# افزایش کارایی سیستم‌های مدولاسیون چندحاملی OFDM با تکنیک کاهش PAPR در ارسال دنباله جزئی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انتخابات

**عباسعلی شریفی*[1] و حجت امامی[2]**

[1]دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه بناب، بناب، ایران

[2]دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه بناب، بناب، ایران

## چکیده

**مدولاسیون چندحاملی تسهیم با تقسیم فرکانسی متعامد (OFDM) یک فناوری سودمند در ارتباطات بی‌سیم است که امکان ارسال اطلاعات با نرخ بالا را در کانال‌های محوشونده چندمسیری فراهم می‌سازد. در سیستم‌های OFDM، برای مدولاسیون سمبل‌ها از تعداد زیادی زیرحامل استفاده که موجب می‌شود، سیگنال ارسالی در حوزه زمان تغییرات دینامیکی زیادی داشته باشد که موجب بروز PAPR می‌شود. در این پژوهش، از روش ارسال دنباله جزئی (PTS) برای کاهش PAPR در سیستم‌های OFDM استفاده شده است. یکی از مشکلات اساسی روش PTS، پیچیدگی محاسباتی بسیار بالای آن است؛ زیرا این روش نیازمند یک جستجوی جامع بین تمام ترکیبات ممکنِ فاکتورهای فاز است. پیچیدگی محاسباتی نیز با افزایش تعداد فاکتورهای فاز و زیربلوک‌ها افزایش می‌یابد. در این پژوهش، برای غلبه بر مسأله پیچیدگی محاسباتی روش PTS، روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم انتخابات (EA) بهبود یافته پیشنهاد می‌شود که به‌اختصار EA-PTS نامیده می‌شود. الگوریتم پیشنهادی EA-PTS با جستجوی فاکتورهای فاز بهینه، پیچیدگی محاسباتی کمتری را به سیستم تحمیل کرده و مقدار PAPR را به میزان قابل قبولی کاهش می‌دهد. روش پیشنهادیEA-PTS با روش‌های PTS بهینه (O-PTS)، روش GA-PTS و ICA-PTS مقایسه شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که روش EA-PTS کارایی بهتری در کاهش همزمان PAPR و پیچیدگی محاسباتی دارد.**

**واژگان کلیدی: مدولاسیون چندحاملی OFDM، کاهش PAPR، ارسال دنباله جزئی (PTS)، الگوریتم انتخابات (EA)، الگوریتم EA-PTS**

# Increasing the Performance of OFDM Systems by PAPR Reduction in PTS Technique using Election Optimization Algorithm

**Abbas Ali Sharifi*[1] & Hojjat Emami[2]**

Department of Electrical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

Department of Computer Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

## Abstract

**Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is a useful technology in wireless communications that provides high-rate data transmission in multipath fading channels. The advantages of OFDM systems are the high spectral efficiency and strong resistance to frequency selective fading. In OFDM systems, a large number of sub-carriers are used to modulate the symbols causing the time-domain OFDM signal to have a large dynamic range, or a high peak-to-average power ratio (PAPR). When the signals are applied to a nonlinear power amplifier, the OFDM systems' performance is degraded by the high PAPR. In recent years, several works have been done to reduce the PAPR of OFDM systems. One of the most well-known methods is a partial transmit sequence (PTS). Regardless of the PTS advantages, it suffers from a high computational complexity. Because it requires an exhaustive search over all possible combinations of phase factors. The computational complexity of the PTS increases with**

* نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات

* Corresponding author

• تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۸/۳ • تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹ • تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۷/۷ • نوع مطالعه: پژوهشی



[ Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-12 ]

[ DOI: 10.52547/jsdp.19.2.13 ]

**increasing the number of phase factors and sub-blocks. There are several approaches to overcome the computation complexity issue of the PTS technique. The majority of these methods mainly employed swarm intelligence and evolutionary optimization algorithms to resolve the PTS shortcoming. These methods report encouraging results, however, their performance is far from the ideal state. This highlights that improving the performance of PTS is an open problem and there is room for more improvement. As an element of research, we propose an optimization approach based on the election algorithm (EA) to overcome the computational complexity of the PTS technique. To realize this goal, we improve the EA algorithm by introducing a new version of positive advertisements operator. The new operator efficiently improves the search capability of the EA through balancing between the exploration and exploitation power of the algorithm. The proposed EA based PTS (EA-PTS) approach, by searching the optimal phase factors, imposes less computational complexity on the system and reduces the PAPR to an acceptable level. The proposed method is compared with the optimal PTS (O-PTS), genetic algorithm-based PTS (GA-PTS) and imperialism competition algorithm based PTS (ICA-PTS) techniques. Simulation results show that the proposed EA-PTS has better performance in simultaneously reducing the PAPR and computational complexity.**

**Keywords: OFDM; PAPR; Partial Transmit Sequence (PTS); Election Algorithm (EA); EA-PTS**

## ۱- مقدمه

فناوری چندحاملی تسهیم با تقسیم فرکانسی متعامد[1] (OFDM) برای ارتباطات با نرخ بالا استفاده می‌شود. این فنّاوری در برابر محو شوندگی (Fading) چندمسیره و تداخل باند-باریک بسیار مقاوم است [1]. OFDM به‌طور عمده در سیستم‌های مخابراتی DAB[2]، DVB-T[3]، WLAN (IEEE 802.11a)، WiMax (IEEE 802.16)، ADSL و غیره استفاده می‌شود [2]؛ اما برخلاف کاربردهای همگانی OFDM، این سیستم‌ها یک ایراد اساسی دارند و آن PAPR بالای سیگنال‌های ارسالی است. PAPR درواقع نسبت بیشینه توان سیگنال به متوسط آن است. وجود پیک‌های بالا در سیگنال‌های OFDM به‌دلیل جمع‌شدن زیرحامل‌های هم‌فاز در فرستنده است. وجود این پیک‌ها موجب می‌شود که سیگنال ارسالی در حین عبور از تقویت‌کنندهٔ توان بالا[4] (HPA) برش یافته و دچار اعوجاج شود. برای رفع این مشکل نیاز به HPA با ناحیه خطی وسیع است که این نوع از تقویت‌کننده‌ها هزینه‌های بسیار زیادی را به سیستم تحمیل می‌کنند [3]. راه‌کارهای مختلفی برای کاهش مقدار PAPR پیشنهاد شده است. عمده‌ترین این روش‌ها عبارت‌اند از: برش‌دادن و فیلترکردن [4]، فشرده‌سازی غیرخطی[5] [5]، پیش‌کدبندی[6] [6] و [7]، پس‌کدبندی[7] [8]، نگاشت انتخاب‌گر[8] (SLM) [9]، و ارسال دنباله جزئی[9] (PTS) [10].

برش‌دادن و فیلترکردن ساده‌ترین روش کاهش PAPR[10] است. در روش ارائه‌شده در مرجع [4]، پیک‌های سیگنال در یک حد آستانه مشخص برش داده می‌شوند. برش‌دادن سیگنال یک روش غیرخطی است که موجب اعوجاج درون‌باندی و برون‌باندی می‌شود. اعوجاج برون‌باندی موجب گستردگی طیفی شده و به‌وسیلهٔ فیلتر کردن از بین می‌رود، ولی اعوجاج درون باندی با فیلترینگ از بین نرفته و موجب بدترشدن مشخصه احتمال خطای بیت[11] (BER) در گیرنده می‌شود. در روش فشرده‌سازی غیرخطی یک تابع غیرخطی و معکوس‌پذیر بر روی سیگنالOFDM در حوزه زمان اعمال می‌شود [5]. دو روش μ-law و A-law از متداول‌ترین روش‌های فشرده‌سازی غیرخطی هستند. در روش پیش‌کدبندی، سمبل‌های باند-پایه‌ی حوزه فرکانس (قبل از عمل‌گر IFFT[12]) در یک ماتریس مربعی وارون‌پذیر ضرب می‌شوند [6] و [7]. هدف از این کار، کاهش میزان خود-همبستگیِ سمبل‌هاجهت کمینه‌کردن مقدار PAPR است. در گیرنده نیز بعد از عمل FFT[13]، سمبل‌های دریافتی در ماتریس وارون ضرب شده و سمبل‌های ارسالی بازسازی می‌شوند. روش پس‌کدبندی مشابه روش پیش‌کدبندی است با این تفاوت که در تکنیک پس-کدبندی، ماتریس مربعی وارون‌پذیر بعد از IFFT اعمال می‌شود [8]. در تکنیک SLM [9]، چندین فریم مختلف از سیگنال اصلی تولید شده و PAPR هر فریم محاسبه می‌شود تا فریمی که کمینه PAPR را دارد ارسال شود. فریم‌های مختلف از ضرب نقطه به نقطه سمبل‌های باندپایهٔ سیگنال اصلی در فاکتورهای فاز به‌دست می‌آیند. درروشPTS، یک بلوک از سیگنال اصلی به چندین زیربلوک ناهم‌پوشان تقسیم

