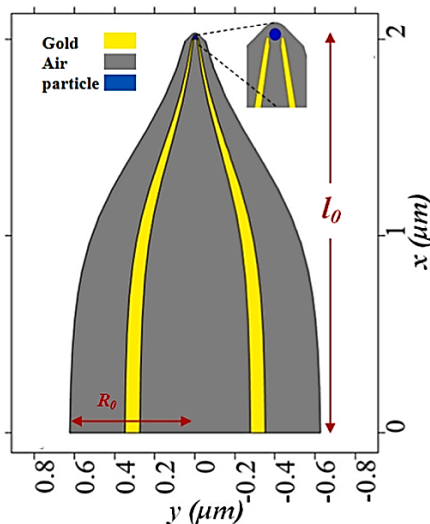


تصویر این انبرک در شکل (۱) نمایش داده شده است. دلیل انتخاب ساختار مخروطی به علت همگرایی پرتوهای نوری و ایجاد شدت گراپیان بالا در نوک انبرک نوری و همچنین افزایش نیروی تله گذاری در نوک انبرک پلاسمونی می باشد. شرح کامل مشخصات و مقدار در نظر گرفته شده برای هر پارامتر در جدول (۱) نشان داده شده است. قطر هر هسته  $0.37 \mu\text{m}$  میکرومتر تعیین شده است. یک کره پلی استایرن با قطر  $5 \mu\text{m}$  نانومتر و ضریب شکست  $1.49$  به عنوان ذره ای که به رنگ آبی در شکل (۱) نشان داده شده است، در نظر گرفته شده است. ثابت دی الکتریک طلا از طریق مدل درود-لورنتس در نظر گرفته شده است که طبق (۲) است.

$$\varepsilon(\omega) = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}\right) \quad (2)$$

که در آن  $\varepsilon_{\infty}$  نفوذپذیری نسبی در فرکانس بی نهایت است. همچنین،  $\omega_p$  و  $\gamma$  به ترتیب فرکانس پلاسمای حجمی و فرکانس میرایی نوسانات هستند. با در نظر گرفتن مد انتشار TM در بیرون ساختار به دلیل اثر پلاسمونیک آن، نیروی فشار تابشی محوری (جهت  $y$ ) و عرضی (جهت  $x$ ) برای کره میکروسکوپی با روابط زیر محاسبه می شود [۳۲].

$$F_x = \frac{1}{2} \int_S \left[ -\frac{1}{2} \left( \mu\mu_0 |H_z|^2 + \varepsilon_0 \varepsilon_1 |E_y|^2 - \varepsilon_0 \varepsilon_1 |E_x|^2 \right) dy + \mu\mu_0 \operatorname{Re}(E_y E_x^*) dx \right] \quad (3)$$



شکل (۱): نمای برش مقطعی فیبر دو هسته ای پیشنهادی

جدول (۱): پارامترهای مربوط به فیبر مخروطی مطابق معادله (۱).

پارامتر	توصیف	مقدار (میکرون)
$R_0$	شعاع فیبر دو هسته ای	۰/۶۲۵
$r_0$	شعاع میکرو لنز نیم کره ای	۰/۲۵
$l_0$	طول فیبر مخروطی	۲/۰۱۵
$L$	ضریب ثابت	۲/۸۸

آب/طلا انجام شده است، که در سال ۲۰۰۶ تله اندازی ذرات دی الکتریک میکرومتری در سطح طلا با برانگیختن پلاسمون های سطحی گزارش شده است [۱۷-۱۵].

در زمینه تله اندازی با استفاده از نانوساختار های پلاسمونی روش های مختلفی به کار گرفته شده است. آنتن های پلاسمونی، یکی از این روش هاست. آنتن ها معمولاً از دو استوانه یکسان تشکیل شده اند که توسط یک شکاف دی الکتریک نانومتری از هم جدا شده اند. وقتی که میدان تابشی در راستای اتصال دو ذره قطبی می شود، اثرات خازنی باعث جایگزیده شدن نور و افزایش شدت آن در ناحیه شکاف می شود [۱۸ و ۱۹]. در روش مجتمع سازی تله های پلاسمونی در ساختار میکروشاره که برای اولین بار در سال ۲۰۰۹ معرفی شده است، از یک تراشه میکروشاره پلاسمونی سه لایه برای تله اندازی ذرات کره ای از جنس پلی استایرن و سلول های مخمر استفاده شده است [۲۰]. همچنین در سال ۲۰۰۹ با استفاده از پلاسمون پلاریتون های سطحی و هم پوشانی میدان نزدیک ذرات طلا و لایه طلا، افزایش قابل ملاحظه ای در نیروهای نوری گزارش شد. در این ساختار نور تحت بازتابش کلی با طول موج  $980 \text{ nm}$  نانومتر با زوایای مختلف، به فصل مشترک شیشه و طلا به ضخامت  $55 \text{ nm}$  نانومتر برخورد می کند. ذرات طلا به قطر  $250 \text{ nm}$  نانومتر در آب بالای لایه طلا قرار داده می شوند [۲۱]. روش دیگر استفاده از نانو روزنه ها به منظور به دام انداختن است [۲۲-۳۱]. در میان ساختار نانو روزنه های پلاسمونی، اخیراً ساختار جفت نانوحفره ها پیشنهاد شده که با بهره گیری از اثر SIBA نتایج نویدبخش و گسترده ای را در کنترل و مطالعه نانوکره های سیلیکا<sup>۲</sup> [۲۲]، تک پروتئین<sup>۳</sup> [۲۳]، چگالی حجمی از نانوذرات [۲۴]، پیوند پروتئین [۲۵، ۲۶] و شدت صلبیت تله [۲۷]، نوسان رامان<sup>۴</sup> یک نانوذره [۲۸]، مولکول های فلورسنس<sup>۵</sup> [۲۹]، مشخصه خطوط استوکس [۳۰] و نانوذرات سوپر مگنتیک [۳۱] تاکنون عرضه داشته است.

در این مقاله، ما بر تحقیق خود در زمینه انبرک های نوری پلاسمونی می پردازیم، که برای به دام انداختن و دست کاری نانوذرات پلی استایرن در محیط های مختلف به کار برده می شود. این دست کاری برای طیف وسیعی از کاربردها از جمله پزشکی، بیوتکنولوژی و الکترونیک قابل استفاده است. از پلاسمون های سطحی ناشی از فلزات نجیب مانند طلا استفاده می کنیم.

## ۲- تئوری حاکم

انبرک نوری با فیبر دو هسته ای شامل یک فیبر حالت تک، تداخل سنج ماخ زندر و فیبر دو هسته ای به عنوان بخش اصلی مطالعه است که برای تقویت دام ذرات، از طلا و هوا به عنوان هسته و پوشش استفاده می کند.

$$R(z) = \begin{cases} \frac{1}{2}(R_0 - r_0) - \frac{1}{2}(R_0 - r_0) \left\{ \frac{\tanh[V(Z - \frac{l_0}{2})]}{\tanh(V\frac{l_0}{2})} \right\}, 0 < Z < (l_0 - r_0) \\ \sqrt{r_0^2 - (Z - l_0)^2}, l_0 - r_0 < Z < l_0 \end{cases} \quad (1)$$

<sup>4</sup> Raman oscillation

<sup>5</sup> Fluorescent

<sup>1</sup> Plasmon-polariton

<sup>2</sup> Silica

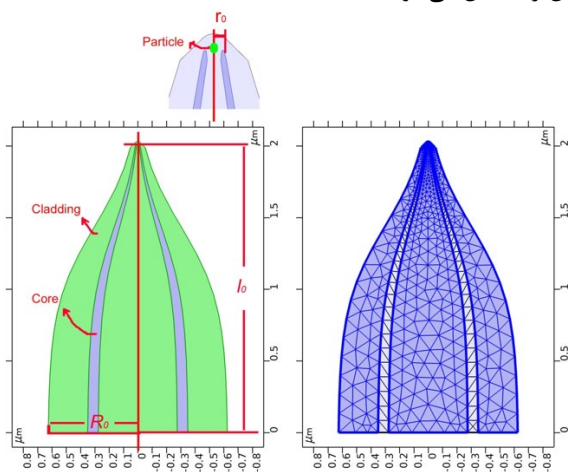
<sup>3</sup> Single protein



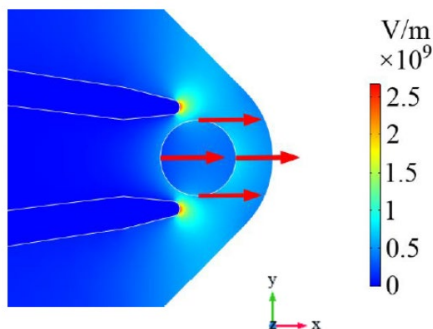


سطحی است. با این حال، با افزایش شعاع ذرات، نیروی تله کاهش می‌یابد و ذرات بزرگ‌تر به توان لیزر بیش‌تری نیاز دارند. بیش‌ترین مقدار نیرو در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر به‌دست آمده است.

تحلیل و مقایسه گسترده‌تری بر روی نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته است که نتایج آن در شکل‌های (۵-۱۰) قابل مشاهده است. حالتی را در نظر گرفتیم که ذره پلی‌استایرنی در محیط آب با ضریب شکست ۱/۳۳ حرکت می‌کند. همچنین این حالت را با سه محیط دیگر با ضرایب شکست ۱/۳۵، ۱/۳۷ و ۱/۳۹ مقایسه کردیم. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، نشان می‌دهد که نیروی تله در محیط‌هایی با ضرایب شکست بالاتر، چندین برابر نسبت به محیط خلاء (ضریب شکست ۱) افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، افزایش ضریب شکست محیط به افزایش نیروی تله در انبرک پلاسمونی منجر می‌شود. در این مطالعه، تأثیر اندازه ذرات بر نیروهای تله در سیستم انبرک پلاسمونی به دقت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با افزایش اندازه ذرات، نیروی محاسبه شده در جهت  $x$  نیز افزایش می‌یابد. این تغییر در نیروها نشان‌دهنده نقش بسیار حائز اهمیتی است که اندازه ذرات در افزایش یا کاهش نیروهای تله ایفا می‌کند. با افزایش چند برابری شعاع ذرات، جالب است که مشاهده شد، مقدار نیروی تله کاهش می‌یابد. این تغییر در رفتار نیروها نشان می‌دهد که با افزایش اندازه ذرات، توان لیزر مورد نیاز نیز کاهش می‌یابد. به طور خاص، در ذرات با شعاع بزرگ‌تر، نیاز به توان لیزر بیش‌تری حس می‌شود.



شکل (۲): (الف) هندسه و پارامترهای انبرک نوری پلاسمونیک دو هسته‌ای مخروطی طراحی شده؛ (ب) مش‌بندی ساختار مدل-سازی شده در کامسول



شکل (۳): توزیع میدان الکتریکی در موجبر

$$F_y = \frac{1}{2} \oint_S \left[ -\frac{1}{2} \left( \mu\mu_0 |H_z|^2 + \varepsilon_0 \varepsilon_1 |E_x|^2 - \varepsilon_0 \varepsilon_1 |E_y|^2 \right) dx \right. \\ \left. + \mu\mu_0 \operatorname{Re}(E_y E_x^*) dx \right] \quad (۴)$$

در (۴)،  $S$  حد فاصل (کانتوری) است که سطح مقطع کره را در صفحه  $xOy$  می‌پوشاند.

### ۳- شبیه‌سازی

در این بخش، به طراحی و شبیه‌سازی یک انبرک فیبر نوری دو هسته‌ای پلاسمونیک در محیط کامسول پرداخته می‌شود. علاوه بر این، رفتار، نیروهای گرادیان و پراکندگی نیز به دقت محاسبه و مورد بررسی قرار می‌گیرند. بهره‌مندی از نانو ساختارهای فلزی پلاسمونیک با تشدید پلاسمون سطحی موضعی (LSPR) نشان‌دهنده دستاوردهای مهم در به دام انداختن ذرات است. میدان‌های قوی و متمرکز، به‌ویژه در نانو ساختارهای فلزی با LSPR، می‌توانند به‌عنوان نانوآنتن‌ها مؤثر عمل کنند. در این تحقیق، یک انبرک نوری فیبر دو هسته‌ای مخروطی پلاسمونیک به منظور به دام انداختن نانو ذرات طراحی و شبیه‌سازی شده است. هدف اصلی این پژوهش، بهبود نیروی گرادیان نوری در سیستم می‌باشد. برای دست‌یابی به این هدف، توزیع میدان نوری از نوک فیبر مخروطی با استفاده از روش المان محدود محاسبه شده و شدت میدان الکتریکی و نیروی گرادیان سیستم با دقت مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند. این تحقیق اساساً به توسعه فناوری‌های نوری جهت بهبود کارایی در به دام انداختن و کنترل نانو ذرات معطوف شده است. شبیه‌سازی ساختار با استفاده از نرم افزار کامسول صورت گرفته است که در شکل (۲) قابل مشاهده است.

### ۴- طراحی ساختار

طراحی بر اساس (۲) صورت گرفته و ساختار در نرم افزار کامسول طبق شکل (۲) طراحی شده است. با قرار دادن یک پورت در ورودی سمت چپ ساختار و یک پورت در خروجی ساختار، بررسی می‌شود چه توانی از ورودی به خروجی ساختار انتقال پیدا می‌کند. از آنجاکه ساختار و تحریک مد TM هست، تنظیمات پورت‌ها روی مد TM قرار داده و طول موج را ۱ تا ۲ میکرومتر تغییر داده و نتایج را بررسی می‌کنیم.

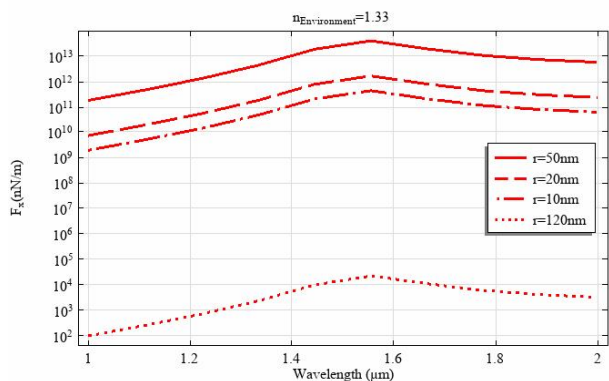
### ۵- نتایج

شکل (۳) توزیع میدان الکتریکی در موجبر را نشان می‌دهد. در مطالعه برای تعیین تأثیر ضریب شکست محیط‌های مختلف بر نیروی تله نوری، مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی با ضرایب شکست ۱/۳۳ (آب)، ۱/۳۵، ۱/۳۷ و ۱/۳۹ با حالتی که ذره در خلاء (ضریب شکست ۱) قرار دارد انجام شد. مشاهده شد که نیروی تله در محیط‌هایی با ضریب شکست بالاتر به مراتب بیش‌تر از خلاء است و با افزایش ضریب شکست محیط، نیروی تله افزایش می‌یابد. نیروی بیش‌تری در جهت  $x$  برای ذرات بزرگ‌تر به‌دست آمد. ساختار پیشنهادی قادر است نیروی قابل ملاحظه‌ای بر ذرات ۱۰ نانومتری وارد کند، که این مرتبط با تشدید پلاسمون‌های

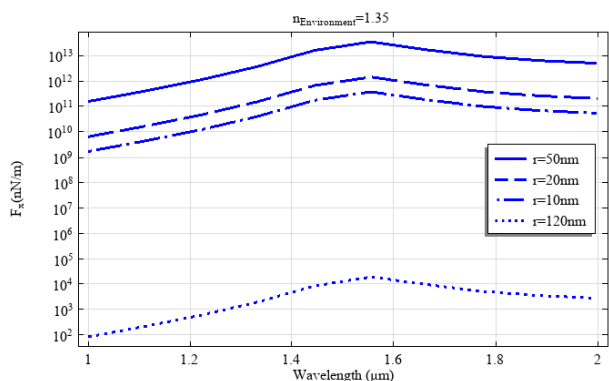


## ۶- نتیجه گیری

پلاریتون‌های پلاسمون سطحی برانگیخته شده از الکترون‌های سطحی در مرز بین فلز و دی‌الکتریک می‌باشند که به دلیل توانایی‌های مکانیکی در مقیاس‌های خیلی کوچک‌تر از طول موج‌های نور معمول، کاربردهای متعددی در نانو فوتونیک پیدا کرده‌اند. در این مقاله، کاربردهای مهم این پلاریتون‌ها در دام انداختن نوری نانو ذرات دی‌الکتریک به وسیله‌ی انبرک‌های نوری پلاسمونی بررسی می‌گردد. انبرک‌های نوری پلاسمونی قادر به ایجاد میدان‌های محلی قوی در نوک خود و افزایش میدان‌های نوری هستند، که این امکان را فراهم می‌کند تا ذرات بسیار ریزتر از حد پراش به دام بیفتند، این قابلیت را به یک گزینه مطلوب برای تولید انبرک‌های نوری پلاسمونی در نانو‌ها تبدیل می‌کند. انبرک‌های نوری پلاسمونی می‌توانند ذرات کوچک‌تری را نسبت به انبرک‌های نوری معمول دام کنند و دام‌اندازی در ابعاد زیر حد پراش را ممکن سازند.

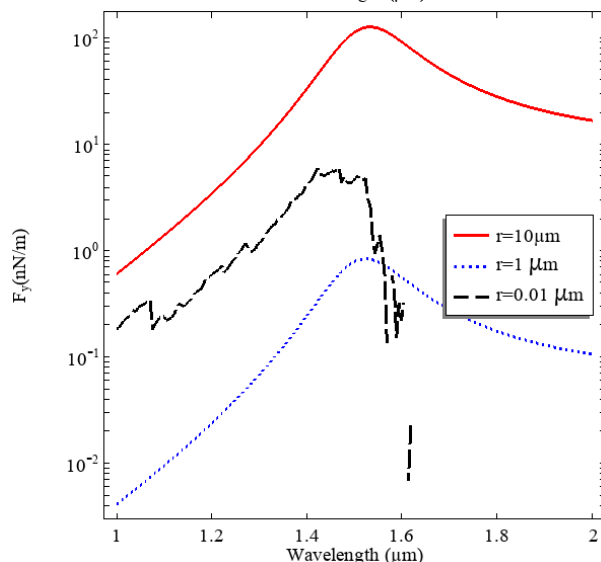
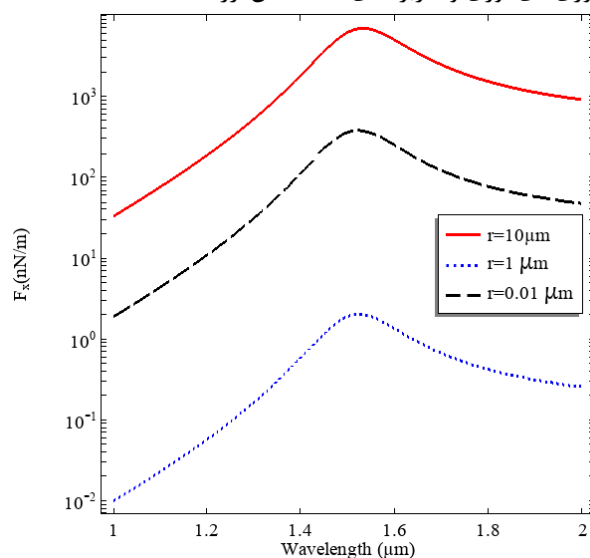


شکل (۵): تغییرات نیروهای تله انداز در یک محیط آبی (ضرب شکست ۱/۳۳) برحسب طول موج در راستای  $x$  به ازای شعاع‌های مختلف ذرات پلی‌استایرن و در طول موج ۱ تا ۲ میکرومتر.

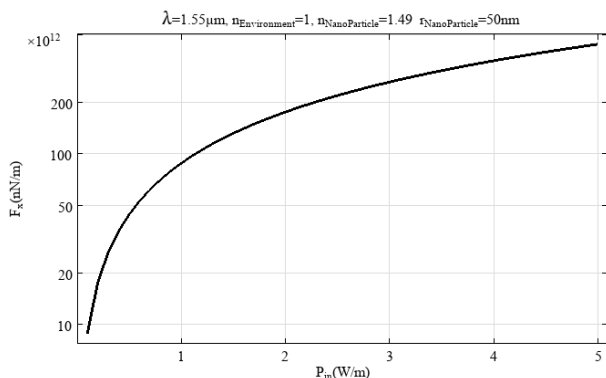


شکل (۶): تغییرات نیروهای تله انداز در یک محیط با ضریب شکست ۱/۳۵ برحسب طول موج در راستای  $x$  به ازای شعاع‌های مختلف ذرات پلی‌استایرن و در طول موج ۱ تا ۲ میکرومتر.

