



Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



**Iranian
Concrete
Institute**



**Pavement
Engineering
Association of Iran**

Determination of the Optimal Position of Cables in Guyed Masts Using Meta-Heuristic Algorithms

Research Article

Houshyar Eimani Kalehsar¹ , Amirreza Esmaeile Aghdam²

DOI: [10.22067/jfcej.2024.75849.1131](https://doi.org/10.22067/jfcej.2024.75849.1131)

1- Introduction

Today, for telecommunication purposes, prestressed guyed towers have become more common than other self-supporting towers. The use of prestressed cables in engineering structures has gained significant popularity. Some examples are industrial unit chimneys, transmission towers, wind turbines, and building retrofits. Guyed masts are telecommunication towers equipped with guy wires, which are tensioned cables used to stabilize the tower. The guyed mast is acknowledged as a slender structure with highly non-linear geometrical behavior.

An early study used a simple method of analyzing guyed masts. The cable angle was assumed constant at 45 degrees in the work of Bell et al., and optimization variables were cable diameter, cable prestressing force, and vertical and diagonal member cross-sections. Other studies in the field of guyed masts investigated the dynamic behavior of guyed masts with prestressed cables under lateral forces, the effects of prestressed values, and proposed relationships to estimate the frequency values of structures.

In the research of Saudi et al., the natural frequencies were identified by measuring the ambient response of a full-scale guyed mast. Subsequently, a detailed 3D finite element model was created to replicate the measured dynamic characteristics. Structural parameters were adjusted to generate the global modes that corresponded to the peaks identified in the spectral analysis. According to the research results, as the weight of the antenna increases, the frequency values of the guyed masts decrease. In 2003, a case study of a full-scale model was conducted using analytical and experimental methods at a height of 50 meters. The study aimed to record the forces generated by wind on the guyed mast structure.

In a similar study, Luzardo et al. examined the effects of the initial tension of guys in a range of 5%-20% of the breaking load, and changes in the fundamental period of the mast and the values of the displacement of the guyed,

the axial forces. According to the results of the research, increments of the prestressing force of the cables caused an increase in the natural frequency of the structure.

The main objective of the current study was to obtain a design that would maximize the frequency of the Guyed masts. Meta-heuristic algorithms are applied in optimization problems in a variety of fields, including engineering, economics, and computer science. In this paper, three population-based meta-heuristic algorithms are employed for frequency optimization of Guyed masts. These algorithms consist of the Genetic Algorithm (GA), Firefly Algorithm (FA), and Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO) aimed to maximize the natural frequencies of Guyed masts while satisfying their constraints. The study on optimizing the position of the cable anchorages along the pole of a guyed tower using algorithms demonstrates that the optimal values for these angles are approximately 35 degrees without pretension forces in the guys. Additionally, the optimum cable angle is 75 degrees when subjected to prestressed guy cables.

Keywords: Guyed mast, Genetic algorithm, Firefly Algorithm, Particle Swarm Algorithm, Optimization

2-Problem Statement

The methodology of the present work aimed to maximize the frequency of the Guyed masts by utilizing a combined approach of a relaxed penalized objective function formulation and structural analysis of Guyed masts.

In this study, the cable angle with the horizon and the position of the prestressed cable anchorages along the pole of a guyed tower are defined as design variables. The use of optimization algorithms with tens of design parameters involves analyzing the mast structure and calculating the objective function numerous times.

3- Numerical Examples and Discussion

Example 1

Comparing the vibrational frequency responses of the

*Manuscript received April 5, 2022, Revised June 12, 2024, Accepted October 7, 2024.

¹ Corresponding author. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabil, Iran. **Email:** hek@uma.ac.ir

² Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

system assuming the rigidity of the mast structure and also considering that the cable behavior is modeled with an ideal spring and sufficient pre-tension. According to Figure 1, the schematic model of the guyed mast with prestressed cables is considered as one-degree-of-freedom system. Each prestressed cable consists of two variables: angle and vertical connection position of the cable at the height of mast.