[1] Orthogonal frequency division multiplexing
[2] Digital audio broadcasting
[3] Digital video broadcasting-terrestrial
[4] High power amplifier
[5] Non-linear companding
[6] Pre-coding
[7] Post-coding
[8] Selective mapping
[9] Partial transmit sequence
[10] Peak-to-average power ratio
[11] Bit error rate
[12] Invers fast Fourier transform
[13] Fast Fourier transform



[ Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-12 ]
[ DOI: 10.52547/jsdp.19.2.13 ]

می‌شود. عمل‌گر IFFT به هر کدام از این زیرفریم‌ها به‌طور مجزا اعمال شده و خروجی‌های عملگرهایIFFT با فاکتورهای فاز متناظر وزن‌دهی می‌شوند. فاکتورهای فاز به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که سیگنال حاصل از جمع وزن‌دار خروجی‌های عمل‌گرهای IFFT، کمینه PAPR را داشته باشد. چالش اصلی در روش PTS به‌دست‌آوردن فاکتورهای فاز بهینه است، چرا که پیچیدگی محاسباتی با افزایش تعداد زیربلوک‌ها به‌صورت نمایی رشد می‌کند. در روش PTS بهینه (O-PTS)، افزایش فضای جستجو، منجر به افزایش پیچیدگی محاسباتی می‌شود. روش‌های هوش محاسباتی برای یافتن فاکتورهای فاز بهینه در مقالات مختلف ارائه شده‌اند. برخی از مهم‌ترین این روش‌ها عبارت‌اند از: الگوریتم ژنتیک (GA) [11]، الگوریتم کلونی ذرات (PSO) [12]، الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی (ABC) [13]، الگوریتم جستجوی ممنوعه (TS) [14]، الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) [15]، الگوریتم جهش قورباغه (SFLA) [16]، الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) [17]، و الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO) [18].

در این پژوهش، برای کاهش PAPR سیگنال‌های OFDM، روش PTS مبتنی بر الگوریتم انتخابات (EA) بهبودیافته پیشنهاد شده است، که به‌اختصار EA-PTS نام‌گذاری شده است. الگوریتم EA استاندارد فقط برای حل مسائل پیوسته مناسب است و برای حل مسأله PAPR نیاز است، تغییراتی در آن صورت گیرد. همچنین در الگوریتم EA، انتشار اطلاعات به‌صورت یک‌سویه بوده و از سمت نامزدها به رأی‌دهندگان است؛ به همین منظور، در این مقاله، نسخهٔ بهبودیافته و گسسته‌ای از الگوریتم EA ارائه شده است. در الگوریتم پیشنهادی، فاز تبلیغات مثبت به‌گونه‌ای بهبود داده شده است که نخست کارایی بهتری در کاوش[1] و اکتشاف[2] فضای جستجوی داشته باشد، و دوم این‌که به اشتراک‌گذاری اطلاعات دوسویه بین رأی‌دهندگان و کاندیداها در بیشترین حد باشد.

روش پیشنهادی EA-PTS بر مشکل پیچیدگی محاسباتی روش O-PTS غلبه کرده و PAPR را به میزان قابل قبولی کاهش می‌دهد. روش EA-PTS همچنین با روش OFDM معمولی (بدون استفاده از روش کاهش PAPR)، روش GA-PTS[3] و روش ICA-PTS[4] مقایسه شده است. نتایج آزمایش‌ها برتری روش پیشنهادی را در مقایسه با سایر روش‌ها نشان می‌دهد. به‌اختصار، نوآوری‌های این پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

- **ارائه روش EA-PTS برای کاهش PAPR سیستم‌های OFDM:** در این پژوهش، ابتدا نسخه گسسته‌ای از الگوریتم EA ارائه شده است به گونه‌ای که بتواند برای حل مسأله یافتن فازهای فاکتور بهینه و نیز کاهش PAPR مناسب باشد. برای این منظور، عمل‌گر جدیدی برای تبلیغات مثبت الگوریتم EA ارائه شده و سپس با استفاده از عمل‌گر تقاطع دونقطه‌ای الگوریتمِ GA تبادل اطلاعات بین رأی‌دهندگان و نامزدها صورت گرفته است. الگوریتم حاصل با روش PTS ترکیب شده و روش EA-PTS حاصل شده است که از عملکرد مطلوبی در کاهش نرخ PAPR سیستم‌های OFDM برخوردار است.
- **بهبود کارایی روش‌های موجود:** برای ارزیابی روش پیشنهادی، آزمایش‌های متعددی انجام شده و با روش‌های O-PTS و نیز روش‌های GA-PTS و ICA-PTS مقایسه شده است. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن است که روش پیشنهادی از کارایی مطلوبی در قیاس با سایر روش‌های مورد مقایسه برخوردار است.

پس از این مقدمه، سایر بخش‌های این مقاله به این صورت سازماندهی شده است. در بخش ۲، روش PTS در سیستم‌های OFDM توضیح داده شده است. در بخش ۳، به تشریح الگوریتم EA و نیز الگوریتم‌های GA و الگوریتم رقابت استعماری (ICA) پرداخته شده و در بخش ۴، روش EA-PTS توضیح داده شده است. در بخش ۵، آزمایش‌های صورت‌گرفته، بحث بر روی نتایج و نیز پیچیدگی محاسباتی روش‌ها ارائه و در نهایت، در بخش ۶ به نتیجه‌گیری پژوهش پرداخته شده است.

## ۲- روش PTS در سیستم‌های OFDM

در روش مدولاسیون چندحاملی OFDM، یک بلوک به طول $N$ از سمبل‌های اطلاعاتی $\boldsymbol{X}=[X_0, X_1, \ldots, X_{N-1}]^T$ ارسال می‌شود. هر سیگنال OFDM یک زیر حامل متفاوت از مجموعه $\{f_0, f_1, \ldots f_{N-1}\}$ را مدوله می‌کند. زیر حامل‌ها همگی متعامد هستند، یعنی:

$$f_n = n\Delta f \quad ; \quad \Delta f = \frac{1}{N \times T} \qquad (۱)$$

و $T$ بازه زمانی ارسال سمبل هست.

سیگنال زمان-گسسته $\boldsymbol{x}=[x_0, x_1, \ldots, x_{N-1}]^T$ با $N$ زیرحامل به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود:

[1] Exploration
[2] Exploitation
[3] Genetic algorithm based PTS
[4] Imperialism competition algorithm based PTS



[ Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-12 ]
[ DOI: 10.52547/jsdp.19.2.13 ]

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \quad ; \quad n = 0,1,\ldots,N-1 \qquad (۲)$$

PAPR سیگنال ارسالی عبارت است از نسبت توان حداکثر به توان متوسط سیگنال که عبارت است از:

$$PAPR = \frac{\max\{|x|^2\}}{\mathrm{E}\{|x|^2\}} \qquad (۳)$$

عملکرد روش‌های مختلف کاهش PAPR با منحنی تابع توزیع تجمعی مکمل[1] (CCDF) ارزیابی می‌شود. تابع CCDF احتمال اینکه PAPR یک فریم از اطلاعات از یک مقدار PAPR مشخص ($PAPR_0$) بیشتر باشد را محاسبه می‌کند. با توجه به اینکه قسمت‌های حقیقی و موهومی سیگنال مختلط OFDM، برای $N$ به اندازه کافی بزرگ، طبق قضیه حد مرکزی هر دو دارای توزیع گوسی هستند، توزیع تصادفی دامنه رایلی بوده و توان نیز توزیع مربع کای خواهد داشت؛ بنابراین CCDF برای $N$ سمبل از یک فریم عبارت است از [2]:

$$\begin{aligned} CCDF &= p_r(PAPR > PAPR_0) \\ &= 1 - p_r(PAPR \le PAPR_0) \\ &= 1 - (1 - e^{-PAPR_0})^N \end{aligned} \qquad (۴)$$

در سیستم‌های OFDM، برای به‌دست‌آوردن دقیق پیک‌های سیگنال، عمل بیش‌نمونه‌برداری[2] انجام می‌گیرد. برای انجام بیش‌نمونه‌برداری با فاکتور $L$، تعداد $N\times(L\text{-}1)$ صفر به هر فریم اضافه شده و IFFT، $N\times L$ نقطه‌ای انجام می‌گیرد. برای کاهش PAPR با روش PTS، یک فریم از اطلاعات ورودی $\boldsymbol{X}$ (به طول $N$) به $V$ زیربلوک ناهم‌پوشان تقسیم می‌شود. عمل‌گر IFFT به‌طور مجزا برای هر زیربلوک اعمال شده و سپس با یک فاکتور فاز متناظر وزن‌دهی می‌شود. روش بهینه‌سازی فاز در این مرحله انجام می‌گیرد به نحوی که سیگنال حاصل از جمع زیربلوک‌های وزن‌دار دارای حداقل PAPR باشد. شکل (۱) بلوک دیاگرام یک سیستم فرستنده OFDM را با روش PTS نشان می‌دهد.