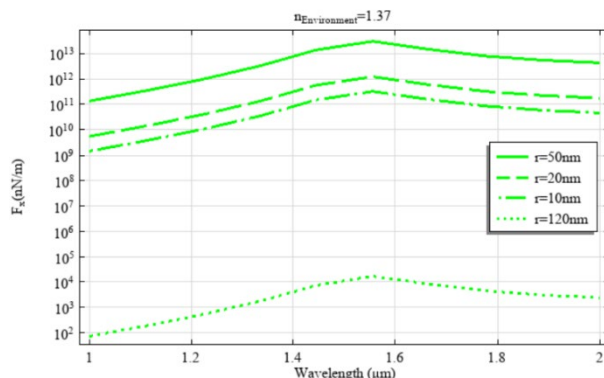
در نتیجه، مطالعات تأکید دارند که خصوصیات فیزیکی ذرات نقش مهمی در پدیده تله نوری این سیستم دارند و این اطلاعات به عنوان یک ابزار قدرتمند می‌توانند در بهبود عملکرد فناوری‌های مبتنی بر نور و کاربردهای مختلف آن مورد استفاده قرار گیرند. ساختار پیشنهادی در این تحقیق، توانسته است مقدار نیروی قابل قبولی را برای ذرات با اندازه ۱۰ نانومتر ایجاد کند. این امر به تشدید پلاسمون‌های سطحی مربوط است و نشان‌دهنده توانایی ساختار در تله نوری و دستکاری نانو ذرات می‌باشد. به طور کلی، این تحقیق به روشنی اظهار می‌کند که تغییرات در خصوصیات ذرات و خصوصیات اپتیکی محیط، تأثیر مستقیمی بر نیروهای تله در سیستم انبرک پلاسمونیک دارد و این دانش، برای بهبود فناوری‌های نوری و کاربردهای مختلف آن ارزشمند است.



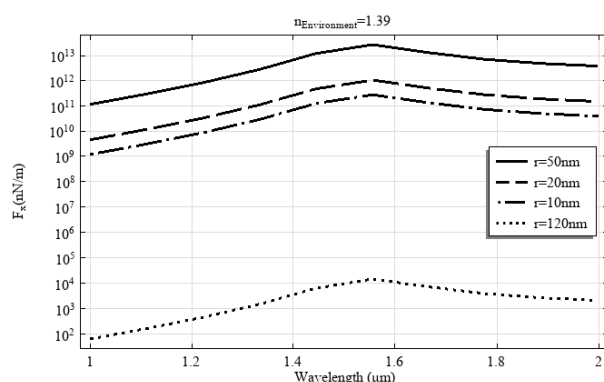
شکل (۴): نیروهای به دام‌اندازی پلی‌استایرن به وسیله انبرک مخروطی پلاسمونیک طراحی شده (الف) در راستای محوری ( $x$ ) و (ب) در راستای عرضی ( $y$ ).



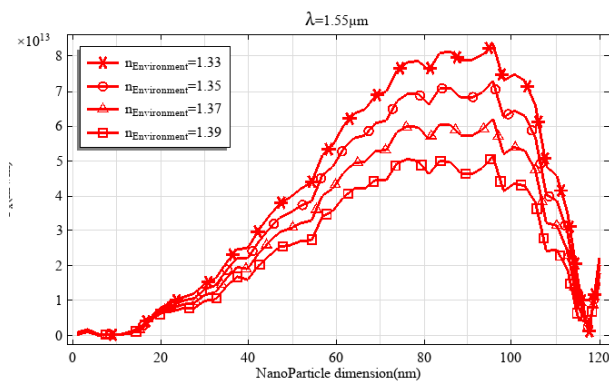
شکل (۶): تغییرات نیروهای تله‌انداز در محیط خلاء (ضریب شکست ۱) برای یک ذره پلی‌استایرن با شعاع ۵۰ نانومتر و ضریب شکست ۱/۴۹ و در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر در راستای  $x$  و در توان‌های کمتر از ۱ وات تا ۵ وات.



شکل (۷): تغییرات نیروهای تله‌انداز در یک محیط با ضریب شکست ۱/۳۷ برحسب طول موج در راستای  $x$  به ازای شعاع‌های مختلف ذرات پلی‌استایرن و در طول موج ۱ تا ۲ میکرومتر.



شکل (۸): تغییرات نیروهای تله‌انداز در یک محیط با ضریب شکست ۱/۳۹ برحسب طول موج در راستای  $x$  به ازای شعاع‌های مختلف ذرات پلی‌استایرن و در طول موج ۱ تا ۲ میکرومتر.



شکل (۹): تغییرات نیروهای تله‌انداز در محیط‌های با ضریب شکست ۱/۳۳ و ۱/۳۵ و ۱/۳۷ و ۱/۳۹ برحسب ابعاد ذرات پلی‌استایرن و در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر در راستای  $x$  به ازای شعاع‌های مختلف ذرات پلی‌استایرن.

## مراجع:

- [1] K. L. Kelly, E. Coronado, L. L. Zhao, and G. C. Schatz, "The Optical Properties of Metal Nanoparticles: The Influence of Size, Shape, and Dielectric Environment," *ChemInform*, vol. 34, no. 16, Apr. 2003, doi: <https://doi.org/10.1002/chin.200316243>.
- [2] P. B. Johnson and R. W. Christy, "Optical Constants of the Noble Metals," *Physical Review B*, vol. 6, no. 12, pp. 4370–4379, Dec. 1972, doi: <https://doi.org/10.1103/physrevb.6.4370>.
- [3] P. K. Jain, X. Huang, I. H. El-Sayed, and M. A. El-Sayed, "Noble Metals on the Nanoscale: Optical and Photothermal Properties and Some Applications in Imaging, Sensing, Biology, and Medicine," *Accounts of Chemical Research*, vol. 41, no. 12, pp. 1578–1586, Dec. 2008, doi: <https://doi.org/10.1021/ar7002804>.
- [4] S. Link, Z. L. Wang, and M. A. El-Sayed, "Alloy Formation of Gold–Silver Nanoparticles and the Dependence of the Plasmon Absorption on Their Composition," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 103, no. 18, pp. 3529–3533, May 1999, doi: <https://doi.org/10.1021/jp990387w>.
- [5] I. Freestone, N. Meeks, M. Sax, and C. Higgett, "The Lycurgus Cup — A Roman nanotechnology," *Gold Bulletin*, vol. 40, no. 4, pp. 270–277, Dec. 2007, doi: <https://doi.org/10.1007/bf03215599>.
- [6] Yun Seon Do, Jung Ho Park, Bo Yeon Hwang, Sung Min Lee, Byeong Kwon Ju, and Kyung Cheol Choi, "Plasmonic Color Filter and its Fabrication for Large-Area Applications," *Advanced optical materials*, vol. 1, no. 2, pp. 133–138, Feb. 2013, doi: <https://doi.org/10.1002/adom.201200021>.
- [7] S. Yokogawa, S. P. Burgos, and H. A. Atwater, "Plasmonic Color Filters for CMOS Image Sensor Applications," *Nano Letters*, vol. 12, no. 8, pp. 4349–4354, Jul. 2012, doi: <https://doi.org/10.1021/nl302110z>.
- [8] K. A. Willets and R. P. Van Duyne, "Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy and Sensing," *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 58, no. 1, pp. 267–297, May 2007, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.physchem.58.032806.104607>.
- [9] E. Hutter and J. H. Fendler, "Exploitation of Localized Surface Plasmon Resonance," *Advanced Materials*, vol. 16, no. 19, pp. 1685–1706, Oct. 2004, doi: <https://doi.org/10.1002/adma.200400271>.



- trapping: dynamics and protein-antibody co-trapping”, vol. 13, no. 13, Jun. 2013, doi: 10.1039/C3LC00003F.
- [26] A. A. Al, A. Zehtabi-Oskuie, and R. Gordon, “Observing single protein binding by optical transmission through a double nanohole aperture in a metal film,” *Biomedical Optics Express*, vol. 4, no. 9, pp. 1504–1504, Aug. 2013, doi: <https://doi.org/10.1364/boe.4.001504>.
- [27] A. Kotnala and R. Gordon, “Quantification of High-Efficiency Trapping of Nanoparticles in a Double Nanohole Optical Tweezer,” *Nano Letters*, vol. 14, no. 2, pp. 853–856, Jan. 2014, doi: <https://doi.org/10.1021/nl404233z>.
- [28] S. Wheaton, R. M. Gelfand, and R. Gordon, “Probing the Raman-active acoustic vibrations of nanoparticles with extraordinary spectral resolution,” *Nature Photonics*, vol. 9, no. 1, pp. 68–72, Nov. 2014, doi: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.283>.
- [29] R. Regmi, A. A. Al Balushi, H. Rigneault, R. Gordon, and J. Wenger, “Nanoscale volume confinement and fluorescence enhancement with double nanohole aperture,” *Scientific Reports*, vol. 5, no. 1, Oct. 2015, doi: <https://doi.org/10.1038/srep15852>.
- [30] S. Jones, A. A. Al, and R. Gordon, “Raman spectroscopy of single nanoparticles in a double-nanohole optical tweezer system,” *Journal of optics*, vol. 17, no. 10, pp. 102001–102001, Sep. 2015, doi: <https://doi.org/10.1088/2040-8978/17/10/102001>.
- [31] H. Xu, S. Jones, B.-C. Choi, and R. Gordon, “Characterization of Individual Magnetic Nanoparticles in Solution by Double Nanohole Optical Tweezers,” *Nano letters*, vol. 16, no. 4, pp. 2639–2643, Mar. 2016, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b00288>.
- [32] U. Fano, “The Theory of Anomalous Diffraction Gratings and of Quasi-Stationary Waves on Metallic Surfaces (Sommerfeld’s Waves),” *Journal of the Optical Society of America*, vol. 31, no. 3, p. 213, Mar. 1941, doi: <https://doi.org/10.1364/josa.31.000213>.
- [10] A. Ashkin, “Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure,” *Physical Review Letters*, vol. 24, no. 4, pp. 156–159, Jan. 1970, doi: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.24.156>.
- [11] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, and T. Yamane, “Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams,” *Nature*, vol. 330, no. 6150, pp. 769–771, Dec. 1987, doi: <https://doi.org/10.1038/330769a0>.
- [12] A. Ashkin and J. Dziedzic, “Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria,” *Science*, vol. 235, no. 4795, pp. 1517–1520, Mar. 1987, doi: <https://doi.org/10.1126/science.3547653>.
- [13] S. B. Smith, Y. Cui, and C. Bustamante, “Overstretching B-DNA: The Elastic Response of Individual Double-Stranded and Single-Stranded DNA Molecules,” *Science*, vol. 271, no. 5250, pp. 795–799, Feb. 1996, doi: <https://doi.org/10.1126/science.271.5250.795>.
- [14] T. T. Perkins, “Optical traps for single molecule biophysics: a primer,” *Laser & Photonics Review*, vol. 3, no. 1–2, pp. 203–220, Feb. 2009, doi: <https://doi.org/10.1002/lpor.200810014>.
- [15] Veneranda Garcés-Chávez, Romain Quidant, P. J. Reece, Gonçal Badenes, L. Torner, and K. Dholakia, “Extended organization of colloidal microparticles by surface plasmon polariton excitation,” vol. 73, no. 8, Feb. 2006, doi: <https://doi.org/10.1103/physrevb.73.085417>.
- [16] M. Righini, A. S. Zelenina, C. Girard, and R. Quidant, “Parallel and selective trapping in a patterned plasmonic landscape,” *Nature Physics*, vol. 3, no. 7, pp. 477–480, May 2007, doi: <https://doi.org/10.1038/nphys624>.
- [17] M. Righini, G. Volpe, C. Girard, D. Petrov, and R. Quidant, “Surface Plasmon Optical Tweezers: Tunable Optical Manipulation in the Femtonewton Range,” *Physical Review Letters*, vol. 100, no. 18, May 2008, doi: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.100.186804>.
- [18] M. L. Juan, M. Righini, and R. Quidant, “Plasmon nano-optical tweezers,” *Nature Photonics*, vol. 5, no. 6, pp. 349–356, May 2011, doi: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.56>.
- [19] M. Righini, P. Ghenuche, S. Cherukulappurath, V. Myroshnychenko, F. J. García de Abajo, and R. Quidant, “Nano-optical Trapping of Rayleigh Particles and *Escherichia coli* Bacteria with Resonant Optical Antennas,” *Nano Letters*, vol. 9, no. 10, pp. 3387–3391, Jan. 2009, doi: <https://doi.org/10.1021/nl803677x>.
- [20] L. Huang, S. J. Maerkl, and O. J. F. Martin, “Integration of plasmonic trapping in a microfluidic environment,” *Optics Express*, vol. 17, no. 8, pp. 6018–6018, Mar. 2009, doi: <https://doi.org/10.1364/oe.17.006018>.
- [21] K. Wang, E. Schonbrun, and K. B. Crozier, “Propulsion of Gold Nanoparticles with Surface Plasmon Polaritons: Evidence of Enhanced Optical Force from Near-Field Coupling between Gold Particle and Gold Film,” *Nano Letters*, vol. 9, no. 7, pp. 2623–2629, Jun. 2009, doi: <https://doi.org/10.1021/nl900944y>.
- [22] Y. Pang and R. Gordon, “Optical Trapping of 12 nm Dielectric Spheres Using Double-Nanoholes in a Gold Film,” *Nano Letters*, vol. 11, no. 9, pp. 3763–3767, Aug. 2011, doi: <https://doi.org/10.1021/nl201807z>.
- [23] Y. Pang and R. Gordon, “Optical Trapping of a Single Protein,” *Nano Letters*, vol. 12, no. 1, pp. 402–406, Dec. 2011, doi: <https://doi.org/10.1021/nl203719v>.
- [24] A. Kotnala, D. DePaoli, and R. Gordon, “Sensing nanoparticles using a double nanohole optical trap,” *Lab on a Chip*, vol. 13, no. 20, p. 4142, 2013, doi: <https://doi.org/10.1039/c3lc50772f>.
- [25] A. Zehtabi-Oskuie, H. Jiang, B. R. Cyr, D. Rennehan, A. A. Al-Balushi and R. Gordon, “Double nanohole optical





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



## New neighborhood approaches in memetic algorithm for customer type discovery

Hamed Sherafat-Moula<sup>1</sup>, S.Hadi Yaghooby<sup>2\*</sup>, Razieh Malekhosseini<sup>3</sup>, Karamollah Bagherifard<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Computer Engineering, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran  
Young Researchers and Elite Club, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran

[h.sherafat.m@gmail.com](mailto:h.sherafat.m@gmail.com)

<sup>2</sup> Department of Computer Engineering, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran  
Young Researchers and Elite Club, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran

[yaghoobian.h@gmail.com](mailto:yaghoobian.h@gmail.com)

<sup>3</sup> Department of Computer Engineering, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran  
Young Researchers and Elite Club, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran

[malekhoseini.r@gmail.com](mailto:malekhoseini.r@gmail.com)

<sup>4</sup> Department of Computer Engineering, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran  
Young Researchers and Elite Club, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran

[ka.bagherifard@iau.ac.ir](mailto:ka.bagherifard@iau.ac.ir)

**Abstract:** "Revenue management" systems are extensively utilized across various industries today. One of the primary pillars of revenue management lies in demand estimation, which predicts the demand for products and services. Understanding customers and their preferences forms the cornerstone of demand estimation, and this understanding is acquired through solving the "customer type discovery" problem. Recently, this problem has been addressed using the "genetic" meta-heuristic method. In this research, we propose solving this problem utilizing the "memetic" meta-heuristic method, employing alternative approaches to identify the neighborhood. By evaluating real data from five hotels, we demonstrate that our method offers the first viable solution to the problem, resulting in a total of 10.5% fewer iterations compared to the "genetic" method.

**Keywords:** revenue management, meta-heuristic algorithms, genetic algorithm, memetic algorithm

JCDSA, Vol. 2, No. 5, Spring 2024

Received: 2024-02-02

Online ISSN: 2981-1295

Accepted: 2024-05-08

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

Published: 2024-06-15

### CITATION

Sherafat, M.H., et al., "New neighborhood approaches in memetic algorithm for customer type discovery", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 2, No. 5, pp. 34-44, 2024.

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

### 1- Introduction

Earnings management systems are in use in many industries. Maximum profit or revenue can be achieved using revenue management systems and this is a result of the deregulation of the US airline industry in 1978 [1]. Profit management helps in making important business decisions that directly affect the purchasing behavior of customers and consequently the business revenue.

Finding customer demand is known as "demand estimation" and this prediction describes which customers will come and which products they will buy [2-5]. The product offering decision is known as "bundle optimization" which considers what products should be available to customers in a specific time period [6-9]. Pricing strategy is a term used to refer to the procedure that determines dynamic pricing policies and their relationship to revenue management [10-12]. "Demand estimation" is one of the most important stages of the profit management process. At this stage, we should have a clear view of customers and their list of product preferences.

The amount of demand for each product in a period of time can be found by obtaining two main data "products available for sale" and "types of customers"; Therefore, demand estimation may directly depend on finding exact types of customers. As mentioned, finding exact customer types among all factorial types is classified as NP-hard problems [16]. Note that "Sales Transactions" and "Product Availability" over a period of time are the only available data in this problem, and customer types must be inferred from this data. The name of this problem is "discovery of customer type".

### 2- Methodology

The problem of "customer type discovery" is investigated with many mathematical approaches. Most of these researches use "choice-based demand estimation" models [16-18]. Recently, the idea of using meta-heuristics to find customer types was presented by Haj Mirzaei et al [19]. They presented a genetic algorithm to find suitable customer types from 5 real hotel datasets and solved the problem of customer type discovery.

Finding an acceptable solution using this approach is time-consuming and may not be suitable for some business applications that require immediate results. The use of "local search" algorithm can provide faster solutions, and the connection of "local search" and "genetic" algorithm can help for "faster convergence". The present research is an attempt to find the first acceptable solution to the customer type discovery problem with the least possible generation in meta-heuristic algorithm. The main idea of this will be through the use of "local search" with the genetic algorithm. In this research, different local search approaches will be presented, so that by using them in the local search of the memetic algorithm, we can obtain the first acceptable solution of the problem faster (by reducing the number of generations) compared to the genetic algorithm.

After entering the type of customer in a time period, the customer chooses the product with the highest rank from his list of preferences in that period. If the customer cannot buy a product, he chooses the zero product and leaves the market. The customer entry rate in each period is discrete and homogeneous with a probability of  $0 < \lambda < 1$ , which is considered the same in all periods. The term "consistency" is used because no one can truly tell which type of customer entered a period. Therefore, we can only find out which type of customer is compatible.

Evolutionary Algorithms (EA) are suitable for cases like customer type discovery problem. As mentioned in the literature review section, genetic algorithm has recently been able to perform better than mathematical approaches for problem solving. Pure evolutionary algorithms are more efficient in searching the problem space when combined with other techniques, such as local searches [25]-[27]. Therefore, the use of neighborhood makes it possible to use local search together with the genetic algorithm [19]. The memetic algorithm is a combination of genetic and memetic evolution We will use them in this research [28].

### 3- Results and discussion

For the evaluation, we will use the dataset of five Continental hotels located in the United States. This dataset mainly consists of travel information of people who have booked rooms for business purposes. This dataset is publicly available and used as a benchmark for the customer type discovery problem. The data span is from March 12, 2007 to April 15, 2007, which includes 34 days [23]. Reservations are made through various channels such as travel agencies, hotel operators, personal visits and hotel websites. To evaluate the efficiency of our local search approaches, we implemented the mentioned three approaches with the memetic algorithm and compared it with the genetic method [19].

For both approaches (memetic and genetic), we have created an initial random population with a number of 25. The test is to show the speed of convergence in the initial phase (convergence of the population from unacceptable solutions to acceptable solutions). In this test, when the first acceptable solution is created, we have prevented the algorithm from continuing. Each experiment was repeated 30 times and the average results were reported. The results can be seen in Table (2).

### 4- Conclusion

If we consider each customer type as a preferred list of products, discovering customer types is the first step in estimating product demand and one of the first steps in pricing strategy. If sales transactions and product availability data are used, finding customer types with meta-heuristic methods is challenging due to lack of data. In some applications, finding the first acceptable solution in a short time is more challenging than finding the optimal solution.