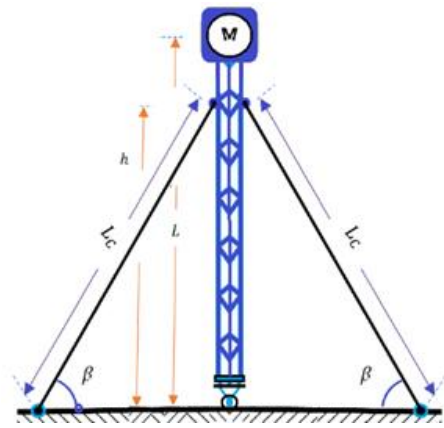


Figure 1. Scheme of the guyed mast with prestressed cables

Example 1 has been solved under two conditions: the cable is modeled by two-ideal-spring and ideal spring by removing the compressive cable. It can be seen from the results found out by meta-heuristic algorithms and analysis solutions that the optimum angle is 35 degree. This paper, considering the influence of pre-tension force of cables, took the lateral stiffness of the spring from reference number 22. Under the guy cables with pre-tension force, the optimal angle for cable arrangement is 75 degrees.

Example 2

In this example, a guyed mast with 36.5 m height was considered. The frequency of the structure and the optimum angle of cables could be determined by varying the number of prestressed cables, which ranged from 2 to 12 at the height of the guyed structure.

Example 3

In this section, the variation in the guyed mast frequency in relation to the guyed height variation from 60 m up to 400 m was investigated. The number of cables was determined by dividing the height of the mast by 15 m. Prestressed force of cables was about 10% of the breaking strength of the cable, and the diameter of the clusters of guys was also 30 mm. The weight of the antenna at top of the guyed mast was 100 kg, and unit weight of the guyed structure was 25 kg per unit length. In this part, the optimal cable angle was 75 degrees.

Example 4

Investigating the variation in the unit mass of guyed masts and the weight of antennas on top of the mast is crucial for

optimizing the design and ensuring structural stability. The present study indicated that as the initial unit mass of the guyed mast increases, the fundamental frequency of the structure decreases. This implies that heavier weights or masses attached to the mast result in lower natural frequencies in concern to the dynamic properties of the guyed mast. The observation suggests that increasing the concentrated mass of the antenna does not significantly affect the frequency characteristics of the structure.

Example 5

The guyed mast frequency changes in Example 1 can be examined by analyzing variations in the pre-tension force of cables and considering two modes: when the cables are loaded (weight of the cable) and unloaded (lack of weight). The frequency of the structure increases when the pre-tension force is increased and the weight of the cables is considered. The range of prestressing forces can vary significantly, typically falling between 1% to 95% of the breaking load of the cable.

4- Conclusions

In this study, the optimization of the cable angle on a guyed mast was investigated using three different optimization techniques: GA, FA, and PSO.

The results are summarized as follows:

1. The recommended optimal angle for the cables is 75 degrees in relation to the horizon.
2. Increase in the number of cables in the guyed mast leads to a higher level of structural stiffness, resulting in a rise in the vibrational frequency values.
3. The optimal values for cables angle are approximately 35 degrees without pretension forces in the guys. Additionally, the optimum cable angle is 75 degrees when subjected to prestressed guy cables.
4. The most cost-effective method to enhance the natural frequency of the guyed mast structure is reducing the unit weight of the guyed.
5. With an increase in the prestressed cable force values, the process of increasing the frequency of the cable mast is significant. Raising the prestressed cable force by four times results in approximately a doubling of the frequency of the guyed mast structure.



تعیین موقعیت بهینه کابل‌ها در دکل‌های مهاری با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری*

مقاله پژوهشی

امیررضا اسمعیلی اقدم^(۲) هوشیار ایمانی کله سر^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2024.75849.1131