فریم اطلاعات ورودی $\boldsymbol{X}$ به زیربلوک‌های ناهمپوشان و متعامد $\boldsymbol{X}_1$ و $\boldsymbol{X}_2$ و ...و $\boldsymbol{X}_V$ تقسیم می‌شود، به‌طوری‌که $\boldsymbol{X}$ مجموع همه زیربلوک‌هاست.

$$X = \sum_{v=1}^{V} X_v \qquad (۵)$$

سپس IFFT برای هرکدام از زیربلوک‌ها اعمال و حاصل با یک فاکتور فاز $b_v=\exp(j\Phi_v)$ وزن‌دهی می‌شود؛ به‌طوری‌که $\Phi_v$ در فاصله 0 تا $2\pi$ است. مجموعه‌ای از فاکتورهای فاز که PAPR سیگنال جمع‌شدهٔ حوزه زمان $\boldsymbol{x}$ را کمینه می‌سازد به‌صورت زیر انتخاب می‌شوند:

$$\begin{aligned} x &= \sum_{v=1}^{V} b_v x_v = \sum_{v=1}^{V} b_v\, IFFT(X_v) \\ [\tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \ldots, \tilde{b}_V] &= \arg\min\left( \max\left| \sum_{v=1}^{V} b_v x_v \right| \right) \end{aligned} \qquad (۶)$$

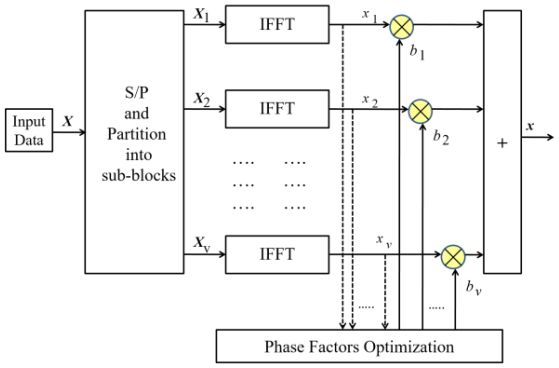
سیگنال OFDM متناظر در حوزهٔ زمان به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$x = \sum_{v=1}^{V} \tilde{b}_v x_v \qquad (۷)$$

چالش اصلی روش PTS، پیچیدگی محاسباتی بسیار بالای آن است؛ چون این روش نیاز به جستجوی جامع بین تمام ترکیبات مختلف از فاکتورهای فاز را دارد و پیچیدگی جستجو به‌صورت نمایی با افزایش تعداد زیربلوک‌ها افزایش می‌یابد. درعمل به‌طورمعمول انتخاب فاکتورهای فاز از یک مجموعه محدود مطابق زیر انجام می‌گیرد.

$$b_v \in b \quad \text{where} \quad b = \{e^{j\frac{2\pi}{w}v} \quad v = 0,1,\ldots,w-1\} \qquad (۸)$$

که $w$ تعداد فاکتورهای فاز است.




**(شکل-۱): نمودار جعبه‌ای روش PTS**

**(Figure-1): The block diagram of PTS technique**

## ۳- الگوریتم‌های پیش‌نیاز

در این پژوهش، به‌منظور داشتن یک سیگنال OFDM با کمینه PAPR، یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم EA پیشنهاد می‌شود. به همین منظور در ادامه، الگوریتم EA به تفصیل تشریح، سپس الگوریتم‌های GA و ICA به‌صورتمختصر بیان می‌شوند.

### ۳-۱- الگوریتم انتخابات (EA)

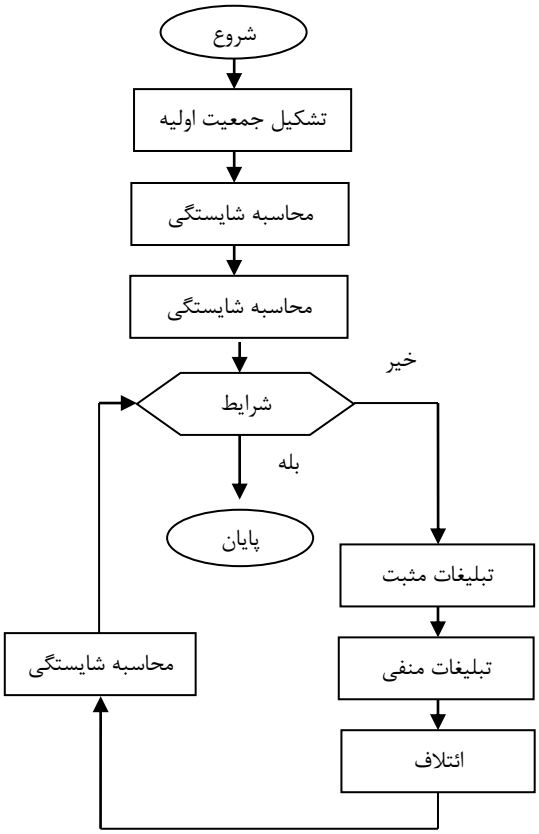
الگوریتم EA یک روش هوش جمعی و مبتنی بر جمعیت بوده که از فرآیند انتخابات ریاست جمهوری الهام گرفته

[1] Complimentary cumulative distribution function
[2] Oversampling



[ Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-12 ]
[ DOI: 10.52547/jsdp.19.2.13 ]

شده است [19]. این الگوریتم، فرآیند بهینه‌سازی را با یک جمعیت از جواب‌های نامزد آغاز، سپس با استفاده از عملگرهای تبلیغات مثبت، تبلیغات منفی و ائتلاف، جمعیت اولیه را بهنگام‌سازی می‌کند تا در فضای جستجو به نقطه بهینه سراسری دست یابد. شکل (۲) روندنمای الگوریتم انتخابات را نشان می‌دهد.




**(شکل-۲): روندنمای الگوریتم بهینه‌سازی انتخابات**
**(Figure-2): Flowchart of election optimization algorithm**

در این الگوریتم، هر عامل جستجو یک فرد نامیده می‌شود که می‌تواند یک نامزد رأی‌دهنده باشد. رأی‌دهندگان به همراه نامزدها مجموعه‌ای از احزاب سیاسی را در فضای جستجو تشکیل می‌دهند. برای یک مسأله با متغیرهای $r_1, r_2, ..., r_N$ هر فرد $P_i$ از آرایه‌ای از مقادیر ممکن برای متغیرها تشکیل شده است:

$$P_i = [r_1, r_2, ..., r_N] \qquad (۹)$$

شایستگی هر فرد با ارزیابی تابع $f$ بر روی مقادیر متغیرها، متناسب با تابع هدف مسأله محاسبه می‌شود:

$$f(P_i) = f(r_1, r_2, ..., r_N) \qquad (۱۰)$$

پس از ارزیابی جمعیت، تعدادی از بهترین افراد به‌عنوان نامزد انتخاب‌شده و افراد باقی‌مانده، رأی‌دهندگان را تشکیل می‌دهند. هر رأی‌دهنده به‌عنوان طرفدار یک نامزد در نظر گرفته می‌شود، اگر کمترین فاصله را از نظر عقاید با آن نامزد داشته باشد:

$$Pt_i = \left\{ v_k : \left\| E_{v_k} - E_{c_i} \right\| < \left\| E_{v_k} - E_{c_j} \right\| \ \forall\, 1 \le j \le N_c \right\} \qquad (۱۱)$$

در رابطه بالا، $Pt_i$ نشان‌دهنده حزب $i$ و $N_C$ تعداد نامزدها است. $E_{c_i}$ و $E_{v_k}$ به‌ترتیب شایستگی نامزد و رأی‌دهنده $C_i$ و $v_k$ را نشان می‌دهد.