## رویکردهای همسایگی جدید در الگوریتم ممتیک برای یافتن نوع مشتری

حامد شرافت‌مولا<sup>۱</sup>، هادی یعقوبیان<sup>۲\*</sup>، راضیه ملک‌حسینی<sup>۳</sup>، کرم‌الله باقری‌فرد<sup>۴</sup>

۱- گروه مهندسی کامپیوتر، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران  
باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران  
h.sherafat.m@gmail.com

۲- گروه مهندسی کامپیوتر، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران  
باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران  
yaghoobian.h@gmail.com

۳- گروه مهندسی کامپیوتر، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران  
باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران  
malekhoseini.r@gmail.com

۴- گروه مهندسی کامپیوتر، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران  
باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران  
ka.bagherifard@iau.ac.ir

**چکیده:** سیستم‌های «مدیریت سود» امروزه به‌صورت فراوان در صنایع مختلفی استفاده می‌شوند. یکی از پایه‌های اصلی مدیریت سود، «برآورد تقاضا» است که بر اساس آن تقاضای محصولات و خدمات پیش‌بینی می‌شود. شناخت مشتریان و علایق آنها زیربنای برآورد تقاضاست و این شناخت با حل مسئله «کشف نوع مشتری» به‌دست می‌آید. به تازگی این مسئله با استفاده از روش فراابتکاری «ژنتیک» حل شده‌است و در این تحقیق با استفاده از رویکردهایی دیگر برای یافتن همسایگی، این مسئله را با روش فراابتکاری «ممتیک» حل خواهیم کرد. برای ارزیابی تحقیق خود، از داده‌های واقعی پنج هتل استفاده خواهیم کرد و در ادامه نشان می‌دهیم که روش پیشنهادی در مجموع با ۱۰.۵ درصد تعداد نسل کمتر نسبت به روش «ژنتیک» اولین راه‌حل قابل قبول مسئله را ارائه می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** مدیریت درآمد، الگوریتم‌های فراابتکاری، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ممتیک

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۹

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۳

### ۱- مقدمه

۱. تقاضای مشتریان برای محصولات؛  
۲. محصولاتی که ارائه می‌شوند؛  
۳. قیمت‌هایی که باید ارائه شوند.  
یافتن تقاضای مشتریان به‌عنوان «برآورد تقاضا<sup>۲</sup>» شناخته می‌شود و این پیش‌بینی توصیف می‌کند که چه مشتریانی خواهند آمد و کدام محصولات را خریداری خواهند کرد [۲-۵]. تصمیم «ارائه محصولات» به‌عنوان «بهینه‌سازی مجموعه‌ای<sup>۳</sup>» شناخته می‌شود که در نظر می‌گیرد چه محصولاتی باید در یک دوره زمانی خاص در دسترس مشتریان باشد [۶-۹]. استراتژی قیمت‌گذاری، اصطلاحی است که برای اشاره به رویه‌ای استفاده می‌شود که سیاست‌های قیمت‌گذاری پویا و

سیستم‌های «مدیریت سود<sup>۱</sup>» در صنایع زیادی در حال استفاده است. حداکثر سود یا درآمد را می‌توان با استفاده از سیستم‌های مدیریت درآمد به‌دست آورد و این امر حاصل مقررات‌زدایی صنعت هواپیمایی ایالات‌متحده در سال ۱۹۷۸ است [۱]. مدیریت سود به تصمیم‌گیری‌های مهمی در کسب‌وکار کمک می‌کند که مستقیماً بر رفتار خرید مشتریان تأثیر می‌گذارد و در نتیجه، بر درآمد کسب‌وکار تأثیر می‌گذارد. این تصمیمات را می‌توان در سه بخش، دسته‌بندی کرد:

<sup>3</sup> Assortment Optimization

<sup>1</sup> Revenue Management

<sup>2</sup> Demand Estimation



یافتن راه‌حل قابل قبول با استفاده از این رویکرد، زمان‌بر است و ممکن است برای برخی از برنامه‌های کاربردی تجاری که احتیاج فوری به نتیجه دارند، مناسب نباشد. استفاده از الگوریتم «جستجوی محلی<sup>۵</sup>» می‌تواند راه‌حل‌های سریعتری ارائه دهد و اتصال الگوریتم «جستجوی محلی» و «ژنتیک» می‌تواند برای «همگرایی سریعتر» کمک کند. تحقیق حاضر تلاشی برای یافتن اولین راه‌حل قابل قبول مسئله کشف نوع مشتری با کمترین نسل ممکن در الگوریتم فرا ابتکاری است. ایده اصلی این امر، به‌کارگیری «جستجوی محلی» با الگوریتم ژنتیک خواهد بود. در این تحقیق رویکردهای مختلف جستجوی محلی ارائه خواهد شد تا با استفاده از آن‌ها در جستجوی محلی الگوریتم ممتیک، بتوانیم اولین راه‌حل قابل قبول مسئله را سریع‌تر (از طریق کم کردن تعداد نسل‌های لازم) نسبت به الگوریتم ژنتیک به دست آورده شود.

در ادامه این تحقیق به پیشینه تحقیق پرداخته می‌شود. سپس مسئله «کشف نوع مشتری» مورد بررسی قرار خواهد گرفت و بعد از آن به نحوه حل مسئله با کمک الگوریتم ممتیک و بررسی رویکردهای جدید همسایگی اشاره می‌شود و در بخش بعدی، رویکردهای مدنظر مورد مقایسه قرار می‌گیرند و بخش نتیجه‌گیری پایان این تحقیق خواهد بود.

## ۲- ادبیات و پیشینه تحقیق

ون رایزین و ولکانو [۱۶] مدل برآورد تقاضای غیرپارامتریک کلی را برای پیدا کردن انواع مشتری از تراکنش‌های فروش و داده‌های در دسترس بودن محصول، پیشنهاد کردند که شامل سه مرحله اصلی است. مرحله اول این مدل از یک لیست محصول تکی برابر با تعداد محصولات برای حل اولیه رویکرد استفاده می‌کند. هر محصول تکی نشان دهنده یک نوع مشتری است که فقط یک محصول و صفر را شامل می‌شود. در مرحله دوم، نویسندگان از مدل تخمین تقاضا استفاده می‌کنند که بر اساس مدل تخمین، حداکثر احتمال برای ارزیابی برازندگی<sup>۶</sup> هر راه‌حل محاسبه می‌شود. در مرحله سوم، برنامه عدد صحیح مختلط<sup>۷</sup> (MIP) برای یافتن یک نوع مشتری جدید استفاده می‌شود که با اضافه کردن به آن، بهبود برازندگی راه‌حل فعلی را تضمین می‌کند. مراحل ۲ و ۳ تکرار می‌شوند تا زمانی که رویکرد نتواند انواع مشتریان جدیدی را که برازندگی راه‌حل را بهبود می‌بخشد شناسایی کند. همچنین آنها در سال ۲۰۱۷ سعی کردند با استفاده از حداکثرسازی انتظار<sup>۸</sup> (EM) و حل مسئله به صورت حداکثر احتمال، کارایی زمانی کار قبلی خود را بهبود بخشند [۱۷] و رویکرد آنها به عنوان حل مسئله کشف نوع مشتری در نظر گرفته شد. حاج‌میرزایی و همکاران [۱۹] از الگوریتم ژنتیک برای پیدا کردن انواع مشتری از ۵ مجموعه داده هتل استفاده کردند. نویسندگان از دو تابع برازندگی برای ارزیابی جمعیت استفاده کردند. تابع برازندگی اصلی، تابع حداکثر

ارتباط آن‌ها با مدیریت درآمد را تعیین می‌کند [۱۰-۱۲]. «برآورد تقاضا» یکی از مهم‌ترین مراحل فرایند مدیریت سود است. در این مرحله باید دید روشنی از مشتریان و لیست ترجیحات آن‌ها از محصولات داشته باشیم. در بازاری با  $n$  نوع محصول، هر «نوع مشتری» با فهرستی مرتب از محصولاتی که ترجیح می‌دهد خریداری کند، نشان داده می‌شود [۸، ۱۳-۱۵]. قابل ذکر است که هر مشتری می‌تواند کالایی را که در دسترس نیست (به دلیل عدم موجودی یا تغییر استراتژی فروش کسب) با کالایی که در دسترس است، جایگزین کند. چالش اصلی در این زمینه، تعداد بالقوه انواع مشتری است که با توجه به تعداد محصولات و در نظر گرفتن تعداد جایگزین برای محصولات به صورت فاکتوریل خواهد بود [۱۶-۱۷]. فرض کنید  $\{1,2,3\}$  محصول در کسب‌وکار وجود دارد و سه نوع مشتری  $C_1=\{1,2\}$ ،  $C_2=\{1\}$  و  $C_3=\{2,3\}$  در یک بازه زمانی وارد بازار می‌شوند. مشتری نوع  $C_1$  در ابتدا ترجیح می‌دهد که محصول ۱ را بخرد؛ اما اگر ۱ در دسترس نباشد، به جای آن محصول ۲ را خریداری می‌کند. نکته مهم این است که اگر هر دو محصول ۱ و ۲ در دسترس نباشد، او هیچ محصولی را خریداری نخواهد کرد و بازار را ترک خواهد کرد. «عدم خرید» با خرید محصول صفر (۰) نمایش داده می‌شود. اگر همه محصولات مدنظر نوع مشتری در دسترس نباشند، او ترجیح می‌دهد محصول صفر را خریداری کند. بنابراین، محصول صفر به انتهای هر نوع مشتری اضافه خواهد شد. روش صحیح نمایش انواع مشتریان به این صورت خواهد بود:  $C_1=\{1,2,0\}$ ،  $C_2=\{1,0\}$ ،  $C_3=\{2,3,0\}$ .

میزان تقاضا برای هر محصول در یک دوره زمانی را می‌توان با به دست آوردن دو داده اصلی «محصولات موجود برای فروش» و «انواع مشتری» پیدا کرد؛ بنابراین، برآورد تقاضا به طور مستقیم ممکن است به یافتن انواع دقیق مشتری بستگی داشته باشد. همان‌طور که گفته شد، یافتن انواع مشتریان دقیق در میان همه انواع که به صورت فاکتوریل است، در دسته مسائل NP-hard دسته‌بندی می‌شود [۱۶]. قابل توجه است که «تراکنش‌های فروش» و در «دسترس بودن محصول» در یک دوره زمانی، تنها داده‌های قابل دسترس در این مسئله هستند و انواع مشتریان باید از این داده‌ها استخراج شوند. نام این مسئله «کشف نوع مشتری»<sup>۱</sup> است. مسئله کشف نوع مشتری با رویکردهای ریاضی بسیاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. اکثر این پژوهش‌ها از مدل‌های «برآورد تقاضا مبتنی بر انتخاب»<sup>۲</sup> استفاده می‌کنند [۱۶-۱۸]. اخیراً ایده استفاده از روش فراابتکاری<sup>۳</sup> برای یافتن انواع مشتری توسط حاج‌میرزایی و همکاران ارائه شده است [۱۹]. آنها یک الگوریتم ژنتیک برای یافتن انواع مشتری مناسب از ۵ مجموعه داده هتل واقعی ارائه دادند و مسئله کشف نوع مشتری را حل کردند.

<sup>5</sup> Local Search

<sup>6</sup> Fitness

<sup>7</sup> Mixed-integer program

<sup>8</sup> Expectation maximization

<sup>1</sup> Customer Type

<sup>2</sup> Customer Type Discovery

<sup>3</sup> choice-based demand estimation

<sup>4</sup> Metaheuristics





چندین خرید می‌شود و روش آنها برای محصولاتی که فاسدپذیری دارند قابل استفاده نیست. همچنین در [۳۱]، با در نظر گرفتن اطلاعات نمونه، از تکنیک‌های خوشه‌بندی مانند K-means برای شناسایی بخش‌های مشتری متمایز استفاده کردند. این تکنیک‌ها اجازه می‌دهد که با گروه‌بندی مشتریان بر اساس ویژگی‌های مشترک، از جمله جنسیت، سن، علایق و عادات‌های خرج کردن، بر پلایه‌های کاربران بالقوه تمرکز کرد. آنها از پروفایل کاربر برای کار خود به استفاده کردند و کار آنها کارایی لازم را برای مجموعه داده‌هایی که داده‌های کمی دارند قابلیت استفاده ندارد. در [۳۲] بر نقش حیاتی تقسیم‌بندی مشتری در هدایت شخصی‌سازی، تبلیغات هدفمند و استراتژی‌های تبلیغاتی تأکید می‌کنند و روندهای ارزشمندی را هم به محققان ارائه می‌کنند. ادبیات موضوعی موجود در تحقیق آنها عمدتاً بر انواع تقسیم‌بندی منحصربه‌فرد، به‌ویژه تقسیم‌بندی رفتاری مبتنی بر پروفایل کاربر تکیه دارد که دید جامع نسبت به مشتری که متکی بر داده‌های خرید باشد را محدود می‌کند.

### ۳- شرح مسئله

این بخش، مسئله «کشف نوع مشتری» را توضیح می‌دهد. جهت راحتی خواننده از نماد و اصطلاحات [۱۹] استفاده می‌گردد. فرض کنید  $N = \{0, 1, \dots, n\}$  محصولات خریداری‌شده در بازه‌های زمانی  $t = \{1, 2, \dots, T\}$  توسط انواع مشتریان ناشناخته که در تلاش برای یافتن آن‌ها هستیم، هستند. انتخاب محصول صفر توسط مشتری به معنای خرید نکردن و خروج از بازار است. همانطور که قبلاً اشاره شد، هر نوع مشتری با لیست ترجیحی از محصولاتی که در آن محصول  $h$  بالاتر از  $z$  قرار دارد، نشان داده می‌شود  $C(j) < C(h)$ ؛ یعنی مشتری خرید محصول  $h$  را به  $z$  ترجیح می‌دهد. لیست محصولات ارائه‌شده در هر دوره زمانی  $S_t \in 0, N, \subseteq S_t$ ، که در آن  $|S_t| \geq 2$  است (محصول صفر و حداقل یک محصول دیگر) مشخص می‌شود. پس از ورود نوع مشتری در یک بازه زمانی، مشتری محصولی را با بالاترین رتبه از لیست ترجیحات خود در آن دوره انتخاب می‌کند. اگر مشتری نتواند محصولی را بخرد، محصول صفر را انتخاب کرده و بازار را ترک می‌کند. نرخ ورود مشتریان در هر دوره گسسته و همگن با احتمال  $0 < \lambda < 1$  است که در تمامی دوره‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شود. جدول (۱) نمونه‌ای از تراکنش‌های فروش و داده‌های در دسترس بودن محصول را پس از پیش‌پردازش مجموعه داده نشان می‌دهد. در این جدول ۵ دوره زمانی و ۵ محصول وجود دارد. در دوره ۱، سه محصول برای فروش در دسترس (موجود) است و محصول ۱ توسط مشتری خریداری شده است. در دوره ۲ محصولات ۱ و ۲ و ۵ موجود است و محصول ۵ خریداری می‌شود. فرض کنید سه نوع مشتری وارد بازار می‌شوند:  $C_1 = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ،  $C_2 = \{4, 5\}$  و  $C_3 = \{2\}$ . در دوره ۱، مشتری  $C_1$  در این دوره سازگار<sup>۴</sup> است، یعنی اگر  $C_1$  وارد این

احتمال است که مشابه MLE است که در [۱۶] برای راه‌حل‌های قابل قبول استفاده می‌شود. برای راه‌حل‌های غیرقابل قبول، نویسندگان از یک تابع برازندگی دیگری استفاده کردند. نویسندگان همچنین سعی کردند عملگرهای نمایش و بازتولید بهینه را برای کاربرد خود پیشنهاد کنند و توانستند دقت بهتری نسبت به روش ون رایزن داشته باشند. در [۲۰]، مدل تخمین تقاضای مبتنی بر انتخاب برای پیدا کردن انواع مشتری در سه مرحله استفاده می‌شود: (۱) ساخت نمودار غیر چرخه‌ای جهت‌دار برای هر نوع مشتری، (۲) خوشه‌بندی آن، و (۳) تخمین توزیع‌ها روی فهرست ترجیحی هر نوع مشتری. داده‌های مورد استفاده برای این منظور از نوع تابلویی<sup>۱</sup> هستند. در برخی بازارها، مانند بازارهای آنلاین و آن‌هایی که از برخی برنامه‌ها برای ثبت رفتار خرید مشتریان استفاده می‌کنند (برای مثال باشگاه وفاداری)، داده‌های موجود علاوه بر دقت، بسیار بیشتر از معاملات فروش و داده‌های موجود بودن محصول هستند. این نوع داده‌ها به داده‌های تابلویی معروفاند و برای مجموعه‌هایی با داده‌های کم، این رویکرد قابل استفاده نیست.

مدل «در نظر بگیرید؛ سپس انتخاب کنید» برای کشف انواع مشتری توسط جاگاباتولا و همکاران استفاده شد [۱۸]. برای هر نوع مشتری، یک مجموعه «در نظر گرفتن توسط مشتری» برای استفاده از روش یادگیری ماشینی مبتنی بر داده استفاده شد و برای کشف هر مجموعه «در نظر گرفتن» از داده‌های خرده‌فروشی اشتراکی خودرو و داده‌های در دسترس بودن محصول استفاده شد و رویکردشان برای مواردی که احتیاج به دست‌بندی مشتریان بر اساس مکان‌های جغرافیایی است مناسب خواهد بود. لی و یون [۲۱] رویکردی مبتنی بر مدل انتخاب برای یافتن انواع مشتریان ناهمگن با استفاده از داده‌های فروش و در دسترس بودن محصول پیشنهاد کردند. این رویکرد با اندازه ۱ آغاز می‌شود و سپس سعی می‌کند انواع مشتریان جدید را به این راه‌حل اضافه کند تا راه‌حل بهینه را ببیند. اندازه راه‌حل بهینه، تعداد انواع مشتری را با توجه به مجموعه داده استفاده‌شده تعیین می‌کند و از پیشینه‌سازی انتظارات<sup>۲</sup> برای تخمین پارامترهای مدل انتخابی استفاده می‌شود. حاج‌میرزایی و همکاران [۲۲] رویکردی برای کشف نوع مشتری را بر اساس مسئله سفارش خطی کلاسیک پیشنهاد کردند که از سه بخش تشکیل شده است. بخش ۱ یک راه‌حل اولیه ایجاد می‌کند. بخش ۲ احتمال هر نوع مشتری (PMF) را تخمین می‌زند. در نهایت، بخش ۳ مشتری جدیدی پیدا می‌کند. بخش‌های ۲ و ۳ تا رسیدن به معیارهای توقف تکرار می‌شوند.

در [۳۰] به وظیفه چالش برانگیز افزایش رشد بازاریابی دیجیتال از طریق توسعه یک رویکرد تقسیم‌بندی مشتری کارآمد مبتنی بر هوش مصنوعی می‌پردازد. این مطالعه با استفاده از یک مدل یادگیری عمیق بدون نظارت برای شناسایی ویژگی‌های رفتاری کلیدی در داده‌های مشتری استفاده می‌کند ولی روش آنها نوع مشتری‌ها را پیدا نمی‌کند. در این تحقیق از مجموعه داده کگل استفاده شده و هر فاکتور شامل

<sup>3</sup> Period  
<sup>4</sup> Compatible

<sup>1</sup> Panel  
<sup>2</sup> Expectation maximization



همان طور که قبلاً ذکر شد، بازه  $T$  کل شامل سه نوع مختلف است:

$$\mathcal{L}(X|\lambda) = \prod_{t \in T_P} \lambda p(j_t|S_t) \cdot \prod_{t \in T_{NP}} \lambda p(0|S_t) \cdot \prod_{t \in T_{NA}} (1 - \lambda) \quad (4)$$

و حداکثر تخمین log-likelihood به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_l(X|\lambda) = & \sum_{t \in T_P} (\log \lambda + \log P(j_t|S_t)) \\ & + \sum_{t \in T_{NP}} (\log \lambda + \log P(0|S_t)) \\ & + \sum_{t \in T_{NA}} \log(1 - \lambda) \end{aligned} \quad (5)$$

هنگامی  $S_t$  ارائه می‌شود، احتمال انتخاب یک محصول  $j_t$  توسط مشتریان در دوره  $t$  به صورت  $\sum_{i \in M_t(j_t, S_t)} x_i$  است. بدیهی است که در صورت عدم ارائه  $j_t$  احتمال صفر خواهد بود. با جایگزین کردن تابع احتمال در معادله (۵)، می‌توانیم داشته باشیم:

$$\mathcal{L}_l(X|\lambda) = \sum_{t \in T_P} \left( \log \lambda + \log \left( \sum_{i \in M_t(j_t|S_t)} x_i \right) \right) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & + \sum_{t \in T_{NP}} \left( \log \lambda \right. \\ & \left. + \log \left( \sum_{i \in M_t(0|S_t)} x_i \right) \right) \\ & + \sum_{t \in T_{NA}} \log(1 - \lambda) \end{aligned}$$

و پس از خلاصه‌سازی (۶):

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_l(X|\lambda) = & \sum_{t \in T_P} \log \left( \sum_{i \in M_t(j_t|S_t)} x_i \right) \\ & + \sum_{t \in T_{NP}} \log \left( \sum_{i \in M_t(0|S_t)} x_i \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$+ |T_{NA}| \log(1 - \lambda) + (|T_P| + |T_{NP}|) \log \lambda$$

در (۷)، عبارت اول نشان‌دهنده log-likelihood خرید کالا در دوره‌های خرید، عبارت دوم برای دوره‌های بدون خرید و عبارت آخر برای دوره‌های بدون ورود است. این تابع log-likelihood مشابه [۱۶] است. معادله در  $X$  و  $\lambda$  قابل تفکیک است و به صورت سراسری در  $(X, \lambda)$  مقعر است. بنابراین، به راحتی می‌توانیم  $\lambda^* = \frac{|T_P| + |T_{NP}|}{T}$  را پیدا کنیم.