چکیده دکل‌های مهار شده از جمله سازه‌های بلند و لاغر هستند که استفاده گسترده‌ای در انواع مقاصد مخابراتی دارند. این سازه‌ها شامل یک دکل عمودی هستند که به صورت جانبی در چندین تراز ارتفاعی از طریق کابل‌های پیش‌تنیده مهار می‌شوند. پر واضح است که فرکانس طبیعی ارتعاش، از عوامل اساسی اثرگذار در رفتار دینامیکی سازه‌ها بوده و بهینه‌سازی فرکانس طبیعی دکل‌های مهار شده از موضوعات مهم در مهندسی سازه می‌باشد. هدف اصلی در این پژوهش، دستیابی به طرحی به منظور افزایش فرکانس ارتعاش طبیعی سیستم است. الگوریتم‌های فراابتکاری در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی و در حوزه‌های مختلف شامل مهندسی، اقتصاد و علوم کامپیوتری کاربرد داشته و در این پژوهش از سه الگوریتم فراابتکاری جهت بهینه‌سازی فرکانس دکل‌های مهاری استفاده می‌شود. الگوریتم‌ها شامل الگوریتم ژنتیک، کرم شب‌تاب و ازدحام ذرات بوده که با تابع هدف در راستای افزایش فرکانس ارتعاشی سیستم تعریف می‌شوند. در این تحقیق، طرح بهینه زوایای کابل‌های مهاری توسط الگوریتم‌ها نشان داد که مقادیر بهینه زوایای کابل‌های مهاری در شرایط بدون لحاظ نیروی پیش‌تندگی در حدود ۳۵ درجه می‌باشد. همچنین با لحاظ نیروی پیش‌تندگی زاویه کابل‌ها ۷۵ درجه نسبت به افق می‌شوند.

واژه‌های کلیدی دکل مخابراتی، الگوریتم ژنتیک، کرم شب‌تاب، الگوریتم ازدحام ذرات، بهینه‌سازی.

Determination of Optimal Position of Cables in Guyed Masts by Using Meta-Heuristic Algorithms

Houshyar Eimani Kalehsar

Amirreza Esmaeile Aghdam

Abstract Guyed masts are slender, tall structures widely used to support various types of antennas in the field of telecommunications. These structures consist of a tall vertical mast laterally supported at several levels along its height by sets of inclined pre-tensioned cables. It is well known that natural frequencies are fundamental parameters that affect the dynamic behavior of structures. Optimizing natural frequencies of Guyed masts is an important issue in structural engineering. The main objective of this study presented in this paper is to obtain a design that will maximize the frequency of the Guyed masts. Meta-heuristic algorithms are applied in optimization problems in a variety of fields, including engineering, economics, and computer science. In this paper, three population-based meta-heuristic algorithms are employed for frequency optimization of Guyed masts. These algorithms consist of the Genetic Algorithm (GA), Firefly Algorithm (FA) and Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO) aims to maximize the natural frequencies of Guyed masts while satisfying their constraints. The study on optimizing the position of the cable anchorages along the pole of a guyed tower using algorithms demonstrates that the optimal values for these angles are approximately 35 degrees without pretension forces in the guys. Additionally, the optimum cable angle is 75 degrees when subjected to prestressed guy cables.

Key words Guyed mast, Genetic algorithm, Firefly Algorithm, Particle Swarm Algorithm, Optimization.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۷/۱۷ می‌باشد.

Email: hek@uma.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

(۲) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

مقدمه و تاریخچه تحقیقات

امروزه برای مقاصد مخابراتی، دکل‌های مهار شده با کابل پیش‌تینده نسبت به سایر دکل‌های خود ایستا رواج بیشتری پیدا کرده است. دکل‌های مهار شده، به دلیل وزن پایین و هزینه ساخت کمتر با ارتفاعات کوتاه و بلند برای نواحی شهری و خارج از شهر در فضاهایی با زمین کافی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از کابل‌های پیش‌تینده در سازه‌های مهندسی کاربردهای وسیعی داشته و نمونه‌های آن را می‌توان در مهار دودکش‌های واحدهای صنعتی، دکل‌های انتقال نیرو، توربین‌های بادی و در سال‌های اخیر در مقاوم‌سازی ساختمان‌ها مشاهده نمود.