پس از تشکیل احزاب سیاسی، نامزدها تبلیغات انتخاباتی را شروع می‌کنند. تبلیغات هسته اصلی الگوریتم انتخابات را تشکیل می‌دهد و شامل سه مرحله تبلیغات مثبت، تبلیغات منفی و نیز ائتلاف است. در مرحله تبلیغات مثبت، هر نامزد از طریق مناظره و سخنرانی، عقاید و نظرات خود را به رأی‌دهندگان منتقل کرده و از این طریق سعی می‌کند آن‌ها را به خودش نزدیک‌تر کند. در این مرحله، در درون هر حزب، به تعداد $N_s$ متغیر به‌صورت تصادفی از فرد نامزد انتخاب می‌شوند و با متغیرهای متناظر رأی‌دهندگان جایگزین می‌شوند. $N_S$ به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$N_s = \lceil R_s \times M \rceil \qquad (۱۲)$$

در این رابطه، $M$ نشان‌دهنده تعداد ویژگی‌های نامزد و $R_s$ نشان‌دهنده نرخ انتخاب است. متغیرهای انتخاب‌شده با ضریب $\omega$ وزن‌دهی و سپس جایگزین ویژگی‌های رأی‌دهندگان می‌شوند. مقدار هر متغیر $r_i$ در یک رأی‌دهنده پس از انجام تبلیغات مثبت به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$r_{i_{new}} = \omega . r_{i_{old}}, \quad \omega = \frac{1}{\left| E_{c_i} - E_{v_k} \right| + 1} \qquad (۱۳)$$

در مرحله تبلیغات منفی، نامزدها از طریق رقابت با یکدیگر، سعی می‌کنند تا طرفداران نامزدهای احزاب دیگر را به سمت خود جذب کرده و بر محبوبیت خود بیافزایند. در این مرحله کاندیداهای ضعیف، ضعیف‌تر شده و بر محبوبیت نامزدهای قوی‌تر افزوده می‌شود. برای مدل‌سازی تبلیغات منفی، ابتدا ضعیف‌ترین حزب سیاسی مشخص می‌شود. حزب ضعیف به حزبی گفته می‌شود که نامزد آن در مقایسه با نامزدهای سایر احزاب کمترین شایستگی را بر حسب تابع ارزیابی داشته باشد. پس از تعیین حزب ضعیف، فاصله بین تمامی رأی‌دهندگان و نامزد حزب ضعیف بر حسب معیار شایستگی محاسبه می‌شود و سپس ۵٪ از دورترین رأی‌دهندگان انتخاب می‌شوند. سپس فاصله رأی‌دهندگان انتخاب‌شده با هر کدام از نامزدهای

[ Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-12 ]
[ DOI: 10.52547/jsdp.19.2.13 ]

دیگر احزاب محاسبه و رأی‌دهندگان به نزدیک‌ترین کاندیداها ملحق می‌شوند. در مرحله ائتلاف، نامزدهایی که دارای اهداف و عقاید مشترک هستند با همدیگر متحد می‌شوند تا شانس خود را برای برنده‌شدن در انتخابات افزایش دهند. نزدیکی عقاید نامزدها بر اساس محاسبه‌ی فاصله اقلیدسی بین شایستگی نامزدها محاسبه می‌شود. بین نامزدهایی که قصد ائتلاف دارند، یک نامزد به‌صورت تصادفی انتخاب شده و به‌عنوان نامزد پیشرو در نظر گرفته می‌شود و سایر نامزدها از او تبعیت می‌کنند؛ سپس تمامی نامزدها و طرفداران آن‌ها به‌عنوان طرفداران جدید نامزد پیشرو در نظر گرفته می‌شوند. تا هنگامی‌که شرایط خاتمه برقرار نشود، عمل‌گرهای تبلیغات مثبت، تبلیغات منفی و ائتلاف به‌صورت مکرر انجام می‌شوند تا اعضای جمعیت را به سوی نقطه بهینه سراسری سوق دهند. در انتهای اجرای الگوریتم، نامزدی با بیش‌ترین رأی به‌عنوان برنده انتخابات اعلام می‌شود، که معادل با بهترین راه‌حل یافته‌شده برای مسأله بهینه‌سازی است.

### ۲-۳- الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم GA یکی از الگوریتم‌های تکاملی مشهور است که از اصول زیست‌شناسی مانند وراثت، جهش و اصل انتخاب الهام گرفته شده است [20]. الگوریتم ژنتیک، مبتنی بر یک رویه تکراری استوار است که اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس شده است. درالگوریتم ژنتیک، ابتدا به‌طور تصادفی تعدادی از کروموزوم‌ها ایجاد می‌شوند که جمعیت اولیه را تشکیل می‌دهند؛ سپس برازندگی هر عضو از جمعیت به‌کمک تابع برازندگی محاسبه و تعیین می‌شود. پس از ارزیابی اعضای جمعیت و تعیین شایستگی هر کدام از اعضا، به‌وسیله عملگرهای تقاطع و جهش اعضای جمعیت به‌گونه‌ای بهنگام‌سازی می‌شوند که مقادیر برازندگی آن‌ها نسبت به مراحل قبلی بهبود یابند.

### ۳-۳- الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

الگوریتم ICA یکی دیگر از الگوریتم‌های هوش جمعی است که از سازوکار اجتماعی- سیاسی رقابت استعماری بین کشورهای استعمارگر الهام گرفته شده است. این الگوریتم [21] با یک جمعیت اولیه تصادفی، کار جستجو و بهینه‌سازی را آغاز می‌کند. هر عضو از جمعیت یک کشور نامیده می‌شود که می‌تواند یک استعمارگر و یا مستعمره باشد. در ابتدا، کشورهای موجود در جمعیت به تعدادی امپراتوری تقسیم می‌شوند که در آن هر امپراتوری شامل یک استعمارگر و تعدادی کشور مستعمره است. الگوریتم رقابت استعماری دارای دو عملگر اصلی است که عبارت‌اند از: عملگر جذب و عملگر رقابت. در مرحله جذب، استعمارگران بسته به قدرتشان، مستعمرات را به سمت خود جذب می‌کنند. قدرت یک امپراتوری به‌صورت مجموع قدرت کشور امپریالیست، به‌اضافه درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن، محاسبه می‌شود. در مرحله جذب، کشورهای استعمارگر، مستعمرات خود را پیشرفت می‌دهند. این کار از طریق نزدیک‌کردن مستعمرات به سمت کشورهای استعمارگر صورت می‌گیرد. بدین ترتیب، با گذشت زمان، مستعمرات، از لحاظ قدرت به استعمارگر نزدیک‌تر خواهند شد. در مرحله رقابت، امپراتوری‌ها با یکدیگر به رقابت پرداخته و تلاش می‌کنند تا بر مستعمرات امپراتوری‌های ضعیف تسلط یابند. در این مرحله، هر امپراتوری‌ای که نتواند موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید و یا از کاهش نفوذش جلوگیری کند، از صحنه رقابت حذف خواهد شد [22]. زمانی که درنهایت، تنها یک امپراتوری در فضای جستجو داشته باشیم، فرآیند جذب و رقابت تمام شده و تنها کشور استعمارگر باقیمانده به‌عنوان جواب نهایی اعلام می‌شود.

## ۴- الگوریتم بهبودیافته انتخابات

در الگوریتم EA، فاز تبلیغات مثبت تأثیر به‌سزایی در هم گرایی الگوریتم به نقطه بهینه سراسری دارد. بهبود عملکرد فاز تبلیغات مثبت موجب بالارفتن کارایی الگوریتم EA خواهد شد. فاز تبلیغات مثبت در الگوریتم EA استاندارد، برای حل مسائل پیوسته ارائه شده است. به‌منظور اعمال الگوریتم EA بر روی مسائل گسسته نیاز است تا نسخه گسسته‌ای از عمل‌گر تبلیغات مثبت ارائه شود. به‌منظور ایجاد نسخه گسسته‌ای از تبلیغات مثبت، و نیز افزایش کارایی فاز تبلیغات مثبت، عمل‌گر جدیدی پیشنهاد شده است. در عمل‌گر جدید، مکان رأی‌دهنده $v_j$ به‌صورت زیر بهنگام‌سازی می‌شود:

$$v_j^{t+1} = v_j^t + round\left(\Delta_{i,j}^t \times \Phi(c_i^t, v_j^t)\right) \qquad (۱۴)$$

در رابطه بالا، $t$ بیان‌گر نسل فعلی است، $v_j^t$ بیان‌گر موقعیت رأی‌دهنده در نسل $t$ و $c_i^t$ بیان‌گر موقعیت نامزد در نسل $t$ است که به‌عنوان بهترین عضو در حزب $Pt_i$ است. تابع $round(.)$ آرگومان خود را به سمت نزدیکترین عدد صحیح گرد می‌کند. تابع $\Phi(c_i^t, v_j^t)$ با عمل‌گر تقاطع دونقطه‌ای، نامزد و رأی‌دهنده را با یکدیگر ترکیب می‌کند و بهترین فرزند را به‌عنوان نتیجه ترکیب بر می‌گرداند. با



[ Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-12 ]

[ DOI: 10.52547/jsdp.19.2.13 ]

فرض اینکه رأی‌دهنده $v_j$، و نامزد $c_i$ به‌صورت زیر تعریف شده باشد:

$$c_i = [r_{c1}, r_{c2}, r_{c3}, r_{c4}, r_{c5}, r_{c6}, r_{c7}, r_{c8}]$$
$$v_k = [r_{v1}, r_{v2}, r_{v3}, r_{v4}, r_{v5}, r_{v6}, r_{v7}, r_{v8}]$$