#### ۴- ممتیک و حل مسئله «کشف نوع مشتری»

الگوریتم‌های تکاملی<sup>۳</sup> (EA) برای موارد مشابه مسئله کشف نوع مشتری مناسب هستند. همان طور که در بخش بررسی ادبیات ذکر شد، اخیراً الگوریتم ژنتیک توانسته از رویکردهای ریاضی برای حل مسئله بهتر عمل کند. الگوریتم‌های تکاملی خالص در جستجوی فضای مسئله

دوره شود، محصول ۱ خریداری می‌شود. اصطلاح «سازگاری» به این دلیل به کار می‌رود که هیچ‌کس نمی‌تواند به‌طور واقعی تشخیص دهد کدام نوع مشتری در یک دوره وارد شده است. بنابراین، فقط می‌توانیم بفهمیم کدام نوع مشتری سازگار است. در دوره ۲،  $C_2$  تنها نوع مشتری سازگار است. به این مورد دقت شود که در دوره ۲،  $C_1$  سازگار نیست؛ زیرا اگر  $C_1$  در این دوره می‌رسید، مشتری محصول ۱ را خریداری می‌کرد. در دوره ۴، هیچ نوع مشتری وارد نشده است. در دوره ۵، هیچ محصولی خریداری نشده چرا که فقط نوع ۲ و ۳ مشتری سازگار باشد زیرا اگر  $C_1$  به این دوره برسد، محصول ۳ را خریداری می‌کند. یافتن سازگاری انواع مشتری برای هر دوره، اولین گام فرایند در رویکردهای کشف بازار است. انواع مشتریان سازگار در دوره  $t$  با  $M_t(j_t, S_t)$  نشان داده می‌شوند. برای مجموعه کامل انواع مشتری  $\{C_1, \dots, C_k\}$  و  $S_t \in S_t$  که در آن محصولات ارائه شده و  $j_t$  تراکنش دوره  $t$  است، انواع مشتری سازگار به صورت زیر پیدا می‌شود:

$$M_t(j_t, S_t) = \{i: C_i(j_t) < C_i(k) \quad \forall k \in S_t, k \neq j_t\} \quad (1)$$

#### ۳-۱- مدل مبتنی بر انتخاب<sup>۱</sup>

مدل انتخاب گسسته کلی در [۱۵] پیشنهاد شده است که از آن به‌عنوان یک مدل غیرپارامتریک برای یافتن احتمال خرید محصول  $j_t$  در بازه زمانی  $t$  استفاده می‌گردد:

$$\begin{cases} \lambda p(j_t|S_t), j_t \in S_t & \text{purchase probability} \\ p(0|S_t) + (1 - \lambda) & \text{No - purchase probability} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن منظور از عدم خرید، خرید محصول صفر یا عدم ورود مشتری است. برآوردگر حداکثر درست‌نمایی<sup>۲</sup> (MLE) برای برآورد تقاضا به شرح زیر استفاده می‌شود:

$$\mathcal{L}(X|\lambda) = \prod_{t=1}^T \lambda p(j_t|S_t) \quad (3)$$

جدول (۱): در دسترس بودن محصول و نمونه تراکنش فروش

محصولات	دوره				
	۵	۴	۳	۲	۱
۱	خیر	خیر	خیر	بله	بله
۲	خیر	خیر	خیر	بله	بله
۳	بله	خیر	خیر	خیر	بله
۴	خیر	خیر	بله	خیر	خیر
۵	خیر	بله	بله	بله	خیر
تراکنش	۰	NA	۴	۵	۱
سازگاری	{2,3}	-	{1,2}	{2}	{1}
نوع تراکنش	$T_{NP}$	$T_{NA}$	$T_P$	$T_P$	$T_P$

"P", "NP", "NA" به ترتیب مخفف Purchase, No-Purchase و No-Arrival است.

<sup>3</sup> Evolutionary algorithms

<sup>1</sup> Choice-based model

<sup>2</sup> Maximum likelihood estimator



1	Generate random initial <i>population</i>
2	Local search
3	Fitness evaluation
4	<b>Repeat until</b> (termination condition)
5	Single-point crossover
	Reproduction operators
6	Local search
7	Fitness evaluation
8	Survival selection
9	<b>End repeat</b>

#### ۴-۱- نحوه نمایش

یک راه حل، شامل لیستی از انواع مشتری با اندازه حداقل یک است. هر نوع مشتری یک لیست ترجیحی از محصولات است که به محصول صفر ختم می‌شود. به عنوان مثال، راه حل زیر شامل سه نوع مشتری با اندازه‌های مختلف است.

$$solution = \{ \{2,7,3,4,6,0\}, \{1,2,0\}, \{5,4,2,1,0\} \}$$

#### ۴-۲- جمعیت اولیه

در ابتدای کار الگوریتم، جمعیت اولیه تصادفی با اندازه ثابت تولید شده است. هر راه حل از جمعیت اولیه شامل تعدادی تصادفی از انواع مشتری و هر نوع مشتری شامل تعداد تصادفی از محصولات است. محصولات تکراری در نوع مشتری و محصول صفر در ابتدای نوع مشتری مجاز نیستند.

#### ۴-۳- تابع برازندگی

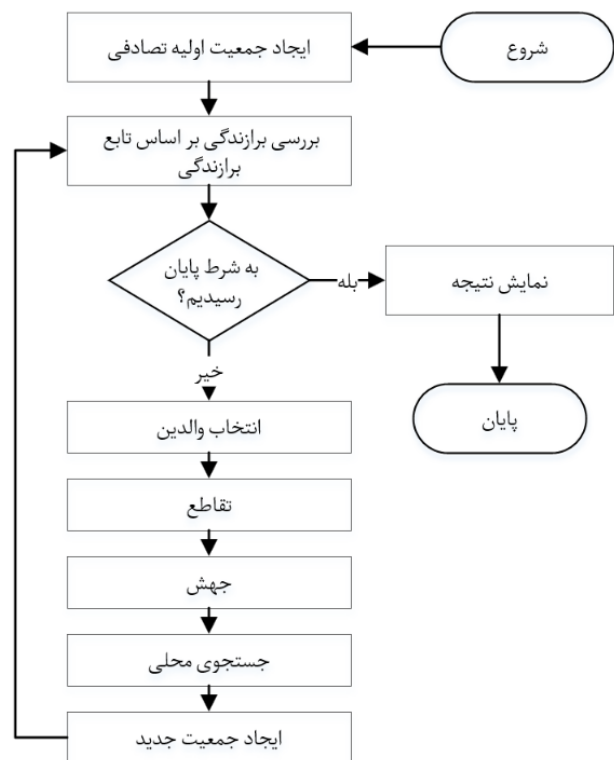
قبل از استفاده از تابع برازندگی برای ارزیابی یک راه حل، باید سازگاری آن راه حل را در تمام دوره‌ها پیدا کنیم. اگر حداقل یک دوره ناسازگار وجود داشته باشد، به معنای غیرقابل قبول بودن راه حل است و اگر دوره‌های ناسازگار وجود نداشته باشد، به معنای قابل قبول بودن راه حل است. تابع برازندگی زیر از دو بخش مجزا تشکیل شده است. قسمت اول راه حل‌های قابل قبول استفاده می‌شود. بدیهی است که تابع برازندگی را پس از ارزیابی سازگاری دوره‌ها برای یک راه حل انتخاب می‌کنیم.

$$Fitness = \begin{cases} \mu \times |T_{inc}|, & |T_{inc}| > 0 \\ \max_{x \geq 0} L_1(x), s.t. \sum_{i=1}^k x_i = 1, & |T_{inc}| = 0 \end{cases} \quad (8)$$

کل دوره‌ها  $T = T_c + T_{inc}$  می‌باشد که در آن  $|T_c|$  و  $|T_{inc}|$  به ترتیب تعداد دوره‌های سازگار و ناسازگار را نشان می‌دهد. قابل توجه است که  $T$  شامل دوره‌های بدون ورود نمی‌شود. پارامتر  $\mu > 0$  ثابت تنبیه است. در بخش دوم تابع برازندگی،  $L_1(x)$  تابع (۳) است که در بخش قبل توضیح داده شد.

زمانی که با تکنیک‌های دیگر، مانند جستجوهای محلی ترکیب شوند، کارآمدتر هستند [۲۵-۲۷]. بنابراین، استفاده از همسایگی این امکان را می‌دهد از جستجوی محلی همراه با الگوریتم ژنتیک [۱۹] استفاده شود. الگوریتم ممتیک، ترکیبی از تکاملی‌های ژنتیک و ممتیک است و در این تحقیق از آنها استفاده خواهیم کرد [۲۸]. شکل (۱) روند کلی ممتیک را نمایش می‌دهد.

در این بخش ساختار ممتیک مورد استفاده برای حل مسئله «کشف نوع مشتری» را شرح خواهیم داد. قابل توجه است که هدف اصلی این مقاله، نشان دادن تأثیر رویکردهایی است که برای جستجوی محلی در حل این مسئله استفاده شده است. برای درک این فرآیند، باید بین راه حل قابل قبول و غیرقابل قبول تمایز قائل شویم. فرض کنید راه حل وجود دارد که شامل برخی از انواع مشتری است. برای ارزیابی این راه حل، ابتدا باید سازگاری هر دوره را با استفاده از  $M_t(j_t, S_t)$  پیدا کنیم. پس از آن، اگر راه حل همه دوره‌ها را پوشش دهد و در همه دوره‌ها سازگار باشد، راه حل قابل قبول است. از نقطه نظر امکان‌سنجی، می‌توان فرآیند الگوریتم ممتیک (یا سایر تکاملی‌ها) را برای حل مسئله کشف نوع مشتری به دو فاز مختلف طبقه‌بندی کرد. فاز اول، از راه حل‌های غیرقابل قبول به راه حل‌های قابل قبول همگرا می‌شود و فاز دوم یافتن راه حل بهینه با استفاده از راه حل‌های قابل قبول است. در تحقیق فعلی، اولین هدف تسریع فرآیند فاز اول با کمک جستجوی محلی است. هدف دوم در حیطه‌ی این تحقیق نمی‌گنجد. شبیه‌کد الگوریتم ممتیک استفاده شده به شرح زیر است:



شکل (۱): الگوریتم ممتیک [۲۸]



#### ۴-۴- عملگر ترکیب تک نقطه ای

برای اعمال عملگر ترکیب تک نقطه‌ای<sup>۱</sup> روی دو راه‌حل، نیمی از طول راه‌حل را به‌عنوان نقطه انتخاب کردیم. با استفاده از این کراس‌اوفر، دو فرزند به وجود می‌آید.

#### ۴-۵- عملگرهای تولید مثل

انتخاب چرخ رولت برای انتخاب یکی از اپراتورهای تولید مثل زیر و اعمال آن برای فرزندان اعمال می‌شود:

۱. اضافه کردن یک نوع مشتری تصادفی با طول تصادفی به یک راه‌حل.

۲. حذف یک نوع مشتری تصادفی از یک راه‌حل.

۳. حذف یک محصول تصادفی از نوع مشتری تصادفی در یک راه‌حل.

۴. جایگزینی یک محصول تصادفی با محصول دیگری از نوع مشتری تصادفی در یک راه‌حل.

۵. اعمال یک کراس‌اوفر تک نقطه‌ای بر روی دو نوع تصادفی مشتری از یک راه‌حل.

#### ۴-۶- انتخاب بازماندگان

جمعیت زنده مانده شامل ۸۰ درصد بهترین و ۲۰ درصد از بدترین راه‌حل‌ها از جمعیت والدین و فرزندان است. در این تحقیق، جمعیت باقی‌مانده را قبل از استفاده در تکرار بعدی به هم می‌ریزیم.

#### ۴-۷- جستجوی محلی

ادعا می‌شود که موفقیت ممتیک به دلیل مبادله بین قابلیت‌های اکتشاف و توانایی بهره‌برداری از طریق جستجوی محلی است که مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۹]. طراحی یک روش جستجوی محلی کارآمد مهم است. ضمناً در این تحقیق هدف اصلی پیدا کردن اولین پاسخ قابل قبول با کمتر کردن تعداد نسل‌های مورد نیاز فرا ابتکاری است نه حل و یافتن راه‌حل بهینه مسئله کشف نوع مشتری. به‌طور خلاصه در این بخش، یک‌سری رویکرد را معرفی می‌کنیم و سپس این رویکردها را ارزیابی می‌کنیم تا یکی از آنها را به‌عنوان رویکرد جستجوی محلی الگوریتم ممتیک انتخاب کنیم.

همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، یک راه‌حل شامل برخی از انواع مشتری است. فرض کنید که راه‌حل  $solution(j)$   $\{c^{(1)}\}, \dots, \{c^{(l)}\}$  که در آن  $1 < i < l$   $c^{(i)}$  یک نوع مشتری است. دیدگاه اصلی جهت یافتن همسایه بهتر برای  $c^{(i)} \in solution(j)$  است. در ذیل، سه رویکرد مختلف برای جستجوی محلی با توجه به این دیدگاه پیشنهاد شده است.

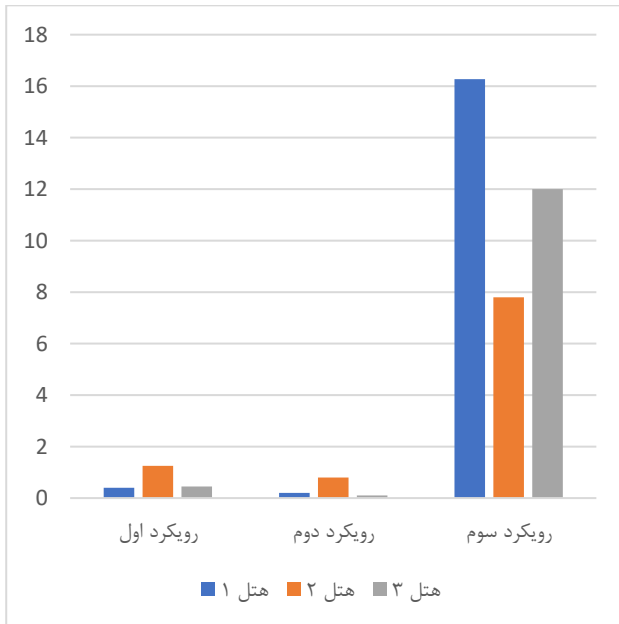
- رویکرد اول: همان‌طور که قبلاً ذکر شد،  $c^{(i)}$  لیستی از برخی محصولات است. در این رویکرد، جایگشت‌های دیگر این محصولات را به عنوان  $neighbor^{(i)}$  در نظر می‌گیریم.
- رویکرد دوم: تعداد دوره‌های ناسازگار با  $c^{(i)}$  را در نظر می‌گیریم. محصولی که باعث ایجاد بیشترین ناسازگاری شده است را پیدا می‌کنیم. سایر جایگشت‌های این نوع مشتری را بدون محصولی که باعث ناسازگاری شده را به عنوان  $neighbor^{(i)}$  در نظر می‌گیریم.
- رویکرد سوم: سایر جایگشت‌های  $c^{(i)}$  را ایجاد می‌کنیم، سپس مقدار تابع برازندگی را به ازای همه محاسبه می‌کنیم و بهترین نوع مشتری را به عنوان  $neighbor^{(i)}$  معرفی می‌کنیم.

#### ۵- آزمایشات

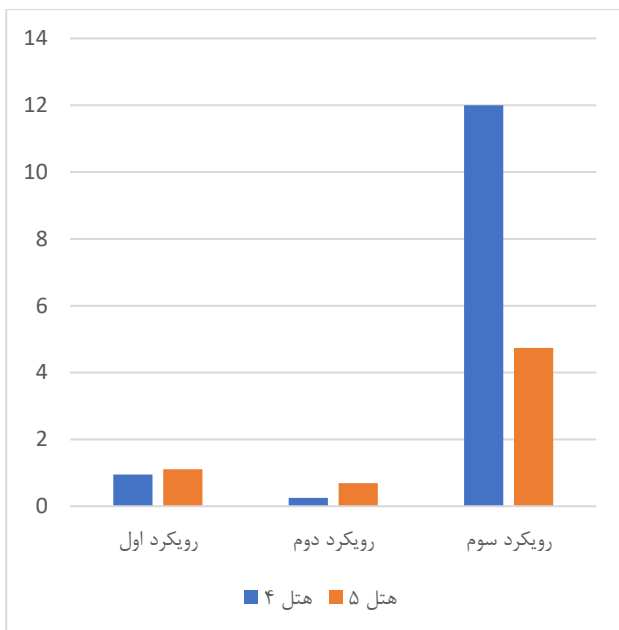
برای ارزیابی، از مجموعه داده مربوط به پنج هتل Continental واقع در ایالات متحده استفاده شد. این مجموعه داده عمدتاً شامل اطلاعات سفر افرادی است که برای اهداف تجاری اتاق رزرو کرده‌اند. این مجموعه داده به‌صورت عمومی در دسترس است و به‌عنوان بنچمارک برای مسئله کشف نوع مشتری استفاده می‌شود. بازه زمانی داده‌ها از ۱۲ مارس ۲۰۰۷ تا ۱۵ آوریل ۲۰۰۷ است که ۳۴ روز را شامل می‌شود [۲۳]. رزروها از طریق کانال‌های مختلفی مانند آژانس‌های مسافرتی، اپراتورهای هتل، بازدیدهای شخصی و وبسایت هتل‌ها انجام شده است. برای ارزیابی کارایی رویکردهای جستجوی محلی خود، سه رویکرد ذکر شده با الگوریتم ممتیک، پیاده‌سازی و روش ژنتیک [۱۹] مقایسه شد. برای هر دو رویکرد (ممتیک و ژنتیک) جمعیت اولیه تصادفی با تعداد ۲۵ ایجاد شد. آزمایش برای نمایش سرعت همگرایی در فاز اولیه (همگرایی جمعیت از راه‌حل‌های غیرقابل قبول به راه‌حل‌های قابل قبول) است. در این آزمایش هنگامی که اولین راه‌حل قابل قبول ایجاد شده است، از ادامه کار الگوریتم جلوگیری شد. هر آزمایش ۳۰ بار تکرار شده و میانگین نتایج در جدول (۲) گزارش شده است. در ستون «دیتاست» شماره مجموعه داده هتل و در ستون رویکرد، ژنتیک و سه رویکرد پیشنهادی برای همسایگی در ممتیک مشاهده می‌شود. منظور از اندازه راه‌حل، تعداد نوع‌های مشتری موجود در راه‌حل است. همچنین در شکل‌های (۲-۳) درصد بهبود نسبت به ژنتیک مشاهده می‌شود. همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است، تنها رویکرد سوم می‌تواند میزان همگرایی بهتری در زمینه همسایگی اعمال کند. همچنین برای مقایسه بهتر، میزان شباهت که در تابع برازندگی استفاده و توسط (۵) محاسبه می‌شود نیز با دو روش دیگر نیز مقایسه شد که در جدول (۳) قابل مشاهده است. این مقایسه جهت بررسی این موضوع است که آیا ارزش راه‌حل‌ها در صورت استفاده از همسایگی کمتر می‌شود یا نه. در این جدول با توجه به اینکه میزان شباهت هر دو الگوریتم مشابه بوده است، هر دو روش را در یک سطر قرار داده‌ایم. به این مورد دقت شود که در این تحقیق، میزان برتری الگوریتم ممتیک نسبت به ژنتیک

<sup>1</sup> Crossover





شکل (۲): درصد بهبود رویکردهای همسایگی ممیتیک نسبت به ژنتیک در هتل‌های ۱ الی ۳



شکل (۳): درصد بهبود رویکردهای همسایگی ممیتیک نسبت به ژنتیک در هتل‌های ۴ و ۵

## ۶- نتیجه‌گیری

اگر هر نوع مشتری را به‌عنوان یک لیست ترجیحی از محصولات در نظر بگیریم، کشف انواع مشتری گام ابتدایی برای برآورد تقاضای محصولات و یکی از اولین مراحل استراتژی قیمت‌گذاری است. در صورت استفاده از معاملات فروش و داده‌های موجود بودن محصول، یافتن انواع مشتری با روش‌های فراابتکاری به‌دلیل کمبود داده چالش‌برانگیز است. در برخی از برنامه‌های کاربردی، یافتن اولین راه‌حل قابل قبول در یک‌زمان کوتاه چالش‌برانگیزتر از یافتن راه‌حل بهینه است.