نظر به اهمیت مسائل اقتصادی، طراحی چنین سازه‌ها با استفاده از دکل‌های خود ایستا حداکثر تا ارتفاع ۱۰۰ متر معمول بوده و برای دکل‌های بلند تا ۶۰۰ متر از سیستم دکل‌های مهار شده با کابل استفاده شده است. در تحقیقات اولیه از یک روش ساده جهت تحلیل کابل‌های مهاری استفاده گردیده است در پژوهش بل و همکاران، زاویه کابل ثابت و ۴۵ درجه فرض شده و متغیرهای بهینه‌سازی شامل قطر کابل، نیروی پیش‌تندگی کابل‌ها، سطح مقطع اعضای عمودی و مورب می‌باشند [1]. در پژوهش‌های گانتس و همکاران، بررسی رفتار غیر خطی کابل‌ها با لحاظ مقادیر نیروی پیش‌تندگی اعمالی برای دکل‌های مهاری صورت گرفته است [2]. بررسی رفتار دینامیکی سازه‌های مهاری با کابل‌های پیش‌تینده تحت نیروهای جانبی و اثرات مقادیر پیش‌تندگی و روابط پیشنهادی جهت تخمین مقادیر فرکانس سازه از پژوهش‌های دیگر در حوزه دکل‌های مهاری می‌باشد [3]. در خصوص عملکرد کابل‌های پیش‌تینده در مقاوم‌سازی قاب‌های سازه‌ای می‌توان به پژوهشی در حوزه بهبود رفتار قاب‌های خمشی با مهارندهای ضربدری از جنس کابل پیش‌تینده اشاره نمود [4]. ساودی و همکاران در سال ۲۰۱۴ ارزیابی فرکانس طبیعی یک دکل مهاری واقعی به ارتفاع ۹۰ را به صورت تجربی مورد بررسی و نتایج حاصل از سنجش فرکانس در محل را با فرکانس حاصل از روش‌های تحلیلی و عناصر محدود مورد مقایسه قرار داده‌اند. مطابق با نتایج تحقیقات، با افزایش در وزن آنتن، مقادیر فرکانس سازه دکل کاهش می‌یابد [5]. در سال ۲۰۰۳ یک مطالعه موردی از دکل واقعی با روش‌های تحلیلی و تجربی برای دکل با ارتفاع ۵۰ متر و با رویکرد ثبت نیروهای وارده حاصل از باد روی سازه دکل صورت گرفت [6]. همچنین در سال ۲۰۱۸ بالین و همکاران به

مطالعه بر رفتار دینامیکی دکل‌های مهاری و اثرات نیروی پیش‌تندگی کابل‌ها روی فرکانس سازه پرداخته‌اند [7]. در تحقیق مشابهی لوزاردو به بررسی اثرات مقادیر نیروهای پیش‌تندگی کابل‌ها در یک محدوده ۵ الی ۲۰ درصد از مقادیر تنش نهایی کابل و تغییرات در مقادیر فرکانس سازه، جابه‌جایی دکل، نیروهای محوری و... پرداخته‌اند. مطابق با نتایج تحقیقات، با افزایش مقادیر نیروی پیش‌تندگی، مقادیر فرکانس سازه نیز روند افزایشی پیدا می‌کند [8]. از تحقیقات دیگر در خصوص کاهش دامنه ارتعاشات دکل مهاری تحت بارهای باد می‌توان به تحقیقات مربوط به کنترل فعال چنین سازه‌هایی اشاره نمود [9]. در زمینه تحلیل فرکانس ارتعاش سازه‌های بلند به صورت تقریبی و توزیع غیر یک‌نواخت جرم و سختی به تحقیقات کاظمی و همکاران می‌توان اشاره نمود [10]. با توجه به اثر قابل توجه نیروی باد در پایداری سازه‌های دکل مهاری، به تحقیقات پزو و همکاران در بررسی رفتار دینامیکی سازه دکل مهاری تحت نیروی باد می‌توان اشاره نمود [11]. از پژوهش‌های دیگر در حوزه بهینه‌سازی موقعیت کابل‌های دکل مهاری تحت جریان آشفته باد با تابع هدف کمینه نمودن وزن سازه، به استفاده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی می‌توان اشاره نمود [12]. در خصوص بررسی ناپایداری دکل‌های مهاری تحت نیروی پیش‌تندگی و بار جانبی با حداقل مقادیر ممان اینرسی، برای بخش سازه عمودی دکل، می‌توان به پژوهش‌های گلدبرک اشاره نمود [13]. یکی از پژوهش‌های مرتبط با بهینه‌سازی شکل و اندازه دکل مهاری با تحلیل غیر خطی و استفاده از الگوریتم ژنتیک مربوط به بهینه نمودن وزن دکل مهاری با ارتفاع ۳۰ متر می‌باشد [14]. همچنین در تحقیق دیگری روند بهینه‌سازی دکل مهاری به ارتفاع ۹۵ متر، با متغیرهایی مانند مقادیر نیروی پیش‌تندگی، زوایای کابل‌ها، قطر کابل و قطر عناصر سازه عمودی دکل و... و در حالت‌های مختلف آرایش کابل‌ها با تابع هدف کمینه نمودن وزن سازه صورت گرفته است [15]. این پژوهش، با هدف حداکثر نمودن فرکانس ارتعاش سازه دکل مهاری در آرایش‌های مختلف کابل، با فرض صلب بودن سازه خرابی دکل مهاری و مدل‌سازی رفتار کابل به صورت فنر معادل ایدئال و همچنین لحاظ نمودن اثر پیش‌تندگی و با فرض دو متغیر برای هر کابل نگه‌دارنده دکل صورت می‌گیرد. نتایج حاصل از الگوریتم‌های ازدحام ذرات، ژنتیک و کرم شب‌تاب نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین اثر سایر متغیرها نظیر تغییرات جرم متمرکز، جرم واحد طول دکل و تعداد کابل مهاری در