ابتدا دو نقطه برش به‌صورت تصادفی انتخاب و سپس مقادیر متغیرها بین کاندیدا و رأی‌دهنده جابه‌جا می‌شوند. به‌عنوان مثال، اگر نقاط برش به‌صورت ۳ و ۵ باشد پس از انجام تقاطع، دو فرد جدید به‌صورت زیر تولید می‌شوند:

$$p_i = [r_{c1}, r_{c2}, r_{c3}, \uparrow r_{v4}, r_{v5}, \uparrow r_{c6}, r_{c7}, r_{c8}]$$
$$p_j = [r_{v1}, r_{v2}, r_{v3}, \uparrow r_{c4}, r_{c5}, \uparrow r_{v6}, r_{v7}, r_{v8}]$$

پس از تولید افراد جدید، بر اساس روش انتخاب حریصانه، بهترین فرد انتخاب شده و اگر میزان شایستگی بیشتری از رأی‌دهنده $v_j$ داشته باشد، به جای آن قرار می‌گیرد .متغیر $\Delta_{i,j}^t$ بیان‌گر فاصله بین نامزد $c_i$ و رأی‌دهنده $v_j$ است، که به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$\Delta_{i,j}^t = \gamma.(c_i^t - v_j^t) \qquad (۱۵)$$

$\gamma$ بیان‌گر ضریب مقیاس است که میزان کشش رأی‌دهنده $v_j$ به سمت نامزد $c_i$ را کنترل می‌کند. در این مقاله، $\gamma$ به‌صورت زیر تعریف شده است که موجب بهبود همگرایی الگوریتم می‌شود:

$$\gamma = \frac{1}{r} \qquad (۱۶)$$

در این رابطه، $r \in (0, 5)$ که $r$ تابع مولد عدد تصادفی نرمال است. استفاده از ضریب $\gamma$ موجب می شود تا رأی‌دهنده $v_j$ در هنگام حرکت به سمت نامزد $c_i$، جهت حرکت خود را در فضای جستجو تغییر دهد و بدین طریق نقاط مختلف فضای جستجو را بررسی کند. ضریب $\gamma$ توازن مناسبی را بین توانایی کاوش و اکتشاف نقاط درون مناطق جدید در فضای جستجو فراهم می‌کند. پس از محاسبه مکان جدید تمامی رأی‌دهندگان با رابطه (۱۴)، به جهت انتشار اطلاعات بین رأی‌دهندگان و نامزد در درون حزب $Pt_i$، ابتدا بهترین رأی‌دهنده از نظر معیار شایستگی انتخاب می شود؛ سپس بهترین رأی‌دهنده، اگر مقدار شایستگی بهتری نسبت به نامزد داشته باشد با آن جایگزین می‌شود. برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی EA، کارایی آن بر روی ۱۰ تابع محک ارزیابی شده است. نتایج حاصل از الگوریتم EA با نتایج به‌دست‌آمده به‌وسیلهٔ الگوریتم‌های GA و ICA مقایسه شده است. جدول (۱) مشخصات توابع آزمون را نشان می‌دهند. این توابع در پژوهش‌های متعدد محاسبات تکاملی معرفی و توسط بسیاری از پژوهش‌گران برای ارزیابی الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شده‌اند [23]. در آزمایش‌های انجام‌گرفته، هر یک از الگوریتم‌ها به تعداد سی بار بر روی توابع آزمون اجرا شده‌اند. در هر بار اجرا، جمعیت اولیه به‌صورت تصافی ایجاد شده و هر اجرا مستقل از دیگری است. اندازه جمعیت اولیه برای تمامی الگوریتم‌ها برابر چهل در نظر گرفته شده و شرط توقف برابر سی بار اجرای الگوریتم‌ها در نظر گرفته شده است.

**(جدول-۱): توابع بهینه‌سازی آزمون**
**(Table-1): Test optimization function**

| تابع | فرمول | ابعاد | محدوده | مقدار بهینه |
|---|---|---|---|---|
| $f_1$ | $f_1(x) = -\cos(x_1)\cos(x_2)\exp\left(-(x_1-\pi)^2-(x_2-\pi)^2\right)$ | 2 | [-100, 100] | -1 |
| $f_2$ | $f_2(x) = (1.5 - x_1 + x_1x_2)^2 + (2.25 - x_1 + x_1x_2^2)^2 + (2.625 - x_1 + x_1x_2^3)^2$ | 5 | [-4.5, 4.5] | 0 |
| $f_3$ | $f_3(x) = 25 + \sum_{i=1}^{5} \lfloor x_i \rfloor$ | 5 | [-5.12, 5.12] | 0 |
| $f_4$ | $f_4(x) = \sum_{i=1}^{n} (\lfloor x_i + 0.5 \rfloor)^2$ | 30 | [-100, 100] | 0 |
| $f_5$ | $f_5(x) = \sum_{i=1}^{n} x_i^2$ | 30 | [-100, 100] | 0 |
| $f_6$ | $f_6(x) = \sum_{i=1}^{n} i x_i^2$ | 30 | [-10, 10] | 0 |
| $f_7$ | $f_7(x) = \sum_{i=1}^{n} i x_i^2 + random[0,1)$ | 30 | [-1.28, 1.28] | 0 |
| $f_8$ | $f_8(x) = \sum_{i=1}^{n} x_i^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} 0.5 i x_i^2\right) + \left(\sum_{i=1}^{n} 0.5 i x_i\right)^4$ | 24 | [-4, 4] | 0 |
| $f_9$ | $f_9(x) = \sum_{i=1}^{n} \left(\sum_{j=1}^{i} x_j\right)^2$ | 30 | [-100, 100] | 0 |
| $f_{10}$ | $F_{10}(x) = \sum_{i=1}^{n-1} \left[100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2\right]$ | 30 | [-30, 30] | 0 |

نتایج آماری به‌دست‌آمده از آزمایش‌های صورت‌گرفته بر روی توابع آزمون در جدول (۲) آورده شده است. در این جدول، *Min* و *Mean* به‌ترتیب مقادیر کمینه و میانگین به‌دست‌آمده بر روی سی بار اجرای مستقل را نشان می‌دهد. *Std* مبین انحراف معیاراستاندارد و *Succ* نشان‌دهنده تعداد موفقیت الگوریتم در سی بار اجرای



[ Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-12 ]
[ DOI: 10.52547/jsdp.19.2.13 ]

الگوریتم است. بر اساس نتایج جدول (۲)، الگوریتمEA رتبه نخست را در بین سایر الگوریتم‌ها بر حسب معیار*Succ* کسب کرده است.

جدول (۳) مقایسه نتایج به‌دست‌آمده به‌وسیله الگوریتم‌های مختلف را بر روی توابع آزمون بر اساس مقدار پارامتر *Min*نشان می‌دهد. در جدول (۳)، علامت "+" به معنای موفقیت الگوریتم EA، علامت "-" به معنای شکست الگوریتم EA و علامت "=" به معنای تساوی الگوریتم EA در مقابل الگوریتم مورد مقایسه است. با توجه به مقایسه‌های صورت‌گرفته در جدول (۳)، الگوریتم EA از نظر آماری نتایج بهتر و یا یکسانی را در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها کسب کرده است. این موضوع تأیید می‌کند که الگوریتم EA یک الگوریتم کارا در زمینه بهینه‌سازی است و می‌تواند در کاربردهای مختلف مهندسی استفاده شود.