[۱۹] در کم شدن تعداد نسل مورد نیاز برای رسیدن به راه‌حل بوده است. در جدول (۳) روش ID<sup>۱</sup> در [۱۶] و روش RMD<sup>۲</sup> در [۱۷] نمایش داده شده است. رویکرد همسایگی باعث کم ارزش‌تر شدن راه‌حل‌های نهایی نیست.

جدول (۲): نمایش تعداد نسل مورد نیاز برای ایجاد اولین راه‌حل قابل قبول اندازه راه‌حل

دیتاست	رویکرد	اندازه راه‌حل	تعداد نسل
هتل ۱	ژنتیک	۱۲.۲	۹۸.۳
	ممیتیک، رویکرد اول	۱۲.۸	۹۷.۹
	ممیتیک رویکرد دوم	۱۲.۶	۹۸.۱
هتل ۲	ممیتیک رویکرد سوم	۱۲.۵	۸۲.۳
	ژنتیک	۱۲.۷	۱۹۸.۸
	ممیتیک، رویکرد اول	۱۱.۸	۱۹۶.۳
هتل ۳	ممیتیک رویکرد دوم	۱۱.۷	۱۹۷.۲
	ممیتیک رویکرد سوم	۱۱.۶	۱۸۳.۲
	ژنتیک	۱۲.۶	۱۹۷.۰
هتل ۴	ممیتیک، رویکرد اول	۱۳.۳	۱۹۶.۱
	ممیتیک رویکرد دوم	۱۳.۵	۱۹۶.۸
	ممیتیک رویکرد سوم	۱۳.۶	۱۷۳.۱
هتل ۵	ژنتیک	۹.۶	۱۱۵.۴
	ممیتیک، رویکرد اول	۱۰.۰	۱۱۴.۳
	ممیتیک رویکرد دوم	۱۰.۳	۱۱۵.۱
هتل ۵	ممیتیک رویکرد سوم	۱۰.۲	۱۰۰.۹
	ژنتیک	۱۱.۱	۷۱.۷
	ممیتیک، رویکرد اول	۱۰.۶	۷۰.۹
هتل ۵	ممیتیک رویکرد دوم	۱۰.۷	۷۱.۲
	ممیتیک رویکرد سوم	۱۰.۵	۶۸.۳

جدول (۳): نمایش تعداد نسل مورد نیاز برای ایجاد اولین راه‌حل قابل قبول اندازه راه‌حل

دیتاست	روش	Log-Value
هتل ۱	ID	-۲۶۲۱
	RMD	-۲۴۲۶
	ژنتیک و ممیتیک	-۲۰۹۵
هتل ۲	ID	-۷۷۸
	RMD	-۵۳۶
	ژنتیک و ممیتیک	-۴۹۱
هتل ۳	ID	-۱۵۶۹
	RMD	-۱۱۲۹
	ژنتیک و ممیتیک	-۱۰۷۳
هتل ۴	ID	-۶۱۶
	RMD	-۴۰۱
	ژنتیک و ممیتیک	-۳۵۲
هتل ۵	ID	-۴۰۶
	RMD	-۳۷۰
	ژنتیک و ممیتیک	-۳۳۹

<sup>2</sup> Ranked-based Market Discovery

<sup>1</sup> Independent Demand



- در این تحقیق برای پیدا کردن سریعتر اولین راه حل قابل قبول در الگوریتم ژنتیک به سراغ الگوریتم ممتیک رفته‌ایم. زیرا با ترکیب این الگوریتم با الگوریتم جستجوی محلی میتوان انتظار داشت که این الگوریتم سریعتر به اولین راه حل قابل قبول برسد، لذا در این تحقیق سه رویکرد برای جستجوی محلی ارائه کردیم، سپس این سه رویکرد را با پیاده‌سازی و با الگوریتم ژنتیک مقایسه کردیم، این مقایسه را با استفاده از داده‌های واقعی پنج هتل انجام داده‌ایم.
- نتایج مقایسه نشان داد که اگر روند همسایگی به نحوی باشد که تابع برازندگی را به سمت نتایج بهتر سوق دهد می‌توان همگرایی سریع‌تری در الگوریتم داشت و سریع‌تر به اولین راه حل قابل قبول مسئله برسیم. همچنین روش پیشنهادی راه‌حلی با ارزش بالاتر نسبت به روش‌های گذشته و هم‌ارزش با روش موجود ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که همسایگی تاثیر منفی بر روی ارزش راه‌حل‌های ارائه شده ندارد. می‌توان رویکردهای دیگری را به عنوان همسایگی در نظر گرفت؛ این رویکردها خود می‌توانند الگوریتم‌های فراابتکاری (نظیر PSO) باشد تا بتوان همسایگی بهتری را برای الگوریتم ممتیک به دست آورد و ارزش راه‌حل‌های نهایی را بالاتر برد. این موضوع را می‌توان به عنوان پیشنهاد برای ادامه این تحقیق در نظر گرفت.
- ### مراجع
- [1] K. T. Talluri and G. J. Van Ryzin, *The Theory and Practice of Revenue Management*, vol. 68. Boston, MA: Springer US, 2004.
  - [2] P. Liu and S. Smith, "Estimating unconstrained hotel demand based on censored booking data," *Journal of Revenue and ...*, July 01, 2002. <http://link.springer.com/10.1057/palgrave.rpm.5170015> (accessed February 21, 2018).
  - [3] A. Nikseresht and K. Ziarati, "Estimating True Demand in Airline's Revenue Management Systems using Observed Sales," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 8, no. 7, pp. 361–369, 2017, doi: 10.14569/ijacsa.2017.080748.
  - [4] C. Y. Goh, C. Yan, and P. Jaillet, "Estimating Primary Demand in Bike-sharing Systems," *SSRN Electron. J.*, Jan. 2019, doi: 10.2139/ssrn.3311371.
  - [5] J. P. Newman, M. E. Ferguson, L. A. Garrow, and T. L. Jacobs, "Estimation of Choice-Based Models Using Sales Data from a Single Firm," *Manuf. Serv. Oper. Manag.*, vol. 16, no. 2, pp. 184–197, May 2014, doi: 10.1287/msom.2014.0475.
  - [6] A. Aouad, V. F. Farias, and R. Levi, "Assortment Optimization under Consider-then-Rank Choice Models," *SSRN Electron. J.*, Jun. 2015, doi: 10.2139/ssrn.2618823.
  - [7] A. Aouad, V. Farias, R. Levi, and D. Segev, "The approximability of assortment optimization under ranking preferences," *Oper. Res.*, vol. 66, no. 6, pp. 1661–1669, Nov. 2018, doi: 10.1287/opre.2018.1754.
  - [8] D. Bertsimas and V. V. Mišić, "Data-driven assortment optimization," *Manage. Sci.*, vol. 1, pp. 1–35, 2015.
  - [9] S. Jagabathula, "Assortment Optimization Under General Choice," *Ssrn*, pp. 1–51, 2014, doi: 10.2139/ssrn.2512831.
  - [10] S. Jagabathula and P. Rusmevichientong, "A Nonparametric Joint Assortment and Price Choice Model," *Ssrn*, no. July, 2013, doi: 10.2139/ssrn.2286923.
  - [11] G. Gallego, H. Topaloglu, and others, *Revenue management and pricing analytics*, vol. 209. Springer, 2019.
  - [12] G. Bitran and R. Caldentey, "An overview of pricing models for revenue management," *Manuf. Serv. Oper. Manag.*, vol. 5, no. 3, pp. 203–229, 2003.
  - [13] S. Kunnumkal, "Randomization Approaches for Network Revenue Management with Customer Choice Behavior," *Prod. Oper. Manag.*, vol. 23, no. 9, pp. 1617–1633, Sep. 2014, doi: 10.1111/poms.12164.
  - [14] L. Chen and T. Homem-de-Mello, "Mathematical programming models for revenue management under customer choice," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 203, no. 2, pp. 294–305, Jun. 2010, doi: 10.1016/J.EJOR.2009.07.029.
  - [15] G. Vulcano, G. van Ryzin, and R. Ratliff, "Estimating Primary Demand for Substitutable Products from Sales Transaction Data," *Ssrn*, no. August 2015, 2011, doi: 10.2139/ssrn.1923711.
  - [16] G. van Ryzin and G. Vulcano, "A Market Discovery Algorithm to Estimate a General Class of Nonparametric Choice Models," *Manage. Sci.*, vol. 61, no. 2, pp. 281–300, 2015, doi: 10.1287/mnsc.2014.2040.
  - [17] G. van Ryzin and G. Vulcano, "Technical Note—An Expectation-Maximization Method to Estimate a Rank-Based Choice Model of Demand," *Oper. Res.*, vol. 65, no. 2, pp. 396–407, 2017, doi: 10.1287/opre.2016.1559.
  - [18] S. Jagabathula, D. Mitrofanov, and G. Vulcano, "Inferring Consideration Sets from Sales Transaction Data," *SSRN Electron. J.*, 2019, doi: 10.2139/ssrn.3410019.
  - [19] M. HajMirzaei, K. Ziarati, and A. Nikseresht, "Discovering customer types using sales transactions and product availability data of 5 hotel datasets with genetic algorithm," *J. Revenue Pricing Manag.*, 2020, doi: 10.1057/s41272-020-00245-3.
  - [20] S. Jagabathula and G. Vulcano, "A Partial-order-based Model to Estimate Individual Preferences Using Panel Data," *SSRN Electron. J.*, no. April, 2017, doi: 10.2139/ssrn.2560994.
  - [21] H. Lee and Y. Eun, "Discovering heterogeneous consumer groups from sales transaction data," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 280, no. 1, pp. 338–350, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.EJOR.2019.05.043.
  - [22] M. HajMirzaei, K. Ziarati, and A. Nikseresht, "A customer type discovery algorithm in hotel revenue management systems," *J. Revenue Pricing Manag.*, 2021, doi: 10.1057/s41272-020-00273-z.
  - [23] T. Bodea, M. Ferguson, and L. Garrow, "Data Set — Choice-Based Revenue Management: Data from a Major Hotel Chain," *Manuf. Serv. Oper. Manag.*, vol. 11, no. 2, pp. 356–361, 2008, doi: 10.1287/msom.1080.0231.
  - [24] L. Davis, *Handbook of genetic algorithms*. 1996.
  - [25] D. H. Wolpert and W. G. Macready, "No free lunch theorems for optimization," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 1, no. 1, pp. 67–82, 1997.
  - [26] J. C. Culberson, "On the futility of blind search: An algorithmic view of 'no free lunch,'" *Evol. Comput.*, vol. 6, no. 2, pp. 109–127, 1998.
  - [27] D. E. Goldberg and S. Voessner, "Optimizing global-local search hybrids," in *GECCO*, 1999, vol. 99, pp. 220–228.
  - [28] P. Moscato, "On evolution, search, optimization, GAs and martial arts: toward memetic algorithms. California Inst. Technol., Pasadena," 1989.
  - [29] N. Krasnogor and J. Smith, "A tutorial for competent memetic algorithms: model, taxonomy, and design issues," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 9, no. 5, pp. 474–488, 2005.
  - [30] Wang, C. (2022). Efficient customer segmentation in digital marketing using deep learning with swarm

- intelligence approach. *Information Processing & Management*, 59(6), 103085.
- [31] Narayana, V. L., Sirisha, S., Divya, G., Pooja, N. L. S., & Nouf, S. A. (2022, March). Mall customer segmentation using machine learning. In *2022 International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)* (pp. 1280-1288). IEEE.
- [32] Griva, A., Zampou, E., Stavrou, V., Papakiriakopoulos, D., & Doukidis, G. (2023). A two-stage business analytics approach to perform behavioural and geographic customer segmentation using e-commerce delivery data. *Journal of Decision Systems*, 1-29.





## Energy harvesting from diaphragm muscle using piezoelectric specification

Sepehr Khalafzadeh<sup>1</sup>, Farshad Pesaran<sup>2\*</sup>, Nabiollah Shiri<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

[V.khalafzadeh@gmail.com](mailto:V.khalafzadeh@gmail.com)

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

[farshad.pesaran@iau.ac.ir](mailto:farshad.pesaran@iau.ac.ir)

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

[na.shiri@iau.ac.ir](mailto:na.shiri@iau.ac.ir)

**Abstract:** One of the most important applications of bioelectronics is to improve health and increase the lifespan of people through implantable devices. These types of equipment become more important and find more applications day-by-day. To improve the performance and lifetime of these equipment inside the body, they must have a stable energy supply. Batteries can save energy, but they must be replaced by passing the time, and this causes resurgery and extra costs for the patient. In this regard, many efforts have been made to supply this needed energy from inside the body. In this research, a new method for harvesting energy from the contraction movement of the diaphragm muscle is presented. In this method, a mechanical structure is used that transfers the energy from the diaphragm movement to the piezoelectric layer through a silicon spring. The piezoelectric layer stores the harvested energy in the electrical form.

**Keywords:** Implantable devices, energy harvester, diaphragm, respiratory, piezoelectric.

JCDSA, Vol. 2, No. 5, Spring 2024

Received: 2024-02-08

Online ISSN: 2981-1295

Accepted: 2024-04-28

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

Published: 2024-06-11

### CITATION

Khalafzadeh, S., et. al., "Energy harvesting from diaphragm muscle based on piezoelectric specification", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 2, No. 5, pp. 45-51, 2024.

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

### 1- Introduction

One of the challenges in implantable devices is providing their required energy. From a long-term perspective, their batteries need to be replaced and recharged, so, researchers are presenting energy harvesting from the human body.

Energy harvesting is divided into outside the body (wearable), and inside the body (implantable). Chemical, mechanical, and thermal energy harvesting are popular mechanisms. Wearable electronics have problems like power consumption, high volume, and restriction, so, a flexible triboelectric nanogenerator was introduced.

As a thermal energy harvesting, a flexible three-dimensional spring-like thermoelectric device (S-TED) with double elastomeric layers and air gaps was presented. In vivo energy harvesting increases the lifetime of implantable medical devices, it is an attractive process and satisfies sources of power supply in low-power applications. The method of harvesting energy should be stable and permanent to exempt the patients from battery replacement surgery and reduce the costs and risks of re-surgery. The energy was stored from internal organs in the spring as an in vivo mechanical energy harvesting, a triboelectric nanogenerator harvests energy from the breathing and diaphragm, which is suitable for electrically stimulating different neuronal structures.

The piezoelectric nanogenerators are another in vivo energy harvesting method that is applicable for low-frequency movements. Piezoelectric materials are a sufficient way to directly transfer mechanical energy to electric energy, but in general, these types of equipment are facing important challenges that are addressed in this research.

Firstly, the efficiency of energy transformation needs to be improved, while balancing the energy harvesting efficiency and the relevant harvesting technology is an important challenge. Secondly, the verification of the long-term operation of the organism to achieve a symbiotic state, and the biocompatibility of the devices require a large number of animal experiments and clinical trials. As an energy harvester's application the stimulation of the vagus nerve helps the treatment of many diseases, such as obesity, neurological and mental diseases, and Alzheimer's. This equipment, like other equipment that

can be placed in the body, needs a battery to provide its energy. Therefore, in this research, a biocompatible energy harvesting system is designed to provide the energy of this stimulant from diaphragm motion.

### 2- Methodology

In this study, the diaphragm muscle is chosen to harvest energy from it, because of its strength and constant movement. Also, from the implantable viewpoint, there is a suitable space around the diaphragm muscle for the harvester devices. Lead zirconate titanate (PZT) has good results in experimental evaluations in converting mechanical energy into electrical energy.

As a piezoelectric material, the PZT-8 satisfies the requirements of the proposed energy harvester, especially for in vivo and low-frequency movement. The diaphragm muscle in its relaxed state is convex and the contraction causes it to decrease and become an almost flat surface, this deformation causes a force to be applied to the piezoelectric layer.

### 3- Results and discussion

One of the factors that is very important in the design and construction of energy harvesters is how much electrical energy can be harvested from the muscle. In this article, we have investigated these issues and the mechanical changes and electrical outputs of the harvester. To check the accuracy of the performance, the results are shown after 100 time periods. A graphical diagram of distributed voltage on the piezoelectric device is represented and the results confirm the performance of the presented model.

### 4- Conclusion

An energy harvester model is presented which is an implantable piezoelectric nanogenerator (IPENG). It harvests mechanical energy from the diaphragm muscle. Evaluations show that this harvester can provide satisfying energy for long-time usage and this feature presents the design as a long-life battery to prevent multiple battery replacement surgeries. The piezoelectric energy harvesting systems are compared with the presented structures, without harming the body. The results show that the proposed structure is suitable for supplying implantable medical devices.





# برداشت انرژی از ماهیچه دیافراگم با استفاده از خاصیت پیزوالکتریکی

سپهر خلفزاده<sup>۱</sup>، فرشاد پسران<sup>۲\*</sup>، نبی‌اله شیرینی<sup>۳</sup>

۱،۲،۳- گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

[v.khalafzadeh@gmail.com](mailto:v.khalafzadeh@gmail.com), [farshad.pesaran@iau.ac.ir](mailto:farshad.pesaran@iau.ac.ir), [na.shiri@iau.ac.ir](mailto:na.shiri@iau.ac.ir)

**چکیده:** یکی از مهمترین کاربردهای بیوالکترونیک بهبود سلامت و افزایش طول عمر افراد از طریق دستگاه‌های قابل جای گذاری در بدن است. این نوع تجهیزات روز به روز اهمیت و کاربرد بیشتری پیدا می‌کنند. برای بهبود عملکرد این تجهیزات و افزایش طول عمرشان در داخل بدن، باید منبع انرژی پایدار داشته باشند. باتری‌ها هرچند قابلیت ذخیره کردن انرژی را دارند، اما با گذر زمان نیاز به تعویض دارند که باعث تحمیل جراحی مجدد و هزینه اضافی به بیمار می‌شود. تلاش‌های زیادی برای تامین این انرژی مورد نیاز از داخل بدن صورت گرفته است. در این مقاله روش جدیدی برای برداشت انرژی از حرکت انقباضی عضله دیافراگم ارائه شده است. در این روش از یک ساختار مکانیکی استفاده شده که انرژی حاصل از حرکت دیافراگم را از طریق فنر سیلیکونی به لایه پیزوالکتریک منتقل می‌کند. لایه پیزوالکتریک انرژی را به صورت الکتریکی در خود ذخیره می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** دستگاه‌های کاشتنی، برداشت کننده انرژی، دیافراگم، تنفسی، پیزوالکتریک

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۰

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۹

در یکی از تحقیقات انجام شده، ساختار ماریپیچی را پیشنهاد کرده‌اند که می‌تواند با استفاده از انرژی ذخیره شده در فنر، انرژی را از ضربان قلب برداشت کند [۱]. روش دیگر برای برداشت این انرژی، استفاده از نانو ژنراتور تریبولکتریک<sup>۳</sup> است که تلاش‌های زیادی در این زمینه صورت گرفته است. یکی از کاربردهایی که برای خروجی این نوع برداشت‌گر بسیار مناسب است، تحریک ساختارهای عصبی مختلف است [۲]. در بین تمامی روش‌های برداشت انرژی، استفاده از مواد پیزوالکتریک بسیار رایج است که در این مقاله از یکی از این مواد استفاده می‌شود، زیرا برای برداشت انرژی از حرکات اندام‌های داخلی بدن با فرکانس پایین عملکرد خوبی دارند. مواد پیزوالکتریک به عنوان مواد هوشمند شناخته می‌شوند زیرا به راحتی می‌توانند انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی و بالعکس تبدیل کنند. مزیت دیگر داشتن چگالی انرژی بالاتر نسبت به مبدل‌های دیگر مانند مواد تریبولکتریک و الکترومغناطیسی است [۳-۵]. این ویژگی‌ها مواد پیزوالکتریک را از سایر مواد برای برداشت انرژی متمایز می‌کند. محققان روش‌های مختلفی را برای استفاده از مواد پیزوالکتریک در برداشت کننده‌های انرژی ارائه کرده‌اند. یکی از تحقیقاتی که در سال ۲۰۱۳ انجام شد، لایه‌ای از پیزوالکتریک را در لندام‌های داخلی (قلب، ریه‌ها و دیافراگم) گاو قرار داده و با تغییر ضربان قلب، خروجی‌های متفاوتی را گزارش کردند. در این تحقیق از مواد PZT استفاده شده بود [۶].