شده مقادیری برابر ۱۵ درصد اختلاف بین حد بالا و پایین متغیرها محاسبه و به هر متغیر اضافه می‌گردد.

پاسخ فرکانسی سیستم بررسی می‌شود.

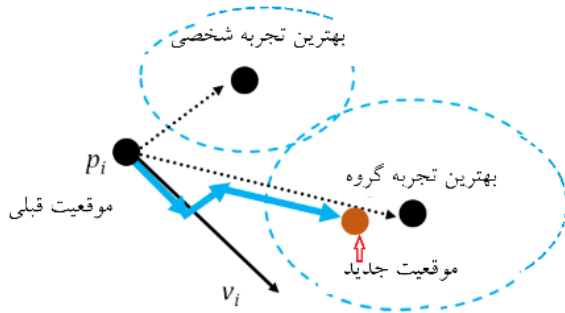
الگوریتم ژنتیک

جدول ۱ متغیرهای الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک	
تعداد جمعیت اولیه	Population = 20
درصد باز ترکیب	$C_p = 0.8$
نرخ جهش	Mu=0.2
تعداد تکرار	Iteration = 100

الگوریتم ازدحام ذرات

بهینه‌سازی ازدحام ذرات در سال ۱۹۹۵ توسط جیمز کندی و راسل ابداع شده است. در این الگوریتم، گروهی از پرندگان در حال حرکت، دائم در حال تغییر موقعیت بوده و مدل تغییرات در بردار جابه‌جایی هر ذره در هر تکرار با لحاظ بهترین تجربه گروه ذرات و تجربه شخصی هر ذره بهبود داده می‌شود. این الگوریتم با شبیه‌سازی رفتار اجتماعی پرندگان، هر ذره یک موقعیت تصادفی و مختصات ذره در فضای جستجوی چند بعدی تعریف و متناسب با موقعیت آن مقداری بر اساس روابط تابع هدف محاسبه می‌گردد. مطابق شکل شماره (۱) موقعیت جدید هر ذره بر اساس سه بردار شامل سرعت اولیه، بهترین تجربه شخصی هر ذره و بهترین تجربه گروه محاسبه می‌گردد. محاسبات الگوریتم ازدحام ذرات مطابق رابطه (۲) صورت می‌گیرد [19].



شکل ۱ بردارهای جابه‌جایی ذرات در الگوریتم ازدحام ذرات

$$V_i^{t+1} = w \cdot V_i^t + C_1 \text{rand.} (p_i^b - p_i^t) + C_2 \text{rand.} (g^b - p_i^t) \quad (1)$$