**(جدول-۲): نتایج حاصل از آزمایش‌ها بر روی توابع آزمون**

**(Table-2): Experiment results on test functions**

| تابع | کمیت آماری | ICA | GA | الگوریتم پیشنهادیEA |
|---|---|---|---|---|
| $f_1$ | Min | -1 | -0.99716 | -1 |
| | Mean | -1 | -0.90761 | -1 |
| | Std | 0 | 0.098034 | 0 |
| | Time | 5.098 | 0.775 | 1.089 |
| | Succ | 30 | 0 | 30 |
| $f_2$ | Min | 0 | 2.3701e-06 | 9.5644e-15 |
| | Mean | 4.1234e-8 | 6.534e-05 | 2.1224e-12 |
| | Std | 2.5107e-8 | 7.4072e-05 | 1.9246e-12 |
| | Time | 7.409 | 0.874 | 4.398 |
| | Succ | 30 | 0 | 30 |
| $f_3$ | Min | 0 | 0 | 0 |
| | Mean | 0.3 | 0 | 0 |
| | Std | 0.45826 | 0 | 0 |
| | Time | 10.750 | 0.019 | 0.013 |
| | Succ | 21 | 30 | 30 |
| $f_4$ | Min | 0 | 1567.641 | 0 |
| | Mean | 0 | 3123.0 | 0 |
| | Std | 0 | 818.9011 | 0 |
| | Time | 13.657 | 1.400 | 1.290 |
| | Succ | 30 | 0 | 30 |
| $f_5$ | Min | 0 | 1836.7199 | 0 |
| | Mean | 0 | 2855.9119 | 0 |
| | Std | 0 | 886.6447 | 0 |
| | Time | 15.780 | 1.570 | *1.400* |
| | Succ | 30 | 0 | 30 |
| $f_6$ | Min | 0 | 336.4143 | 0 |
| | Mean | 0 | 479.7652 | 0 |
| | Std | 0 | 82.1619 | 0 |
| | Time | 16.967 | 2.158 | 2.704 |
| | Succ | 30 | 0 | 30 |
| $f_7$ | Min | 6.8999e-07 | 0.17293 | 4.7863e-07 |
| | Mean | 0.000419 | 0.41954 | 0.00016881 |
| | Std | 6.1983e-05 | 0.18067 | 8.9064e-05 |
| | Time | 58.327 | 2.092 | 43.760 |
| | Succ | 2 | 0 | 4 |
| $f_8$ | Min | 0 | 213.1520 | 8.2758e-10 |
| | Mean | 1.2409e-06 | 300.8751 | 1.4444e-07 |
| | Std | 5.3059e-07 | 60.3968 | 2.9883e-07 |
| | Time | 15.630 | 1.566 | 49.177 |
| | Succ | 9 | 0 | 22 |
| $f_9$ | Min | 0 | 2055.0614 | 0 |
| | Mean | 0 | 6671.895 | 5.5188e-15 |
| | Std | 0 | 3662.7844 | 6.7162e-15 |
| | Time | 11.164 | 1.635 | 9.558 |
| | Succ | 30 | 0 | 19 |
| $f_{10}$ | Min | 0.00010204 | 260137.1645 | 0 |
| | Mean | 1.966733 | 730939.9392 | 18.4507 |
| | Std | 2.1342 | 461070.1644 | 13.0478 |
| | Time | 7.291 | 1.535 | 29.361 |
| | Succ | 0 | 0 | 6 |

[ Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-12 ]

[ DOI: 10.52547/jsdp.19.2.13 ]

[ Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-12 ]

[ DOI: 10.52547/jsdp.19.2.13 ]

(جدول-۳): مقایسه نتایج به‌دست‌آمده توسط الگوریتم‌ها بر اساس معیار Min بر روی توابع آزمون

(Table-3): Comparison of results obtained by algorithms in terms of min criterion on test functions

| تابع | EA vs. ICA | EA vs. GA |
|---|---|---|
| $f_1$ | = | + |
| $f_2$ | - | + |
| $f_3$ | = | = |
| $f_4$ | = | + |
| $f_5$ | = | + |
| $f_6$ | = | + |
| $f_7$ | + | + |
| $f_8$ | - | + |
| $f_9$ | = | + |
| $f_{10}$ | + | + |
| +/=/- | 2/6/2 | 9/1/0 |

## ۵- الگوریتم EA-PTS

در این بخش به تشریح روش PTS مبتنی بر الگوریتم EA پرداخته شده است. این روش به‌اختصار EA-PTS نامیده می‌شود. برای حل مسأله کمینه‌سازی PAPR در روش PTS با استفاده از الگوریتم EA، نیاز است تا دو تغییر در الگوریتم EA صورت گیرد: فرموله‌بندی مسأله و محاسبه شایستگی. مابقی بخش‌های الگوریتم نیازی به تغییر ندارند. شبه کد الگوریتم EA-PTS برای حل مسأله کمینه‌سازی PAPR در الگوریتم (۱) آورده شده است.

**(الگوریتم-۱): شبه کد روش پیشنهادی برای حل مسأله کاهش PAPR**

**(Algorithm-1): The pseudo code of the proposed EA-PTS for PAPR reduction problem**

**ورودی:**
تعداد زیربلوک‌ها، $V$
فاکتورهای فاز
خروجی‌های عملگرهای IFFT
تعداد تکرار الگوریتم، $I$
اندازه جمعیت، $N_P$

**خروجی:**
مکان بهینه فاکتورهای فاز $b_i=\{b_1, b_2, ..., b_V\}$

**رویه:**
**۱- مقداردهی پارامترهای الگوریتم شامل:** نرخ انتخاب کاندیدا ( $N_c$ ) نرخ انتخاب ( $R_s$ )، اندازه جمعیت ($N_P$)، ابعاد مسأله ($D$)، تعداد تکرار ($I$)
**۲- تشکیل جمعیت اولیه**
**۳- ارزیابی اولیه جمیت**
**۴- تشکیل احزاب سیاسی**
$D$=0
تا زمانی که $D<I$ مراحل ۵ تا ۸ را تکرار کن
**۵- تبلیغات مثبت**
**۶- تبلیغات منفی**
**۷- ائتلاف**
**۸- ارزیابی جمعیت**
$D=D+1$
بهترین فرد را به‌عنوان خروجی چاپ کن

### ۵-۱- فرموله‌بندی مسأله

هر فرد موجود در جمعیت بیان‌گر یک کدگذاری نامزد برای حل مسأله است. هر فرد شامل دنباله‌ای از شماره زیربلوک‌ها در محدوده $[1, V]$ است که $V$ نشان‌دهنده تعداد زیربلوک‌ها است.

$$P_i=\{r_1, r_2, ..., r_V\},\ \forall r_i \in [1, V] \qquad (۱۷)$$

شکل (۳) فردی را در جمعیت برای مقدار $V$=8 نشان می‌دهد.

| ۴ | ۶ | ۳ | ۷ | ۱ | ۸ | ۵ | ۲ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|

**(شکل-۳): نمونه‌ای از کدگذاری در کاهش PAPR برای V=8**

**(Figure-3): An example of coding in PAPR reduction for V=8**

در حل مسأله کاهش PAPR با الگوریتم انتخابات، چالش اصلی پیدا کردن مکان بهینه $V$ فاکتور فاز است به‌نحوی که کمینه مقدار PAPR حاصل شود.

### ۵-۲- محاسبه شایستگی

رابطه زیر برای محاسبه مقدار شایستگی هر فرد از جمعیت تعریف شده است:

$$f(P_i)=\frac{1}{PAPR(P_i)} \qquad (۱۸)$$

در این رابطه، $PAPR(P_i)$ با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

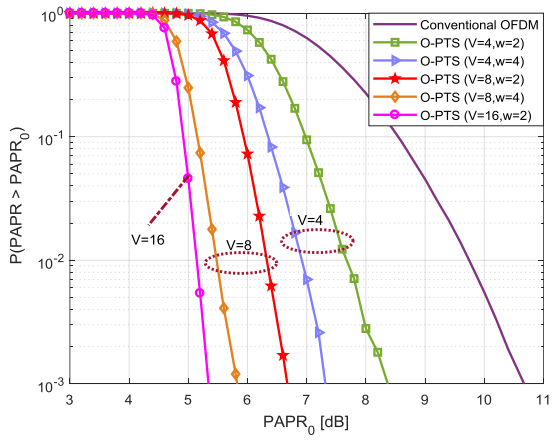
## ۶- ارزیابی روش پیشنهادی

برای ارزیابی و مقایسه الگوریتم پیشنهادی EA-PTS در کاهش PAPR سیگنال‌های OFDM، شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای با نرم‌افزار MATLAB بر روی یک رایانهٔ شخصی با سیستم عامل ویندوز ۷، پردازنده 3 GHz و مقدار حافظه اصلی 8GB انجام شده است. برای به‌دست‌آوردن منحنی‌های CCDF تعداد ده‌هزار فریم تصادفی از سمبل‌های OFDM با مدولاسیون 16-QAM تولید می‌شود. طول هر فریم شامل $N$=64 سمبل (زیرحامل) است. برای بررسی دقیق‌تر PAPR سیگنال ارسالی با فاکتور $L$=4 بیش‌نمونه‌برداری شده است. تعداد فاکتورهای فاز $w$=2 و $w$=4 انتخاب شده‌اند، یعنی {±1} و {±1, ±j}. مقادیر مختلفی برای تعداد زیربلوک‌ها ($V$) منظور شده است. روش پیشنهادی با روش‌های GA-PTS و ICA-

PTS مقایسه گردید. پارامترهای الگوریتم‌های GA-PTS، ICA-PTS و EA-PTS نیز به همراه مقادیر سایر پارامترهای در جدول (۴) خلاصه شده است. اندازه جمعیت ($N_P$) برای الگوریتم‌های GA، ICA و EA برابر چهل و تعداد تکرار الگوریتم‌ها ($I$) برابر سی در نظر گرفته شده است.