## ۱- مقدمه

دستگاه‌های کاشتنی در علم پزشکی روز به روز در حال گسترش هستند و کاربردی‌تر می‌شوند. اما این دستگاه‌ها قبل از کاشت در بدن نیاز به آزمایش‌های زیادی دارند تا محققین مطمئن شوند که آسیبی به بدن بیمار وارد نمی‌کنند. یکی از عواملی که باید از کارایی آن اطمینان حاصل شود بخش تامین انرژی این تجهیزات است. باتری‌ها این انرژی را تامین می‌کنند، اما دائمی نیستند و برای تعویض آنها نیاز به هزینه و جراحی دارند. برای حل این مشکل، محققان به این فکر افتادند که انرژی مورد نیاز این تجهیزات را با برداشت انرژی از بدن انسان تامین کنند. این کار دو مزیت دارد: اول اینکه نیاز به تعویض و جراحی مجدد ندارد و دوم اینکه تا زمانی که بدن انسان زنده است کار می‌کند. بدن موجودات زنده به خصوص بدن انسان چه در داخل و چه در خارج از بدن پتانسیل بالایی برای برداشت انرژی دارد. این تحقیق به بررسی و ارائه روشی برای برداشت انرژی از داخل بدن می‌پردازد. لذا بررسی اجزای از برخی تحقیقاتی که تاکنون در این راستا انجام شده است، ارائه می‌شود. برداشت انرژی از بدن محدودیت‌هایی دارد و باید به آن‌ها دقت کرد که اولاً در حرکت لندام هدف اختلال ایجاد نکند و ثانیاً مواد تجهیز زیست سازگار<sup>۲</sup> است یا نه. انرژی مکانیکی حاصل از حرکت اعضای داخلی بدن پتانسیل خوبی برای برداشت انرژی دارد.

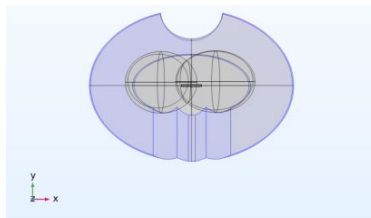
\* نویسنده مسئول

<sup>1</sup> biocompatible<sup>2</sup> triboelectric

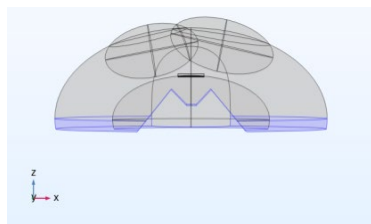
بهینه‌ترین حالت ممکن را داشته باشد. در برداشت‌گر انرژی مورد نظر، از یک ماده پیزوالکتریک به نام تیتانات سرب زیرکونات (pzt-8) استفاده شده است که برای استفاده در حرکات با فرکانس پایین مناسب است [۱۱-۱۵]. این ماده در ارزیابی‌های آزمایشگاهی و تجربی عملکرد خوبی داشته است. ظاهر این عضله در حالت ریلکس محدب است که در حالت انقباض صاف می‌شود. این حرکت با فرکانس بسیار کم و به طور مداوم انجام می‌شود و تا پایان عمر بیمار ادامه دارد. ساختار مورد نظر ما برای برداشت انرژی از حرکات انقباض عضله دیافراگم طراحی شده است. ساختار مورد نظر از یک لایه مواد پیزوالکتریک و یک فنر سیلیکونی و یک بستر سیلیکونی تشکیل شده است. جابجایی فنر باعث می‌شود لایه پیزوالکتریک تحت فشار قرار گیرد و همین امر باعث تولید انرژی می‌شود.

## ۲-۱- مدل‌سازی عضله دیافراگم

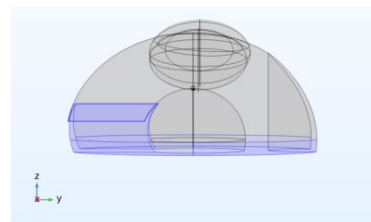
ساختار کلی عضله دیافراگم محدب است که در هنگام انقباض به سمت پایین و صاف می‌شود. برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر و ایجاد شرایط مرزی صحیح‌تر، نواحی متصل به قفسه سینه ثابت و در شکل (۱) به رنگ آبی در نظر شده است. در این شکل، ساختار کلی عضله دیافراگم و نواحی که در سه جهت به قفسه سینه ثابت شده‌اند را نشان داده شده است. نوع ماده این عضله، هایپرالاستیک در نظر گرفته شده است و مشخصات آن در جدول (۱) بیان شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱): شرایط مرزی عضله دیافراگم پیشنهادی، (الف): نمای ZX، (ب): نمای YX، و (ج): نمای ZY.

یکی از اهداف برداشت انرژی، رفع نیاز وسایل پزشکی قابل کاشت به داشتن منبع انرژی خارجی است. یکی از این تجهیزات ضربان‌ساز است. در همین راستا، در سال ۲۰۱۹، گروهی از محققین ساختاری را پیشنهاد کردند که با استفاده از ساختار فنی شکل به صورت یکپارچه که بر روی سرهای<sup>۱</sup> ضربان‌ساز قرار می‌گیرد و با برداشت نیروی حاصل از پمپاژ قلب، انرژی مورد نیاز دستگاه را تامین می‌کند. انرژی الکتریکی که از برداشت‌گرها به دست می‌آید ناشی از حرکت اندام‌های داخلی با فرکانس پایین است که خروجی را به صورت گسسته ارائه می‌کند. در همین راستا، گروهی از محققان در سال ۲۰۱۸ ساختاری را طراحی کردند که می‌تواند مستقیماً جریان DC تولید کند. آنها این ساختار را روی دیافراگم یک موش قرار دادند و توانستند دریافت ۲.۲ ولت DC را گزارش کنند [۷]. علی‌رغم تمام این تلاش‌ها، برداشت‌کننده‌های انرژی هنوز در مراحل ابتدایی خود هستند و قبل از استفاده در مقیاس وسیع باید مسائل زیادی را در نظر گرفت. یکی از مهم‌ترین مواردی که باید به آن توجه کرد طول عمر دستگاه است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، یکی از دلایلی که در پس ایده برداشت‌کننده‌های انرژی وجود دارد، اجتناب از جراحی‌های مکرر برای تعویض باتری است، بنابراین تا زمانی که بیمار زنده است، دستگاه باید توانایی کار کردن را داشته باشد [۸].

چالش بعدی، زیست‌سازگاری است و موادی که این ویژگی را دارند باید استفاده شوند یا با پوششی که زیست‌سازگار است در داخل بدن قرار گیرند. طرف دیگر برداشت انرژی این است که چگونه و برای چه هدفی می‌توان از آن انرژی استفاده کرد. با فراگیرتر شدن استفاده از وسایل کاشتنی در بدن، نیاز به این نوع انرژی بیشتر می‌شود. یکی از کاربردهایی که قبلاً مورد استفاده قرار گرفته است، تحریک عصب واگ است که برای درمان بیماری‌های مزمن مانند افسردگی، اختلالات دوقطبی و چاقی استفاده می‌شود [۹]. کاربرد دیگر، تسریع روند بهبودی استخوان‌های شکسته شده است [۱۰].

این مقاله سه بخش اصلی دارد که در بخش اول به بررسی روش پیشنهادی، نحوه شبیه‌سازی عضله دیافراگم، ساختار کلی برداشت‌گر مورد نظر و نحوه قرارگیری آن پرداخته شده است. در بخش بعدی بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مقایسه آن با تعدادی از روش‌هایی است که پیش از این انجام داده شده، بیان شده است. در بخش پایانی هم نتیجه‌گیری حاصل از این مقاله بیان شده است.

## ۲- روش پیشنهادی

در طراحی و ساخت برداشت‌کننده‌های انرژی، موارد مهم زیادی وجود دارد. یکی از این موارد این است که انتخاب اندام مورد نظر جهت برداشت انرژی است که پس از نصب تجهیزات در عملکرد بدن اختلال ایجاد نکند و به سلامتی بیمار آسیبی وارد نشود. عضله دیافراگم برای این کار بسیار مناسب است؛ زیرا هم انرژی کافی دارد و هم فضای کافی برای نصب برداشت‌گر انرژی دارد. عامل مهم دیگر این است که از چه موادی برای ساخت دستگاه استفاده می‌شود تا در برداشت انرژی

<sup>1</sup> Leads



جدول (۱): خواص مکانیکی عضله دیافراگم پیشنهادی

مشخصات	مقدار
نوع	هایپروالاستیک
چگالی	1090 Kg/m <sup>3</sup>
Lamé parameter $\lambda$	1.79e5 N/m <sup>2</sup>
Lamé parameter $\mu$	7.14e5 N/m <sup>2</sup>
عرض دیافراگم	450 mm
طول دیافراگم	350 mm
ارتفاع دیافراگم	150 mm
ضخامت دیافراگم	90 mm

جدول (۲): ویژگی‌های نیرو.

مشخصات	مقدار
دامنه	40000 N/m <sup>2</sup>
جهت	محور Z
فرکانس	0.3Hz
نوع	سینوسی

دامنه نیرو با استفاده از (۳) محاسبه می‌شود.

$$Tdi = \left(\frac{Pdi}{DMT}\right) \times \left(\frac{A}{C}\right) \quad (3)$$

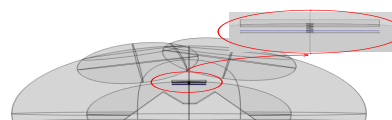
شدت انقباض با  $Tdi$  و ضخامت عضله با  $DMT$  و سطح مقطع و دور قفسه سینه به ترتیب با  $(A)$  و  $(C)$  بیان می‌شود. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری دقیق این پارامترها امکان‌پذیر نیست و برای افراد با شرایط مختلف متفاوت است. به همین دلیل است که از مقادیر بزرگ تری استفاده شده است. جزئیات مشخصات نیروی اعمال شده در جدول (۲) نشان داده شده است.

## ۲-۲- ساختار پیشنهادی برداشت گر پیزوالکتریک

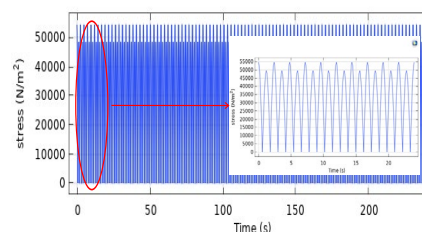
برای تبدیل انرژی مکانیکی در عضله دیافراگم باید از ساختاری استفاده کرد که به راحتی بتواند این انرژی را تبدیل کند. برای این منظور از فنر سیلیکونی پلی کریستال و لایه‌ای از مواد پیزوالکتریک در سازه پیشنهادی استفاده شده است. ماده پیزوالکتریک استفاده شده در این سازه PZT-8 است که همانطور که قبلاً اشاره شد برای حرکات با فرکانس پایین بسیار مناسب است.

## ۲-۳- محل قرارگیری ساختار پیشنهادی

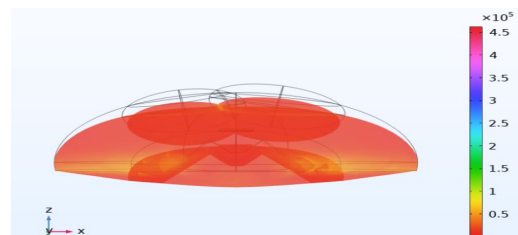
برای تبدیل هرچه بهتر انرژی مکانیکی حاصل از حرکت عمودی دیافراگم و تحریک بیشتر لایه پیزوالکتریک، فنری به قسمت پایینی عضله وصل شده و با جابجایی آن لایه پیزوالکتریک نیز فشرده و جابجا می‌شود. به همین منظور لایه‌های پیزوالکتریک را ثابت در نظر گرفته می‌شود. شکل (۲) نحوه قرارگیری ساختار پیشنهادی برداشت‌کننده انرژی را نشان می‌دهد.



شکل (۲): قرارگیری ساختار پیشنهادی



(الف)



(ب)

شکل (۳): (الف) استرس عضلانی دیافراگم. (ب) مقدار استرس

## ۳- نتایج

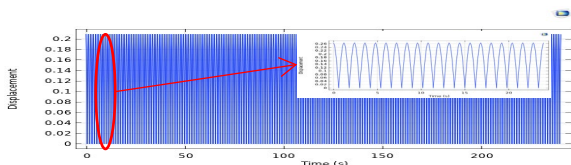
به منظور بررسی دقیق‌تر و نتایج قابل اعتمادتر، شبیه‌سازی در ۱۰۰ بازه زمانی انجام شده است. اولین نتیجه‌ای که بررسی شده است ارزیابی توزیع و میزان تنش روی عضله دیافراگم است که به ترتیب در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. در واقع نمودار اول میزان تنش را در تمام نقاط عضله دیافراگم نشان می‌دهد. توزیع تنش مورد دیگری که مورد بررسی قرار گرفته است جابجایی لایه پیزوالکتریک است که در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. شکل (۳-ب) نیز میزان تنش روی لایه پیزوالکتریک را نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً ذکر شد، ساختار طراحی شده با تحریک و اعمال نیرو بر روی لایه پیزوالکتریک، ولتاژ تولید می‌کند.

شکل (۳-الف) نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی می‌تواند حدود ۱.۵ ولت در سیکل مثبت و ۲.۵ ولت در چرخه منفی تولید کند. در شکل (۳-ب) توزیع انرژی الکتریکی روی لایه پیزوالکتریک را می‌بینیم. لازم به ذکر است تمامی نتایج با استفاده از نرم افزار COMSOL Multiphysics و رعایت حداکثر شرایط مرزی به دست آمده است. برای طراحی دستگاه برداشت انرژی، از مواد پیزوالکتریک PZT-8 و برای لایه‌های زیرین و فنر، از سیلیکون استفاده شده که ممکن است

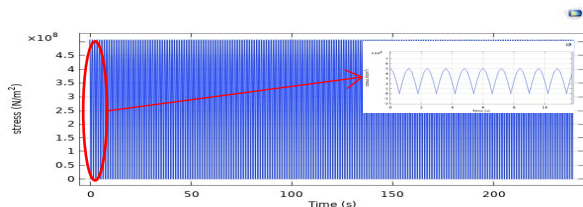
برای شبیه‌سازی حرکت این عضله از اعمال نیروی سینوسی استفاده شده است که مشخصاً به فرکانس تنفس نزدیک است. تنفس طبیعی یک فرد بالغ حدود ۲۰-۱۲ بار در دقیقه است. اندازه دامنه در نظر گرفته شده از معادلات زیر به دست می‌آید [۱۶].

$$T = 60 / n \quad (1)$$

$$f = 1 / T \quad (2)$$

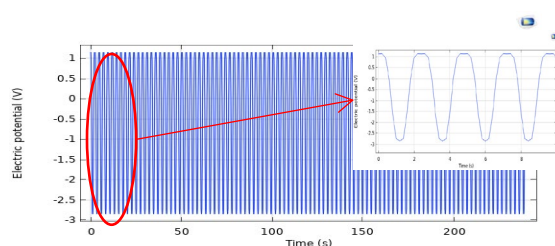


(الف)

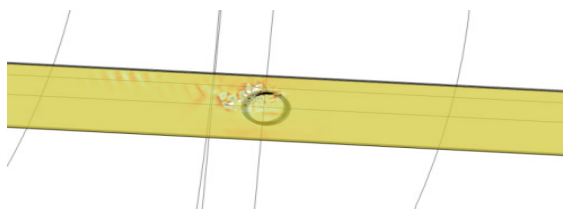


(ب)

شکل (۴): لایه پیزوالکتریک (الف) جا به جای (ب) تنش



(الف)



(ب)

شکل (۵): پتانسیل الکتریکی. (الف) کمیت پتانسیل الکتریکی (ب) توزیع پتانسیل الکتریکی

برای سلامت اندام‌های داخلی بدن خطرناک باشد، بنابراین باید سازه را با مواد زیستی، مواد سازگار مانند PVDF<sup>۱</sup> پوشاند. برای درک بهتر از میزان انرژی برداشت شده توسط این برداشتگر جدول (۳) ارائه شده است. در واقع این جدول مقایسه روش‌هایی است که برای برداشت انرژی الکتریکی از اندام‌های داخلی استفاده شده است. این تفاوت‌ها در میزان خروجی عموماً مربوط به مواد پیزوالکتریک و محل برداشتگر و ساختار کلی دستگاه برداشت انرژی است. تلاش‌های زیادی در این راستا صورت گرفته که همگی برای تکمیل نیاز به آزمایش‌های بالینی بسیار دقیق‌تری دارند. اغلب آزمایشات و تحقیقات با هدف کمک به سلامت انسانی انجام شده است. در این مقاله سعی شد با رعایت حداکثری شرایط درون بدن انسان شبیه‌سازی انجام شود تا بتوان تخمین نسبتاً دقیق از عملکرد این تجهیز درون بدن را ارائه کرد. فارغ از اینکه سایر طرح‌هایی که برای برداشت انرژی پیشنهاد شده‌اند اغلب دارای ساختار مکانیکی بسیار ساده‌تر هستند [۲۲]، در این تحقیق با در نظر گرفتن یک ساختار متفاوت سعی بر این بوده است که بیشترین برداشت انرژی از حرکت انقباضی ماهیچه حاصل شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

دستگاه‌های قابل جای‌گذاری در بدن کمک فراوانی به بهبود سلامتی بیماران کرده‌اند و روز به روز اهمیت و کاربرد بیشتری پیدا می‌کنند. با توجه به نیاز تجهیزات قابل کاشت به منبع انرژی، در این مقاله روش جدیدی برای برداشت انرژی از حرکت انقباضی عضله دیافراگم ارائه شده است. ساختار مکانیکی پیشنهادی انرژی حاصل از حرکت دیافراگم را از طریق فنر سیلیکونی به لایه پیزوالکتریک منتقل می‌کند. ساختار پیشنهادی ما توانایی دارد که تا در سیکل مثبت حدوداً یک ولت و در سیکل منفی نیز در حدود ۲/۵ ولت انرژی پتانسیل الکتریکی تولید کند، میزان جا به جایی لایه پیزوالکتریک حاصل از تحریک توسط فنر ۰.۲ میلی‌متر بوده است.

جدول (۳): مقایسه روش‌های برداشت انرژی

Structure type	Harvester material	Harvesting source	Max voltage (V)
Helical [4]	Pvdf-Trfe	The ventricle of the human heart	0.4 volts
Nanofiber [18]	Pvdf-Trfe	SD rat	0.006 volts
Multilayer [19]	PZT	Bovine heart	4 volts
Nano wire [17]	Zno	Rat heart	0.1 volts
Single crystal [20]	Pb	Porcine heart	3.8 volts
Hydrogels [21]	PAN-PVDF	vocal cord vibration	0.2 m volts
Onelayer-spring(Proposed structure)	PZT-8	Human Diaphragm muscle	2.5 volts

<sup>۱</sup> Polyvinylidene fluoride

#### مراجع

- [1] L. Huang *et al.*, "Fiber-Based Energy Conversion Devices for Human-Body Energy Harvesting," *Advanced Materials*, vol. 32, no. 5, p. 1902034, Jun. 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201902034>.
- [2] N. Wu, B. Bao, and Q. Wang, "Review on engineering structural designs for efficient piezoelectric energy harvesting to obtain high power output," *Engineering Structures*, vol. 235, p. 112068, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112068>.
- [3] C. B. Williams and R. B. Yates, "Analysis of a micro-electric generator for microsystems," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 52, no. 1-3, pp. 8-11, Mar. 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(96\)80118-x](https://doi.org/10.1016/0924-4247(96)80118-x).
- [4] S. Mohammadi, K. Cheraghi, and A. Khodayari, "Piezoelectric vibration energy harvesting using strain energy method," *Engineering Research Express*, vol. 1, no. 1, p. 015033, Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ab3f0c>.