$$P_i^{t+1} = P_i^t + V_i^{t+1} \quad (2)$$

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی و جستجو بر پایه قوانین ژنتیک می‌باشد. این الگوریتم برای هر دسته متغیر یک دسته ژن را تعریف می‌کند و هر کروموزوم شامل دسته‌ای از ژن‌ها و هر ژن بیانگر یک متغیر مسئله می‌باشد. این الگوریتم همزمان در یک میدان جستجو چندین نقطه را انتخاب کرده و ارزش هر نقطه جستجو به صورت مستقل محاسبه می‌شود. این الگوریتم از قوانین علم ژنتیک استفاده کرده و اصطلاحات ژنتیکی آن به این صورت می‌باشد که یک کروموزوم شامل برداری از اعداد که همان متغیرهای مسئله بوده و تشکیل شده از چند ژن و هر ژن بیانگر یک متغیر برای حل مسئله می‌باشد [16]. یک کروموزوم بعد از قرار گرفتن در فرایند حل مسئله با توجه به تابع هدف از یک درجه مطلوبیتی برخوردار می‌شود و مقدار حاصل از مجموعه متغیرهای کروموزوم در یک تابع هدف به میزان سازگاری معروف می‌شود. همچنین برای تولید نسل‌های بهتر می‌بایست عملیات جابه‌جایی ژن‌های متناظر از دو کروموزوم به عنوان والد‌های تولید نسل صورت گیرد که به این مرحله تبادل ژن گفته می‌شود. برای همگرایی بهتر مسئله در رسیدن به پاسخ کمینه باید تغییرات تصادفی در یک یا چند ژن و چند کروموزوم منتخب صورت گیرد. در این الگوریتم ابتدا متغیرهای مسئله شناسایی و تابع هدف و متغیرهای لازم شناسایی شده و سپس جمعیتی از کروموزوم‌ها که شامل یک رشته از متغیر پیوسته می‌باشد به صورت تصادفی ساخته می‌شود و در مرحله بعدی با استفاده از عملگرهای گزینشی کروموزوم‌های والد تعیین و فرزندان جدید تولید می‌شوند. بعد از اعمال عملگرهای جهش و تبادل ژنی، فرزندان جدید با توجه به تابع هدف، ارزیابی و در ادامه با انتخاب کروموزوم‌های والد جدید که بهترین‌ها می‌باشند عملیات تکرار شده تا جواب بهینه حاصل شود. الگوریتم ژنتیک با استفاده از عملگرهای پیوند و جهش به جستجوی فضای مسئله با نرخ مشخص جهش می‌پردازد [17,18]. مطابق با جدول شماره (۱) درصد باز ترکیب برابر ۰/۸ که ۸۰ درصد جمعیت را برای انجام عملیات بازترکیب انتخاب می‌کند. همچنین نرخ جهش برابر ۰/۲ که با عملیات جهش، ۲۰ درصد متغیرها انتخاب و در برنامه نوشته

ضریب مربوط به تنوع جذابیت بوده و برابر ۱ می‌باشد. نحوه حرکت کرم شب‌تاب با رابطه (۳) می‌باشد.

$$x_{i+1} = x_i + \beta_0 \cdot (e^{-\gamma r_{ij}^2}) \cdot (x_j - x_i) + \alpha_0 \cdot \text{rand} \quad (3)$$

در رابطه فوق، x_i موقعیت اولیه کرم شب‌تاب i و x_j موقعیت کرم شب‌تاب j و r_{ij} فاصله اقلیدوسی دو کرم شب‌تاب x_{i+1} نیز موقعیت ثانویه بعد از حرکت می‌باشد.

معرفی مسئله بهینه‌سازی

در فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی، هدف اصلی یافتن بردارهای متغیرهای طراحی در یک محدوده حداقل و حداکثری می‌باشد. الگوریتم‌های بهینه‌سازی به صورت تصادفی از لیست مقادیر اولیه، کمیت‌هایی را انتخاب و مسئله بهینه‌سازی را با کنترل قیدهای حاکم حل می‌نمایند. در یک مسئله بهینه‌سازی، تابع هدف مطابق رابطه (۴) تعریف می‌گردد که متغیرهای طراحی باید ضمن ارضای تمامی محدودیت‌ها، تابع هدف را به کمترین مقدار ممکن سوق دهند.

$$\text{Minimize: } F(x) \quad (4)$$

$$\text{Subject to : } S_k^{\min} \leq S_k \leq S_k^{\max} \quad (1-4)$$

$$X^{\min} \leq X_i \leq X^{\max} \quad (2-4)$$

در رابطه فوق $F(x)$ تابع هدف، x بردار متغیرهای طراحی، X_i و S_k^{\min} و S_k^{\max} به ترتیب متغیرهای طراحی، حدود بالایی قیدها و حد پایینی قیدهای طراحی می‌باشد.