**(جدول-۴): پارامترهای شبیه‌سازی**
**(Table-4): Simulation parameters**

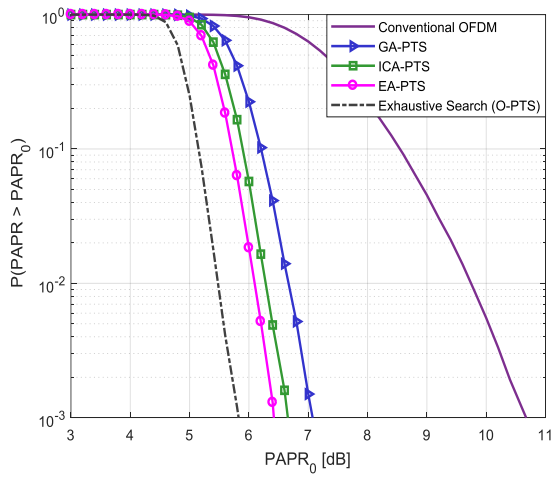
| پارامترها | مقادیر |
|---|---|
| تعداد زیرحامل‌ها ($N$) | ۶۴ |
| پارامتر بیش‌نمونه‌برداری ($L$) | ۴ |
| عملگر IFFT | ۲۵۶ نقطه‌ای |
| تعداد فریم | ۱۰،۰۰۰ |
| مدولاسیون | 16-QAM (دامنه) |
| تعداد زیربلوک‌ها ($V$) | ۴، ۸، ۱۶، و ۳۲ |
| فاکتورهای فاز ($w$=2, $w$=4) | {±1}و {±1, ±j} |
| **الگوریتم GA:** | |
| احتمال جهش | ۰/۲ |
| احتمال ترکیب | ۰/۷ |
| **الگوریتم ICA:** | |
| تعداد استعمارگر | ۴ |
| ضریب جذب | ۲ |
| نرخ اتحاد | ۰/۲ |
| نرخ انقلاب | ۰/۱ |
| ضریب زاویه جذب | ۰/۵ |
| **الگوریتم EA:** | |
| نرخ انتخاب متغیر | ۰/۲ |
| نرخ ائتلاف | ۰/۰۲ |
| نرخ انتخاب کاندیدا | ۰/۰۸ |




**(شکل-۴): مقایسه PAPR برای سیستم O-PTS**
**(Figure-4): The PAPR comparison of the O-PTS system**

شکل (۴) منحنی CCDF را برای یک سیستم OFDM معمولی و O-PTS به‌ازای مقادیر مختلف $w$ و $V$ نشان می‌دهد. همان‌طوری که از شکل نیز پیداست با افزایش تعداد فاکتورهای فاز و تعداد زیربلوک‌ها میزان PAPR کاهش می‌یابد. به‌ازای $w$=4 و $V$=16 یا $w$=2 و $V$=32 تعداد فضای جستجو $4^{16}=2^{32}$ است که با رایانه معمولی امکان شبیه‌سازی میسر نمی‌شود.

شکل (۵) منحنی‌های CCDF را برای سیستم OFDM معمولی، O-PTS، GA-PTS، ICA-PTS و روش پیشنهادی EA-PTS نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی تعداد زیربلوک‌ها $V$=8 و فاکتورهای فاز {±1, ±j} انتخاب شده‌اند ($w$=4). با توجه به شبیه‌سازی در CCDF=$10^{-3}$، مقدار PAPR یک سیستم OFDMمعمولی برابر 10.7dB و برای روش‌های GA-PTS و ICA-PTS به‌ترتیب برابر 7.1dB و 6.7dB به‌دست می‌آید. برای O-PTS مقدار PAPR برابر 5.8dB به‌دست آمده است و روش پیشنهادی EA-PTS مقدار PAPR را به مقدار 6.4dB کاهش می‌دهد. در روش O-PTS با جستجوی جامع، پیچیدگی محاسباتی از مرتبه $w^{V-1}=4^7=16{,}384$ است؛ درحالی‌که با روش EA-PTS این پیچیدگی به مقدار $I*N_P$=1200 کاهش می‌یابد. استفاده از O-PTS در مقایسه با EA-PTS تنها حدود 0.6dB بهبود در مقدار PAPR را دارد؛ حال‌آن که از نقطه نظر پیچیدگی جستجو، روش EA-PTS فقط 1200/16,384=%7.32 پیچیدگی O-PTS را دارد.

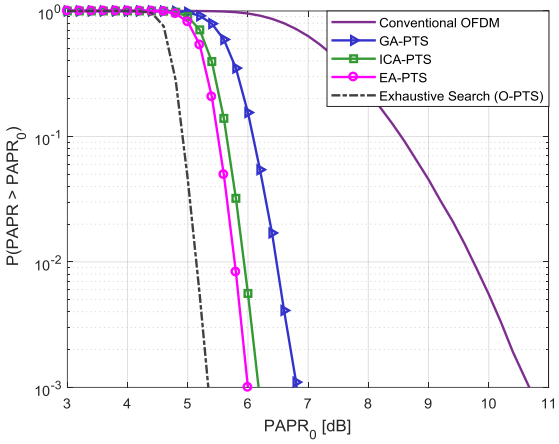



**(شکل-۵): مقایسه منحنی CCDF برای EA-PTS (V=8, w=4)**
**(Figure-5): CCDF comparison for EA-PTS (V=8, w=4)**

شکل (۶) نیز منحنی‌های CCDF را برای سیستم OFDM معمولی، O-PTS، GA-PTS، ICA-PTS و EA-PTS نشان می‌دهد. تعداد زیربلوک‌ها $V$=16 و فاکتورهای فاز +1 و -1 انتخاب شده‌اند ($w$=2). مقدار PAPR روش پیشنهادی EA-PTS به 6dB کاهش یافته است. پیچیدگی محاسباتی EA-PTS در این حالت نیز بسیار کمتر از روش O-PTS است. پیچیدگی محاسباتی روش O-PTS از مرتبه

[ Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-12 ]
[ DOI: 10.52547/jsdp.19.2.13 ]

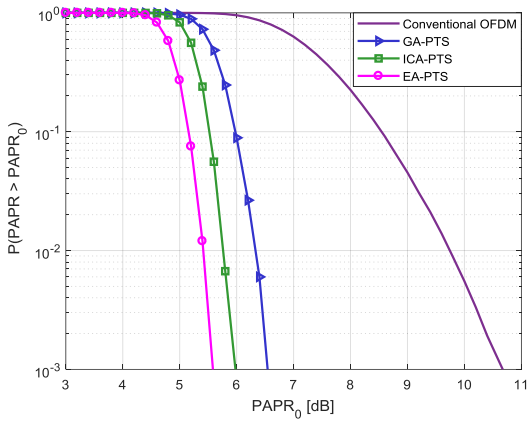
$w^{V-1}=2^{15}=32,768$ بوده و روش پیشنهادی EA-PTS فقط 1200/32,768=%3.66 پیچیدگی روش O-PTS را دارد.




**(شکل-۶): مقایسه منحنی CCDF برای EA-PTS (V=16, w=2)**

**(Figure-6): CCDF comparison for EA-PTS (V=16, w=2)**

میزان کاهش PAPR برای روش‌های GA-PTS، ICA-PTS، و EA-PTS در شکل (۷) نشان داده شده است. تعداد زیربلوک‌ها در این شبیه‌سازی، $V$=32 و تعداد فاکتورهای فاز $w$=4 است. در این حالت مقدار PAPR برای روش GA-PTS برابر 6.5dB و برای ICA-PTS حدود 6dB است. الگوریتم پیشنهادی آن را به 5.5dB کاهش می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده برتری الگوریتم پیشنهادی EA-PTS را نشان می‌دهد.




**(شکل-۷): مقایسه منحنی CCDF برای EA-PTS (V=32, w=4)**

**(Figure-7): CCDFcomparison for EA-PTS (V=32, w=4)**

جدول (۵) مقایسهٔ روش EA-PTS را در حالت $V$=16 و $w$=2 با روش‌های مختلف از نظر میزان کاهش PAPR و پیچیدگی محاسباتی نشان می‌دهد (CCDF=$10^{-3}$).

**(جدول-۵): مقایسه روش‌های کاهش PAPR**

**(Table-5): Comparison of the PAPR reduction methods**

| روش | PAPR $V$=8, $w$=4 | PAPR $V$=16, $w$=2 | پیچیدگی محاسباتی |
|---|---|---|---|
| Conventional OFDM | 10.7dB | 10.7dB | --- |
| GA-PTS | 7.05dB | 6.8dB | 1200 |
| ICA-PTS | 6.65dB | 6.2dB | 1200 |
| EA-PTS | 6.40dB | 6dB | 1200 |
| O-PTS | 5.8dB | 5.4dB | $w^{V-1}$ |

به‌منظور مقایسه دقیق الگوریتم‌ها، جدول (۶) میانگین مدت زمان اجرای الگوریتم‌ها را برای مقادیر مختلف $V$ بر حسب ثانیه نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول (۶) نشان داده شده است، در مقایسه با دیگر روش‌ها، EA-PTS کمترین زمان اجرا را دارد. برای تمامی مقادیر $V$، الگوریتم GA-PTS بیشترین زمان اجرا را دارد. با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول (۶)، آشکار است که هر چقدر تعداد زیربلوک‌ها افزایش می‌یابد، علاوه‌بر کارایی مطلوب، زمان اجرای الگوریتم EA-PTS کمتر از بقیه الگوریتم‌ها رشد می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که الگوریتم EA-PTS می‌تواند برای ابعاد بالاتر مسأله، نتایج بهتری را کسب کند.