- doi:  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.832.511>.
- [20] J. Chen *et al.*, "Novel pyroelectric single crystals PIN-PMN-PT and their applications for NDIR gas detectors," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 63, no. 1, pp. 01SP20–01SP20, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.35848/1347-4065/acfcc4>.
- [21] B Upendra, B Panigrahi, K. Singh, and GR Sabareesh, "Recent advancements in piezoelectric energy harvesting for implantable medical devices," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 35, no. 2, pp. 129–155, Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.1177/1045389x231200144>.
- [22] Nabiollah Shiri, Hadi Veladi, and Hanieh NiroomOscuii, "A New Rotational Stepwise Mechanical Energy Harvester for Biomedical Implants," *Sensors and materials*, vol. 30, no. 6, pp. 1319–1319, Jun. 2018, doi: <https://doi.org/10.18494/sam.2018.1740>.
- [5] E. M. Qureshi, X. Shen, and J. Chen, "Vibration control laws via shunted piezoelectric transducers: A review," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, vol. 15, no. 1, pp. 1–19, Mar. 2014, doi: <https://doi.org/10.5139/ijass.2014.15.1.1>.
- [6] C. Dagdeviren *et al.*, "Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, no. 5, pp. 1927–1932, Jan. 2014, doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1317233111>.
- [7] H. Lee, S. Sherrit, L. Tosi, P. Walkemeyer, and T. Colonijs, "Piezoelectric Energy Harvesting in Internal Fluid Flow," *Sensors*, vol. 15, no. 10, pp. 26039–26062, Oct. 2015, doi: <https://doi.org/10.3390/s151026039>.
- [8] C. Lu, V. Raghunathan, and K. Roy, "Efficient Design of Micro-Scale Energy Harvesting Systems," *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 1, no. 3, pp. 254–266, Sep. 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/jetcas.2011.2162161>.
- [9] Y. Liu *et al.*, "Piezoelectric energy harvesting for self-powered wearable upper limb applications," *Nano Select*, Feb. 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/nano.202000242>.
- [10] J. Tian *et al.*, "Self-powered implantable electrical stimulator for osteoblasts' proliferation and differentiation," *Nano Energy*, vol. 59, pp. 705–714, May 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.02.073>.
- [11] N. Sezer and M. Koç, "A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting," *Nano Energy*, vol. 80, no. 105567, p. 105567, Feb. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105567>.
- [12] N. Wu, B. Bao, and Q. Wang, "Review on engineering structural designs for efficient piezoelectric energy harvesting to obtain high power output," *Engineering Structures*, vol. 235, p. 112068, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112068>.
- [13] H. Liang, G. Hao, and O. Z. Olszewski, "A review on vibration-based piezoelectric energy harvesting from the aspect of compliant mechanisms," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 331, p. 112743, Nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112743>.
- [14] K. A. Cook-Chennault, N. Thambi, and A. M. Sastry, "Powering MEMS portable devices—a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems," *Smart Materials and Structures*, vol. 17, no. 4, p. 043001, Jun. 2008, doi: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/4/043001>.
- [15] Y. Zou, L. Bo, and Z. Li, "Recent progress in human body energy harvesting for smart bioelectronic system," *Fundamental Research*, vol. 1, no. 3, pp. 364–382, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.05.002>.
- [16] A. Wang *et al.*, "Piezoelectric nanofibrous scaffolds as in vivo energy harvesters for modifying fibroblast alignment and proliferation in wound healing," *Nano Energy*, vol. 43, pp. 63–71, Jan. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.11.023>.
- [17] J. G. Wen *et al.*, "Melamine Related Bilateral Renal Calculi in 50 Children: Single Center Experience in Clinical Diagnosis and Treatment," *Journal of Urology*, vol. 183, no. 4, pp. 1533–1538, Apr. 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.juro.2009.12.040>.
- [18] C.-S. Kim, S.-K. Kim, and S. Y. Lee, "Piezoelectric properties of new PZT-PMWSN ceramic," *Materials Letters*, vol. 57, no. 15, pp. 2233–2237, Apr. 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/s0167-577x\(02\)01201-6](https://doi.org/10.1016/s0167-577x(02)01201-6).
- [19] T. Adam and U. Hashim, "COMSOL Multiphysics Simulation in Biomedical Engineering," *Advanced Materials Research*, vol. 832, pp. 511–516, Nov. 2013,



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



# Design and Experimental Verification of a Dual-Band 4G LTE/5G Antenna for 2.6 GHz and 3.5 GHz Frequency Bands

Amir Rezagholi<sup>1\*</sup>, Hossein Zargar<sup>2</sup>, Iran Sarafraz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Electrical Engineering Department, Zand Institute of Higher Education, Shiraz, Iran

[amir.rezagholi@shirazu.ac.ir](mailto:amir.rezagholi@shirazu.ac.ir)

<sup>2</sup> Radio Communications Group, ICT Research Institute (ITRC), Tehran, Iran

[h.zargar@itrc.ac.ir](mailto:h.zargar@itrc.ac.ir)

<sup>3</sup> PhD Student, Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

[ideh.sarafraz@gmail.com](mailto:ideh.sarafraz@gmail.com)

## Abstract:

Building upon 4G LTE, 5G NR establishes the foundation for enhanced mobile broadband, including more capacity for wireless users, improved links among users (less lag time and network loss), and enhanced data rates. n38 (2600 MHz), n48 (3500 MHz), and n78 (3500 MHz) 5G NR bands are among the most commonly tested and deployed 5G frequency bands due to their relatively common availability. Dual-band or multi-band antennas are the key requirements of 5G coexistence with 4G. Since slots make patch antennas smaller and more low-cost, slot-patch antennas are extremely attractive to be used in 4G/5G dual-band or multi-band applications. In this paper, we have demonstrated a dual-band 4G LTE/5G NR slot-patch antenna for 2.6 GHz (for both 4G LTE and 5G NR) and 3.5 GHz (for 5G NR) frequency bands, and successfully verified its performance experimentally. A very good agreement can be seen between simulations and experimental results.

**Keywords:** 4G LTE, 5G NR, Multi-band antenna, Patch antenna, Slot.

JCDSA, Vol. 2, No. 5, Spring 2024

Received: 2023-12-25

Online ISSN: 2981-1295

Accepted: 2024-05-12

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

Published: 2024-06-13

## CITATION

Rezagholi, A., et. al., " Design and Experimental Verification of a Dual-Band 4G LTE/5G Antenna for 2.6 GHz and 3.5 GHz Frequency Bands ", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 2, No. 5, pp. 52-58, 2024.

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

## 1- Introduction

By Q3 2023, more than 11.7 billion mobile connections, including cellular IoT, and nearly 5.6 billion unique mobile subscribers are reported [1-2], and it is expected to reach 6.3 billion unique mobile subscribers in 2030 [1-3]. There will be also more than 600 million new subscribers by 2025 [1-2]. Global mobile data usage will also grow almost fourfold by 2025 [1-2]. Other reports show the same growth [4-7]. Mobile computing with wireless communications has already changed how people socialize and how companies do business. Early examples of this exciting future include virtual and augmented reality, autonomous driving, smart cities, wearable computers, connected devices, and on-demand video [8]. The available spectrum has a major impact on how a network's maximum capacity and coverage are defined [9]. Some services depend on ultra-low latency capabilities, while others need superfast download speeds. Some need highly localized connectivity, while others need nationwide connectivity. Each of these examples needs different spectrum and network resources [6-7]. The aggregation of the different spectrum bands from sub-1 GHz to mm-waves provides the best combination of coverage, capacity and user data rates. An important feature of the 3GPP<sup>1</sup> Release 15 standard resides in the ability for LTE<sup>2</sup> and NSA<sup>3</sup> 5G NR<sup>4</sup> to coexist and share the same low frequency bands without having to fully free those bands from LTE use [10-11]. The IMT<sup>5</sup>-2020 Vision (Recommendation ITU<sup>6</sup>-R M.2083) includes three usage scenarios for NSA 5G NR, as shown in Fig. 1 [11-12].

The mid-band frequencies meet the needs of wide area coverage and data rates of up to a few Gbps [13-14]. Higher frequency bands in 5G will provide capacity with smaller cells, and lower bands will provide coverage with larger cells [14]. ITU-R has identified the 2500-2690 MHz as a global band for IMT and this was formally included in the Radio Regulations in accordance with Resolution 223 (Rev.WRC-15) [11-15]. 3400-3600 MHz (formally known as 3.5 GHz band) is harmonized in the Radio Regulations, and the use of 3300-4200 MHz for mobile broadband is the subject of harmonization activity from 2003 [14-17]. As multi-band operation is the key requirement of 5G, a single antenna is highly desirable if it can operate at different 5G bands, especially if they are common to 4G [18], and may provide an alternative to large-bandwidth planar antennas, in applications with operation at two separate bands. Various dual-band or even tri-band antenna designs can be found in the literature for different frequency bands, which most of them are for GSM<sup>7</sup>, DCS<sup>8</sup>, UMTS<sup>9</sup>, Bluetooth, WLAN<sup>10</sup>, WiMAX<sup>11</sup>, or satellite communications [19-22]. For dual-band/tri-band 5G designs, most of the work has been done for high-

band (mm-Wave) frequencies, in which 28/38 GHz and 38/60 GHz combinations seem to be the most favored [23-29]. However, some designs can be found on dual-band 4G/5G applications, which is the case of our interest. Ojaroudi proposed double-element square-ring slot radiators located on the corners and fed by a microstrip-line for a multi-band antenna array for 2.5–2.7 GHz, 3.45–3.8 GHz, and 5.00–5.45 GHz [30]. Ojaroudi proposed eight identical PIFA elements placed at different edge corners of the handset mainboard operating at 2.5–2.7 GHz, 3.4–3.75 GHz, and 5.6–6 GHz [31]. Yang proposed a compact wideband printed antenna which can provide three wide operating bandwidths over 685–1012 MHz, 1596–2837 MHz, and 3288–3613 MHz for 4G/5G/WLAN communication systems [32]. In this paper, a dual-band 4G LTE/5G NR patch antenna based on L-shaped slots is proposed for n38 (2600 MHz), n48 (3500 MHz), and n78 (3500 MHz) 5G NR bands. These bands are among the most commonly deployed 5G frequency bands due to their common availability.

The paper is structured as follows. Different methods of achieving multi-band performance as well as L-shaped slots are described in the 2nd section. Our design method based on L-shaped slots is presented in the 3rd section, and finally, the simulations and measurements results are summarized and compared in the 4th section. The conclusions are stated at the end.

## 2- Dual-band Patch Antennas based on L-Shaped Slots

Conventional techniques to achieve dual-band operation are orthogonal modes, multiple patches, and reactive loadings [33]. By using multiple patches, the dual-band operation is achieved through multiple radiating elements [33]. This method does not seem to be a suitable method for our case, since the achieved frequency ratio is practically above 1.5 in most cases, while in our case, the frequency ratio is  $3.5/2.6 = 1.346$ .

Another popular technique for obtaining frequency ratios below (as well as above) 1.5 is introducing reactive loadings such as connecting stubs or introducing additional resonant lengths [33]. Exploiting capacitive and inductive effects through U-shaped or L-shaped slots also results in two resonant frequencies [24-25]. With these L-shaped slots close to the edges, as shown in Fig. 2, widening the L3 gap between slots increases the first resonant frequency, while widening the L1 gap between slots increases the second resonant frequency [24-25].

<sup>1</sup> 3rd Generation Partnership Project

<sup>2</sup> Long-Term Evolution

<sup>3</sup> Non-Standalone

<sup>4</sup> New Radio

<sup>5</sup> International Mobile Telecommunications

<sup>6</sup> International Telecommunication Union (ITU)

<sup>7</sup> Global System for Mobile Communications

<sup>8</sup> Digital Communication System

<sup>9</sup> Universal Mobile Telecommunications Service

<sup>10</sup> Wireless Local-Area Network

<sup>11</sup> Worldwide Interoperability for Microwave Access





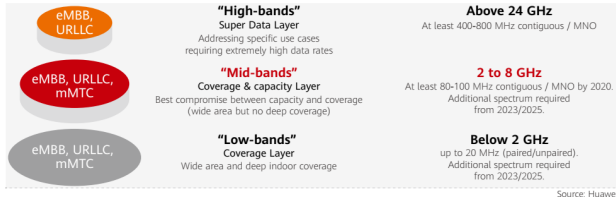


Fig. 1. Multi-layer frequency band for NSA 5G NR usage scenarios. 2-6 GHz is mentioned as mid-band in [13].

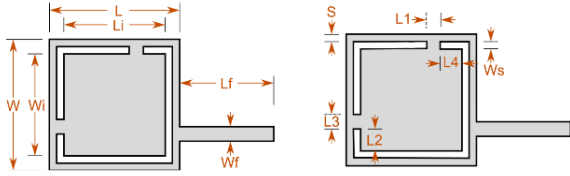


Fig. 2. L-shaped slots close to the edges of the patch to achieve dual-band behavior



Fig. 3. The PTFE Teflon substrate specifications

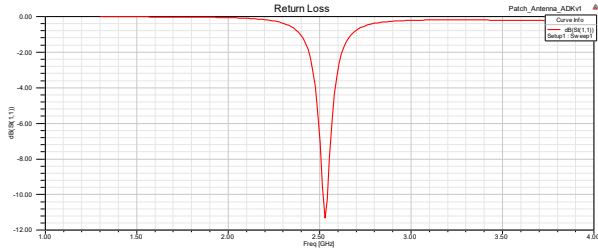


Fig. 4. S<sub>11</sub> parameter of the proposed single-band rectangular patch antenna for 2.6 GHz

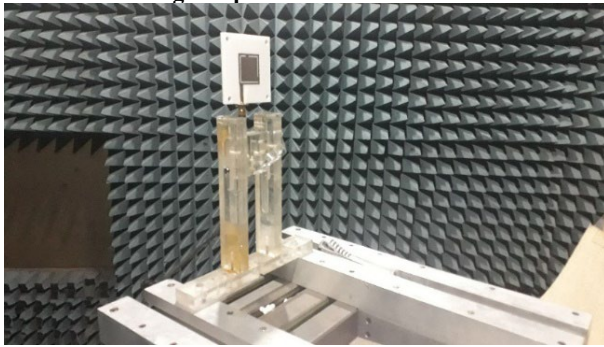


Fig. 5. Radiation pattern measurement of the proposed 4G/5G dual-band antenna

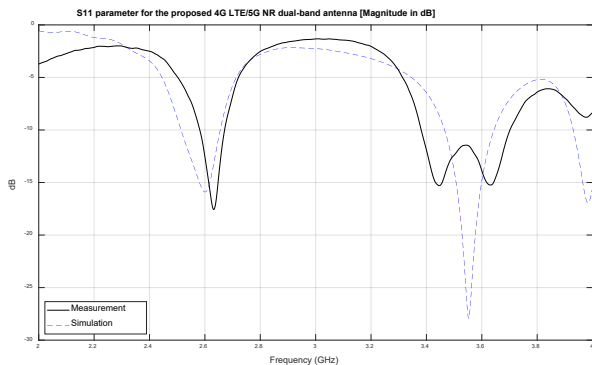


Fig. 6. Comparison of measured S<sub>11</sub> with simulation results

TABLE 1. Design parameters (in mm) of the proposed dual-band antenna

Parameter	$W_f$	$L_f$	$L$	$L_i$	$W$	$W_i$	$l_{slot1}$
Value (mm)	5	16.17	33.43	26.96	33.43	26.96	55
Parameter	$l_{slot2}$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$W_s$	$S$
Value (mm)	35.88	8	8	0.918	0.026	1.078	2.157

TABLE 2. The electrical length of the proposed antenna compared with some similar works

Paper	Antenna dimensions	Patch dimensions
Ojaroudi et al., 2019	$1.36\lambda_g \times 1.36\lambda_g$	$0.32\lambda_g \times 0.32\lambda_g$
Manteghi and Rahmat-Samii, 2007	$1.71\lambda_g \times 0.85\lambda_g$	$0.27\lambda_g \times 0.17\lambda_g$
Ojaroudi et al., 2020	$2.7\lambda_g \times 1.36\lambda_g$	$0.61\lambda_g \times 0.52\lambda_g$
<b>Our proposed antenna</b>	$0.91\lambda_g \times 0.91\lambda_g$	$0.42\lambda_g \times 0.42\lambda_g$

TABLE 3. The fractional bandwidth of the proposed antenna compared with others

Paper	First resonance	Second resonance
Ojaroudi et al., 2019	7.69%	9.59%
Manteghi and Rahmat-Samii, 2007	4.08%	3.81%
Ojaroudi et al., 2020	7.69%	9.79%
<b>Our proposed antenna</b>	3.42%	9.16%

### 3- Dual-band Antenna Design Procedures

To build an antenna supporting both 2.6 GHz and 3.5 GHz frequency band for 4G LTE and 5G NR, a rectangular patch antenna with two slots is considered. Since the lower resonant frequency determines the dimensions of the antenna, Ansoft HFSS Antenna Design Kit recommends a  $45.61 \times 38.11 \text{ mm}^2$  rectangular patch on top of a PTFE<sup>1</sup> substrate, shown in Fig. 3, with  $\epsilon_r = 2.1$ ,  $\tan \delta = 2 \times 10^{-4}$ , and  $H = 5.14 \text{ mm}$  for 2.6 GHz which is fed by a 4.852 mm-thick strip line at the edge.

These dimensions and specifications are in complete agreement with patch design formulas [34]. The S<sub>11</sub> parameter of such single-band patch antenna is shown in Fig. 4. As seen, the desired resonant frequency of 2.6 GHz has shifted to the left and has a very low 10 dB depth. Since the two L-shaped slots introduce LC resonances [24-25], the resonant frequency of the patch increases and hence, the dual-band patch can be designed in smaller dimensions. The initial length of each slot is half of its corresponding resonance wavelength [24-25]. Hence, the two lengths are initially:

$$l_{slot1} = \lambda_1 / 2 = 57.7 \text{ mm} \tag{1}$$

$$l_{slot2} = \lambda_2 / 2 = 42.8 \text{ mm}$$

in which  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$  are resonance wavelengths. As mentioned in Section 2, the width of the gap between slots can control the first and second resonance frequencies. The final dimensions of the proposed dual-band antenna, as shown in Fig. 2, are listed in Table 1.

<sup>1</sup> Polytetrafluoroethylene

## 4- Results and Discutions

The comparison of  $S_{11}$  and radiation pattern measurements, shown in Fig. 5, with simulations results are shown in Figs. 6-8. As Fig. 6 shows, the proposed dual-band antenna has a typical 6 dB bandwidth of 182.545 MHz for 2.6 GHz band and 503.861 MHz for 3.5 GHz band. However, for the strict 10 dB criteria, the bandwidths are 89.5509 MHz and 320.496 MHz, respectively. With a little approximation for 6 dB bandwidth, the 3.5 GHz frequency band can be extended up to more than 4.1 GHz and this increases the bandwidth to more than 700-800 MHz. As Fig. 6 shows, the proposed dual-band antenna has a typical 6 dB bandwidth of 182.545 MHz for 2.6 GHz band and 503.861 MHz for 3.5 GHz band. However, for the strict 10 dB criteria, the bandwidths are 89.5509 MHz and 320.496 MHz, respectively. With a little approximation for 6 dB bandwidth, the 3.5 GHz frequency band can be extended up to more than 4.1 GHz and this increases the bandwidth to more than 700-800 MHz. The electrical equivalent size and the fractional (10 dB) bandwidth of the proposed dual-band antenna is compared with some similar works in Tables 2 and 3, respectively, in which  $\lambda_g$  is the guided-wavelength and takes the different used substrates into account.

As seen in Table 2, our design has a very good specification among other designs, especially for antenna's total dimensions. Also, it can be seen in Table 3 that the second fractional bandwidth is among the best values obtained from other designs. The radiation pattern of the proposed antenna is shown in Figs. 7-8 for the two principal planes. As seen, the proposed antenna has a broad beam and the HPBW (Half-Power Beam Width, also known as 3 dB beam width) is  $\sim 80^\circ$  at both resonances. The comparison of radiation patterns (ignoring the back-lobe radiations) for the proposed dual-band L-shaped slot antenna with (ideal) single-band 2.6 GHz patch antenna is shown in Fig. 9. The similarity of both radiation patterns is very interesting. Fig. 9 shows that, in fact, the two L-shaped slots have not very strong effect on the radiation pattern, but have actually made the single-band patch antenna to work dual-band. The proposed dual-band antenna has 86% and near 90% radiation efficiency, and 83% and 86% total efficiency for 2.6 GHz and 3.5 GHz bands, respectively, as shown in Figs. 10-11. The current densities on the patch are shown in Figs. 12-13. As seen in Fig. 12, the 2.6 GHz current density covers the entire patch, which confirms the initial design procedure of the patch dimensions for 2.6 GHz frequency, and higher values of the current density can be seen around both slots. However, as seen in Fig. 13, the current density reduces dramatically on the patch for 3.5 GHz band, and its higher values focuses mainly around the shorter slot, whose dimensions are exactly calculated for 3.5 GHz resonance. These two figures clearly demonstrate the reason for dual-band behavior of the proposed antenna.