تابع هدف

هر مسئله بهینه‌سازی با مجموعه‌ای از کمیت‌ها بیان می‌شود که تعدادی از این کمیت‌ها به صورت متغیر و برخی از کمیت‌ها به صورت عامل‌های ثابت با مقادیر معلوم تعریف می‌شوند. با توجه به اینکه هدف اصلی بهینه‌سازی، انتخاب بهترین طرح، از بین طرح‌های قابل قبول می‌باشد. لذا معیار مقایسه‌ای جهت انتخاب بهترین طرح با محدودیت‌های مسئله، تابع هدف مسئله می‌باشد. در این تحقیق، معکوس مقدار فرکانس ارتعاشی سازه به عنوان تابع هدف و زاویه کابل‌های نگه‌دارنده با افق و موقعیت ارتفاعی اتصال کابل‌ها به سازه دکل به عنوان متغیرهای طراحی تعریف می‌شوند.

بهترین تجربه pb_i^t سرعت جدید ذره، V_i^{t+1} در روابط فوق p_i^t بهترین تجربه گروهی از بین ذرات و gb^t و g و gb^t شخصی هر ذره موقعیت قبلی ذره می‌باشد. مطابق با جدول شماره (۲) مقادیر مربوط به ضرایب یادگیری با تجربه شخصی C_1 و C_2 متغیرهای ضریب اینرسی سرعت w و تجربه گروهی با مقادیر ۲ می‌باشند. ذرات از مقادیر $0/9$ تا $0/4$ به صورت خطی تا تکرار آخر کاهش می‌یابد.

جدول ۲ متغیرهای الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات	
تعداد جمعیت اولیه	Population = 20
ضریب یادگیری	$C_1 = C_2 = 2$
ضریب اینرسی	$w_2 = 0.9 \quad w_1 = 0.4$
تعداد تکرار	Iteration = 100

الگوریتم کرم شب‌تاب

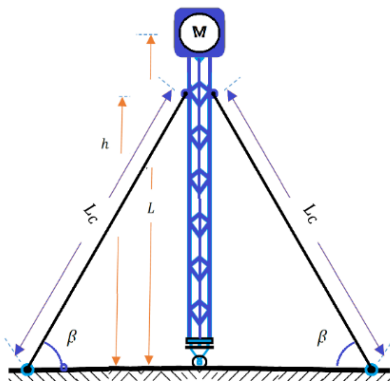
الگوریتم کرم شب‌تاب Firefly Algorithm به اختصار FA در سال ۲۰۰۷ توسط Xin-She Yang معرفی شد و ایده اصلی آن ارتباط نوری بین کرم‌های شب‌تاب الهام گرفته از طبیعت می‌باشد. میزان جذابیت هر کرم شب‌تاب متناسب با شدت روشنایی هست که توسط سایر کرم‌ها مشاهده می‌شود. در الگوریتم کرم شب‌تاب سه شرط می‌بایست رعایت گردد. شرط اول هم جنس بودن کرم‌های شب‌تاب، شرط دوم تناسب قدرت جذب هر کرم شب‌تاب با شدت نور و شرط سوم در خصوص کیفیت جواب و میزان نزدیکی آن به تابع هدف است که متناسب با درخشندگی تعریف می‌گردد [20].

جدول ۳ متغیرهای الگوریتم کرم شب‌تاب

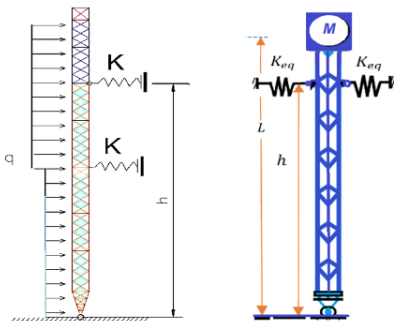
الگوریتم کرم شب‌تاب	
تعداد جمعیت اولیه	Population = 20
جذابیت در $r=0$	$\beta_0 = 2$
تنوع جذابیت	$\gamma = 1$
عدد تصادفی	$\alpha_0 = 0.2$
تعداد تکرار	Iteration = 100

در جدول (۳) مقادیر β_0 ضریب جذابیت که با فاصله دو کرم شب‌تاب محاسبه و α_0 مقادیر تصادفی جهت تغییر زاویه حرکت هر کرم شب‌تاب در هر مرحله از حرکت می‌باشد. γ

شامل می‌شود. همان طور که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد سازه خرپایی دکل به واسطه دو کابل ارتجاعی به طول‌های L_c با زاویه نسبت به افق برابر β و موقعیت ارتفاعی نصب کابل یعنی h مجموعه سیستم ارتعاشی را تشکیل می‌دهند. سختی جانبی و پایداری کلی سازه با کابل‌های پیش‌تنیده طرفین صورت می‌گیرد و سختی کابل‌های فوق با فنری ایدئال معادل می‌شود. سختی معادل کابل‌های پیش‌تنیده طرفین سازه خرپایی از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.