**(جدول-۶): مدت زمان اجرای الگوریتم‌ها برای تعداد مختلف زیر بلوک‌ها**

**(Table-6): The runtime of algorithms for different numbers of sub-blocks**

| الگوریتم | مدت زمان (ثانیه) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $V$=4 | $V$=8 | $V$=16 | $V$=32 |
| GA-PTS | ۵/۲۸۰ | ۸/۹۰۶ | ۱۶/۲۰۶ | ۳۰/۲۲۳ |
| ICA-PTS | ۰/۹۸۹ | ۱/۷۴۸ | ۲/۷۰۰ | ۴/۶۸۹ |
| EA-PTS | ۰/۹۳۳ | ۱/۲۱۷ | ۱/۷۸۳ | ۲/۹۴۰ |

پیچیدگی محاسباتی الگوریتم‌های تکاملی که مبتنی بر جمعیت هستند اغلب بر اساس تعداد تکرار الگوریتم ضربدر اندازه جمعیت بیان می‌شود. به همین دلیل، پیچیدگی الگوریتم انتخابات برابر $O(I\times N_P)$ است که در آن $I$ برابر بیشینه تعداد تکرار الگوریتم و $N_P$ بیان‌گر اندازه جمعیت اولیه است. به همین صورت پیچیدگی الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری نیز برابر $O(I\times N_P)$ است. باید توجه کرد که در بیان پیچیدگی محاسباتی، تعداد عملگرهای هر کدام از الگوریتم‌ها و نیز زمان لازم برای انجام برخی محاسبات در نظر گرفته نشده است؛ زیرا زمان لازم برای این اعمال در مقابل محاسبه تابع ارزیابی برای هر عضو از جمعیت قابل چشم‌پوشی است.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش EA-PTS برای کاهش PAPR در سیستم‌های OFDM بررسی و شبیه‌سازی شد. هسته اصلی روش EA-PTS، نسخه گسسته‌ای از الگوریتم EA است. برای طراحی نسخه گسسته‌ای از الگوریتم EA، در

[ Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-12 ]

[ DOI: 10.52547/jsdp.19.2.13 ]

مرحله تبلیغات مثبت از عملگر تقاطع دو نقطه‌ای الگوریتم GA استفاده شد. نسخه گسسته EA برای جستجوی فاکتورهای فاز بهینه در PTS استفاده می‌شود. الگوریتم‌های ژنتیک (GA) و رقابت استعماری (ICA) نیز شبیه‌سازی و با الگوریتم پیشنهادی مقایسه شدند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که EA-PTS علاوه‌بر داشتن پیچیدگی محاسباتی کمتر مقدار PAPR را نیز به میزان قابل قبولی کاهش می‌دهد.

## ۸- مراجع 8- References


[1] R. Prasad, "OFDM for wireless communications systems", Artech House, 2004.

[2] Y. Rahmatallah, S. Mohan, "Peak-to-average power ratio reduction in ofdm systems: A survey and taxonomy", *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 15, no. 4, pp. 1567–1592, 2013.

[3] F. Sandoval, G. Poitau, F. Gagnon, "Hybrid peak-to-average power ratio reduction techniques: Review and performance comparison", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 27145–27161, 2017.

[4] K. Anoh, C. Tanriover, B. Adebisi, "On the optimization of iterative clipping and filtering for papr reduction in ofdm systems", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 12004–12013, 2017.

[5] S. Peng, Z. Yuan, "A novel criterion for designing of nonlinear companding functions for peak-to-average power ratio reduction in multicarrier transmission systems", *Wireless Networks*, vol. 24, no. 2, pp. 581–595, 2018.

[6] I. Baig, V. Jeoti, A. A. Ikram, M. Ayaz, "Papr reduction in mobile wimax: a novel dst precoding based random interleaved ofdma uplink system", *Wireless networks*, vol. 20, no. 5, pp. 1213–1222, 2014.

[7] M. M. Hasan, "A novel cvm precoding scheme for papr reduction in ofdm transmissions", *Wireless networks*, vol. 20, no. 6, pp. 1573–1581, 2014.

[8] A. A. Sharifi, "A new post-coding approach for PAPR reduction in DC-biased optical OFDM systems", *Optoelectronics Letters*, vol. 15, no. 4, pp. 302-305, 2019.

[9] M. Jangalwa, V. Tokekar, "Performance analysis of selective mapping and clipping based multicarrier-cdma system with and without mimo technique", *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 101, pp. 62–68, 2019.

[10] Y. A. Jawhar, L. Audah, M. A. Taher, K. N. Ramli, N. S. M. Shah, M. Musa, M. S. Ahmed, "A review of partial transmit sequence for papr reduction in the ofdm systems", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 18021–18041, 2019.

[11] J.-K. Lain, S.-Y. Wu, P.-H. Yang, "Papr reduction of ofdm signals using pts: a real-valued genetic approach", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 1, no. 126, 2011.

[12] M. H. Aghdam, A. A. Sharifi, "Papr reduction in ofdm systems: An efficient pts approach based on particle swarm optimization", ICT Express, 2018.

[13] Y. Wang, W. Chen, C. Tellambura, "A papr reduction method based on artificial bee colony algorithm for ofdm signals", *IEEE transactions on wireless communications*, vol. 9, no. 10, pp. 2994–2999, 2010.

[14] N. Taspinar, A. Kalinli, and M. Yildirim, "Partial transmit sequences for PAPR reduction using parallel tabu search algorithm in OFDM systems", *IEEE Communications Letters*, vol. *15, no.* 9, pp.974-976, 2011.

[15] M. Singh, S. K. Patra, "Partial transmit sequence optimization using improved harmony search algorithm for papr reduction in ofdm", *ETRI Journal*, vol. 39, no. 6, pp. 782–793, 2017.

[16] J. Zhou, E. Dutkiewicz, R. P. Liu, X. Huang, G. Fang, Y. Liu, "A modified shuffled frog leaping algorithm for papr reduction in ofdm systems", *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 61, no. 4, pp. 698–709, 2015.

[17] T. Zhang, S. Li, and X. Yu, "Global optimal firefly algorithm in peak-to-average power ratio reduction of orthogonal frequency division multiplexing systems", *Sensor Letters*, vol. 12, no. 2, pp. 281-286, 2014.

[18] R. S. Rao, P. Malathi, "A novel pts: grey wolf optimizer-based papr reduction technique in ofdm scheme for high-speed wireless applications", *Soft Computing*, vol. 23, no. 8, pp. 2701–2712, 2019.

[19] H. Emami and F. Derakhshan, "Election algorithm: a new socio-politically inspired strategy", *AI Commun*, vol. 28, no. 3, pp. 591–603, 2015.

[20] R. L. Haupt and S. E. Haupt, "Practical genetic algorithms", John Wiley & Sons, Inc., Publication, 1998.

[21] E. Atashpaz-Gargari and C. Lucas, "Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 4661–4667, 2007.

[22] S. Talatahari, B. F. Azar, R. Sheikholeslami, and A. H. Gandomi, "Imperialist competitive algorithm combined with chaos for global


[ Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-12 ]

[ DOI: 10.52547/jsdp.19.2.13 ]

optimization", Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul, vol. 17, no. 3, pp. 1312–1319, 2012.

[23] M. Jamil and X. S. Yang,"A literature survey of benchmark functions for global optimisation problems",Int. J. Math. Model. Numer. Optim.vol. 4, no. 2, pp. 150–194, 2013.

**عباسعلی شریفی** دانش‌آموخته مقطع دکترا در رشته مهندسی برق مخابرات از دانشگاه تبریز و در حال حاضر دانشیار گروه مهندسی برق دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بناب است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان پردازش سیگنال، مخابرات بی‌سیم، شبکه‌های رادیوشناختی است.
نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:
**sharifi@ubonab.ac.ir**

**حجت امامی** دانش‌آموخته مقطع دکترا در رشته مهندسی کامپیوتر از دانشگاه صنعتی مالک اشتر و در حال حاضر دانشیار گروه مهندسی کامپیوتر دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بناب است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان هوش مصنوعی، داده‌کاوی، و بهینه‌سازی است.
نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:
**emami@ubonab.ac.ir**

[ Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-12 ]

[ DOI: 10.52547/jsdp.19.2.13 ]

[ DOI: 10.52547/jsdp.19.2.13 ] [ Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-12 ]