## 5- Conclusion

In this paper, we demonstrated the dual-band behavior of a rectangular patch antenna with two L-shaped slots placed on top of a PTFE substrate with  $\epsilon_r = 2.1$  for operation in

2.6 GHz and 3.5 GHz, as the two harmonized frequency bands in worldwide. The proposed dual-band antenna has a typical 6 dB bandwidth of 182.545 MHz for 2.6 GHz band and 503.861 MHz for 3.5 GHz band. However, for the strict 10 dB criteria, the bandwidths are 89.5509 MHz and 320.496 MHz, respectively, which fulfill the minimum technical requirements of ITU to meet the IMT-2020 criteria. The proposed antenna has a broad beam and its HPBW is  $\sim 80^\circ$  at both resonances. Comparisons of results show very good agreements between measurements and simulations.

## Acknowledgment

The authors would wish to thank Mr. R. Bahri (Head of Radio Communications Group) from ICT Research Institute, Mr. A.A. Faraj-Zadeh from Nasooz Sanat Apadana (<http://nsapadana.ir>), Mr. M.H. Alighanbari, Mr. Tayyebi from Raad Sanat, Mr. A. Abbasi from Zarrin-Hak (<http://www.zarrinhak.com>), and Eng. Rezayati and Eng. Akhlagh Pasand from ICT Research Institute for their great help and support of this work, and wish them all the best.

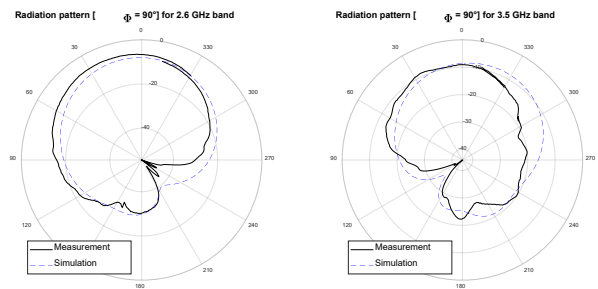


Fig. 7. Comparison of  $\phi = 90^\circ$  radiation pattern measurements with simulations

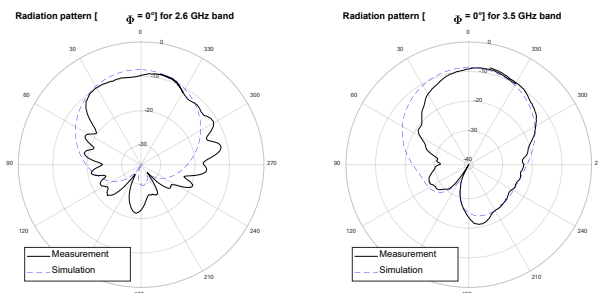


Fig. 8. Comparison of  $\phi = 0^\circ$  radiation pattern measurements with simulations

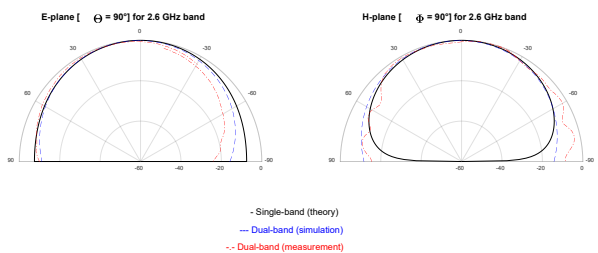
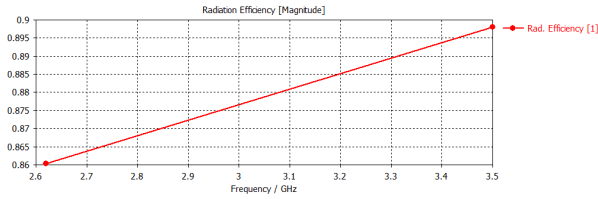
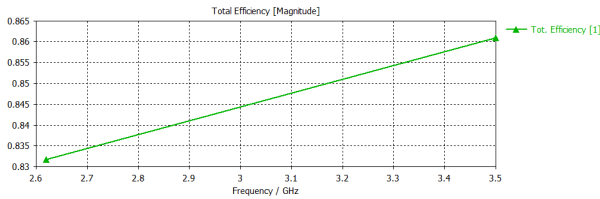


Fig. 9. Comparison of radiation patterns (ignoring the back-lobe radiations) for the proposed dual-band L-shaped slot antenna with (ideal) single-band patch antenna

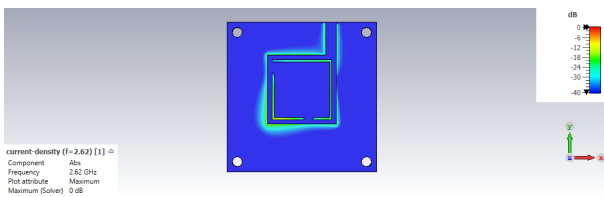




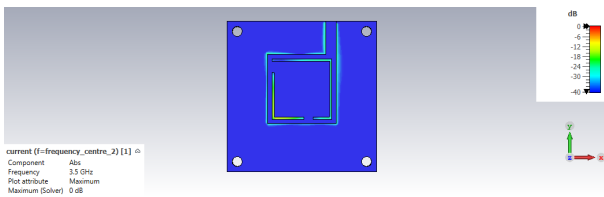
**Fig. 10. Radiation efficiencies for the proposed dual-band antenna**



**Fig. 11. Total efficiencies for the proposed dual-band antenna**



**Fig. 12. Current density (calculated for maximum field amplitude) for 2.6 GHz band**



**Fig. 13. Current density (calculated for maximum field amplitude) for 3.5 GHz band**

## References

[1] GSMA. (2023). The Mobile Economy 2023. London, UK. <https://www.gsma.com/mobileeconomy/wpcontent/uploads/2023/03/270223-The-Mobile-Economy-2023.pdf>

[2] GSMA. (2023). GSM Association: <https://www.gsmaintelligence.com/data/>

[3] 5G Americas. (2021). 3GPP Releases 16 & 17 and beyond. Bellevue, Washington, USA. <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2021/01/InDesign-3GPP-Rel-16-17-2021.pdf>

[4] Cisco. (2020). Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. San Jose, California, USA. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf>

[5] Ericsson. (2018). The 5G consumer business case: Revision A. Stockholm, Sweden.

[6] 5G Americas. (2017). LTE to 5G: Cellular and Broadband Innovation. Bellevue, Washington, USA. [http://www.5gamericas.org/wpcontent/uploads/2019/07/2017\\_5G\\_Americas\\_Rysavy\\_LTE\\_5G\\_Innovation\\_Final\\_for\\_Upload\\_v2.pdf](http://www.5gamericas.org/wpcontent/uploads/2019/07/2017_5G_Americas_Rysavy_LTE_5G_Innovation_Final_for_Upload_v2.pdf)

[7] 5G Americas. (2018). LTE to 5G: The Global Impact of Wireless Innovation. Bellevue, Washington, USA. [http://www.5gamericas.org/wpcontent/uploads/2019/07/2018\\_5G\\_Americas\\_Rysavy\\_LTE\\_to\\_5G\\_The\\_Global\\_Impact\\_of\\_Wireless\\_Innovation\\_final.pdf](http://www.5gamericas.org/wpcontent/uploads/2019/07/2018_5G_Americas_Rysavy_LTE_to_5G_The_Global_Impact_of_Wireless_Innovation_final.pdf)

[8] GSMA. (2022). 5G Spectrum Positions Offer a Roadmap for Regulators. London, England, UK. <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2022/07/5G-Spectrum-Positions.pdf>

[9] Nokia. (2017). 5G deployment below 6 GHz: Ubiquitous coverage for critical communication and massive IoT. Espoo, Finland.

[10] GSMA. (2019). The 5G Guide: A Reference for Operators. London, England, UK. [https://www.gsma.com/wp-content/uploads/2019/04/The-5G-Guide\\_GSMA\\_2019\\_04\\_29\\_compressed.pdf](https://www.gsma.com/wp-content/uploads/2019/04/The-5G-Guide_GSMA_2019_04_29_compressed.pdf)

[11] Huawei. (2020). 5G Spectrum: Public Policy Position. Shenzhen, Guangdong, China. [https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/publicpolicy/public\\_policy\\_position\\_5g\\_spectrum\\_2020\\_v2.pdf?la=en](https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/publicpolicy/public_policy_position_5g_spectrum_2020_v2.pdf?la=en)

[12] ITU. (2015). Recommendation ITU-R M.2083-0: IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. United Nations Economic and Social Council. Geneva, Switzerland. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf)

[13] Huawei. (2019). New 5G, New Antenna. Shenzhen, Guangdong, China. <https://carrier.huawei.com/~media/CNBGV2/download/products/antenna/New-5G-New-Antenna-5G-Antenna-White-Paper-v2.pdf>

[14] GSMA. (2021). 3.5 GHz in the 5G Era: Preparing for New Services in 3.3-4.2 GHz. London, England, UK. <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2021/02/3.5-GHz-for-5G.pdf>

[15] ITU. (2015). Final Acts WRC-15. United Nations Economic and Social Council. Geneva, Switzerland. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.12-2015-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.12-2015-PDF-E.pdf)

[16] GSMA. (2021). WRC-23 IMT Agenda Items Overview. London, England, UK. <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2021/03/WRC-23-IMT-Agenda-Item-Overview-Map.pdf>

[17] ITU. (2019). Resolution 811 (WRC-19): Agenda for the 2023 world radiocommunication conference. United Nations Economic and Social Council. Geneva, Switzerland. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/oth/0c/0a/R0COA00000D0041PDFE.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0c/0a/R0COA00000D0041PDFE.pdf)

[18] GSMA. (2020). Roadmaps for awarding 5G spectrum in the MENA region. London, England, UK. <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2020/10/Roadmaps-for-awarding-5G-spectrum-in-the-MENA-region.pdf>

[19] M. Farias *et al.*, “2.4–5.8 GHz dual-band patch antenna with FSS reflector for radiation parameters enhancement,” *AEÜ. International journal of electronics and communications*, vol. 108, pp. 235–241, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.06.021>.

[20] W. Kwak, S. Park, and J. Kim, “A Folded Planar Inverted-F Antenna for GSM/DCS/Bluetooth Triple-Band Application,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 18–21, Dec. 2006, doi: <https://doi.org/10.1109/lawp.2005.863617>.

[21] M. Manteghi and Y. Rahmat-Samii, “A novel miniaturized triband PIFA for MIMO applications,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 49, no. 3, pp. 724–731, Jan. 2007, doi: <https://doi.org/10.1002/mop.22239>.

[22] N. Ojaroudi, N. Ghadimi, Y. Ojaroudi, and S. Ojaroudi, “An omnidirectional PIFA for downlink and uplink satellite applications in C-band,” *Microwave and optical technology letters*, vol. 56, no. 11, pp. 2684–2686, Aug. 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/mop.28672>.

[23] A. Abdelaziz and E. K. I. Hamad, “Design of a Compact High Gain Microstrip Patch Antenna for Tri-Band 5 G Wireless Communication,” *Frequenz*, vol. 73, no. 1–2, pp. 45–52, Jan. 2019, doi: <https://doi.org/10.1515/freq-2018-0058>.



- [24] Hanieh Aliakbari, Abdolali Abdipour, Rashid Mirzavand, A. Costanzo, and P. Mousavi, "A single feed dual-band circularly polarized millimeter-wave antenna for 5G communication," Apr. 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/eucap.2016.7481318>.
- [25] El Shorbagy, M., Shubair, R. M., AlHajri, M. I., & Mallat, N. K. (2016, November). On the design of millimetre-wave antennas for 5G. In *2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)* (pp. 1-4). IEEE. DOI: 10.1109/MMS.2016.7803878
- [26] O. M. Haraz, M. A. Ali, Ayman Elboushi, and Abdel-Razik Sebak, "Four-element dual-band printed slot antenna array for the future 5G mobile communication networks," Jul. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/aps.2015.7304386>.
- [27] H. M. Marzouk, M. I. Ahmed, and A.-E. H. Shaalan, "NOVEL DUAL-BAND 28/38 GHZ MIMO ANTENNAS FOR 5G MOBILE APPLICATIONS," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 93, pp. 103–117, 2019, doi: <https://doi.org/10.2528/pierc19032303>.
- [28] Marzouk, H. M., Ahmed, M. I., & Shaalan, A. H. A. (2019). Novel dual-band 28/38 GHz MIMO antennas for 5G mobile applications. *Progress In Electromagnetics Research C*, 93, 103-117.. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888799
- [29] M. H. Sharaf, A. I. Zaki, R. K. Hamad, and M. M. M. Omar, "A Novel Dual-Band (38/60 GHz) Patch Antenna for 5G Mobile Handsets," *Sensors*, vol. 20, no. 9, p. 2541, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20092541>.
- [30] N. Ojaroudi Parchin, H. Jahanbakhsh Basherlou, Y. I. A. Al-Yasir, A. Ullah, R. A. Abd-Alhameed, and J. M. Noras, "Multi-Band MIMO Antenna Design with User-Impact Investigation for 4G and 5G Mobile Terminals," *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 456, Jan. 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/s19030456>.
- [31] N. Ojaroudi Parchin, H. Jahanbakhsh Basherlou, and R. A. Abd-Alhameed, "Design of Multi-Mode Antenna Array for Use in Next-Generation Mobile Handsets," *Sensors*, vol. 20, no. 9, p. 2447, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20092447>.
- [32] M. Yang, Y. Sun, and F. Li, "A Compact Wideband Printed Antenna for 4G/5G/WLAN Wireless Applications," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2019, p. e3209840, Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1155/2019/3209840>.
- [33] J. C. Saturday, K. M. Udofia, and A. J. Jimoh, "Design of Dual Band Microstrip Antenna Using Reactive Loading Technique," *DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals)*, Oct. 2016.
- [34] Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons.



**Amir Rezagholi** was born in Shiraz, Fars, Iran, in 1988, and received his B.S. degree in Electrical Engineering, M.Sc. degree in Fields Communication Engineering, and PhD degree in Fields Communication Engineering in 2011, 2013, and 2020, respectively, all from Shiraz University, Shiraz, Iran. He has published several technical papers and proceeding articles, and his research interests include mobile technologies, fractal antennas, optimization algorithms, plasma applications in microwave and antenna design, and artificial intelligence (AI).



**Hossein Zargar** was born in Koor, Isfahan, Iran, in 1985. He received the B.E. degree from Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, in 2007, and the M.E. degree from Tehran University, Tehran, Iran, in 2010, Ph.D. degree from Sharif University, Tehran, Iran in 2015 all in electrical engineering. Since 2019, he has been a member of the faculty with the IRAN Telecommunication Research Center (ITRC). His main interests include power amplifier behavioral modeling and microwave circuits design, mixed-signal circuit design and new radio technology development.



**Iran Sarafraz** was born in Shoosh, Khuzestan, Iran, in 1983, and received her B.S. degree from Islamic Azad University, Dezfoul Branch, Dezfoul, Iran, in Electrical Engineering and her M.Sc. degree from Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran, in System Communication Engineering, in 2006 and 2016, respectively. She is now a PhD candidate in System Communication Engineering in Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran, and her research interests include mobile technologies, image processing, sound processing, and artificial intelligence (AI).





## طراحی و تست آنتن دو بانده 4G/5G برای باندهای فرکانسی GHz ۳/۵ و GHz ۲/۶

امیر رضاقلی<sup>۱\*</sup>، حسین زرگر<sup>۲</sup>، ایران سرافراز<sup>۳</sup>

۱- استادیار، بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، موسسه آموزش عالی زند شیراز، شیراز، ایران (amir.rezagholi@shirazu.ac.ir)

۲- استادیار، گروه ارتباطات رادیویی، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران (h.zargar@itrc.ac.ir)

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران (ideh.sarafraz@gmail.com)

**چکیده:** نسل پنجم شبکه تلفن های همراه (5G NR) با تکیه بر نسل چهارم (4G LTE) خود، پایه و اساس پهنای باند بهبود یافته شامل ظرفیت بیشتر برای کاربران بی سیم، لینک های بهبود یافته بین کاربران (زمان تأخیر و تلفات کمتر) و افزایش نرخ داده را برقرار می نماید. باندهای n38 (۲۶۰۰ مگاهرتز)، n48 (۳۵۰۰ مگاهرتز) و n78 (۳۵۰۰ مگاهرتز) به دلیل در دسترس بودن نسبتاً متداول، از رایج ترین باندهای فرکانسی 5G تست شده و مستقر می باشند. آنتن های دو بانده از الزامات اصلی همزیستی 5G با 4G هستند. از آنجایی که شکاف ها، آنتن های پیچ را کوچک تر و کم هزینه تر می کنند، آنتن های پیچ شکاف دار برای استفاده در کاربردهای دو بانده 4G/5G بسیار جذاب می باشند. در این مقاله، یک آنتن پیچ شکاف دار دو بانده برای باندهای فرکانسی ۲/۶ گیگاهرتز (برای هر دو 4G LTE و 5G NR) و ۳/۵ گیگاهرتز (برای 5G NR) ارائه و پیشنهاد شده و عملکرد آن به صورت تجربی با موفقیت بررسی و تأیید شده است. توافق بسیار خوبی بین شبیه سازی ها و نتایج تجربی مشاهده می شود. **واژه های کلیدی:** 5G NR، 4G LTE، آنتن چندباند، آنتن پیچ، شکاف.





## Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA)

Volume 2, Issue 5, Spring 2024

### Papers List

<u>Number</u>	<u>Paper title/Authors</u>	<u>Page</u>
1	Dynamic modeling of clean electricity generation based on transient simulation method and response surface methodology Abbas Motallebi, seyed Ahmad Shayanniya*, Mehdi Amirmiandargh, Ebrahim Niknaghsh	1
2	Designing CNNs with effective weights using genetic algorithm for image classification Mojtaba Sajadi, Mohammad Bagher Tavakoli*, Farbod Setoudeh, Amir Hossein Salemi	16
3	Trapping polystyrene particles using plasmonic tweezers Ebrahim Fooladi, Mojtaba Sadeghi*, Zahra Adelpour, Farhad Bahadori-Jahromi	26
4	New neighborhood approaches in memetic algorithm for customer type discovery Hamed Sherafat-Moula, S.Hadi Yaghoubyan*, Raziieh Malekhosseini, Karamollah Bagherifard	34
5	Energy harvesting from diaphragm muscle using piezoelectric specification Sepehr Khalafzadeh, Farshad Pesaran*, Nabiollah Shiri	45
6	Design and Experimental Verification of a Dual-Band 4G LTE/5G Antenna for 2.6 GHz and 3.5 GHz Frequency Bands Amir Rezagholi*, Hossein Zargar, Iran Sarafraz	52



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

<b>Director-in-Charge</b>	Hamed Agahi	Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran
<b>Editor-in-Chief</b>	Taher Niknam	Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran
<b>Internal Manager</b>	Zahra Maghsoodzadeh	Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran
<b><u>Editorial Board</u></b>		
<i>Professor</i>	Taher Niknam	Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran
<i>Professor</i>	Rahim Ghayour	Shiraz University, Shiraz, Iran
<i>Professor</i>	Habibollah Abiri	Shiraz University, Shiraz, Iran
<i>Professor</i>	Hamid Khaloozadeh	K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran
<i>Professor</i>	Asghar Keshtkar	Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
<i>Professor</i>	Mohammad Bagher Menhaj	Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
<i>Professor</i>	Mohammad Naser Moghadasi	Islamic Azad University, S&R Branch, Tehran, Iran
<i>Professor</i>	Hasan Tavakoli	Baqiyatollah University of Medical Sciences, Tehran, Iran
<i>Professor</i>	Seyedebrahim Afjeii	Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
<i>Associate Professor</i>	Hamed Agahi	Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran
<i>Associate Professor</i>	Ahmad Fakharian	Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin, Iran
<i>Associate Professor</i>	Amir-Masud Eftekhari-Moghadam	Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin, Iran
<i>Associate Professor</i>	Majid Ebnali	Shahrekord University
<i>Associate Professor</i>	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