شکل ۲ سازه دکل مهاری با کابل‌های پیش‌تنیده



شکل ۳ مدل دکل مهاری با فنر ایدئال معادل

همان طور که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد سازه خرپایی دکل به واسطه دو کابل ارتجاعی به طول‌های L_c و زاویه β و موقعیت ارتفاعی نصب h مجموعه سیستم ارتعاشی را تشکیل می‌دهند. سختی جانبی و پایداری سازه با کابل‌های پیش‌تنیده طرفین صورت می‌گیرد و سختی کابل‌های فوق با فنری معادل می‌شود که فرض می‌شود به اندازه کافی پیش‌تنیده هستند و رفتار ایدئال عضو خرپا مانند را در سختی جانبی تشکیل می‌دهند.

$$F(x) = 1/\omega_n \quad (5)$$

تابع جریمه

محاسبات بر اساس الگوریتم‌های فراابتکاری برای مسائل بهینه سازی بدون قید بوده و جهت کاربردی نمودن الگوریتم‌ها و ادغام مقادیر محدودیت مسائل مقید می‌بایست تابع هدف و مجموع قیود حاکم با تابع معادل تعریف شوند. رایج‌ترین مدل برای تشکیل چنین تابع معادل، استفاده از روش جریمه و در این تحقیق تعریف تابع جریمه به صورت زیر می‌باشد [21].

$$P(X) = F(X)[1 + P \cdot C] \quad (6)$$

در رابطه فوق $P(X)$ تابع هدف جریمه شده و ضریب P عدد ثابت و مثبتی که به ضریب جریمه معروف بوده و بر اساس نوع مسئله توسط کاربر تعیین می‌شود. همچنین ضریب C مجموع مقادیر نسبی قیدهای نقض شده می‌باشد. در این پژوهش $P=10$ در نظر گرفته شده است. در مسائل کمینه‌سازی، اگر تخطی از محدودیت‌ها صورت نگیرد در این صورت مقدار عددی C برابر صفر خواهد شد.

$$\text{if } \rightarrow g(X_i) > 0 \rightarrow \text{then } C_i = g(X_i) \quad (7)$$

$$\text{elseif } \rightarrow g(X_i) \leq 0 \rightarrow \text{then } C_i = 0 \quad (8)$$

$$C = \sum_{i=1}^m C_i = \sum_{i=1}^m g(X_i) \quad (9)$$

جدول ۴ قیدهای مربوط به متغیرهای طراحی

شماره	متغیر طراحی	قیدهای مشخصه
g_1	$0.06\pi \leq \beta \leq 0.45\pi$	زاویه کابل (رادیان)
g_2	$0.1L \leq h \leq L$	ارتفاع نصب کابل (متر)

مثال عددی

مثال ۱

برای مقایسه پاسخ‌های فرکانس ارتعاشی سیستم با فرض صلب بودن سازه دکل، همچنین با فرض اینکه رفتار کابل با فنر ایدئال و پیش‌تنیدگی کافی مدل شود. بررسی پاسخ حاصل از تحلیل و پاسخ الگوریتم‌های فراابتکاری مورد مقایسه قرار می‌گیرد. مطابق شکل (۲) مدل شماتیک دکل مهار شده با کابل‌های پیش‌تنیده به صورت یک سیستم یک درجه آزادی بوده و هر کابل مهارکننده شامل دو متغیر زاویه و موقعیت اتصال کابل در ارتفاع دکل را

مهاری شده مطابق جدول (۵) بوده و نتایج حاصل از محاسبات تحلیلی و الگوریتم‌ها به ترتیب مطابق جدول‌های (۵) و (۶) می‌باشد.

جدول ۵ مقادیر مشخصات سازه‌ای

عنوان	مقادیر عددی
مدول الاستیسیته کابل	$E_c = 178 \times 10^9 \text{ Pa}$
قطر کابل	$d_c = 12.6 \text{ mm}$
جرم متمرکز	$M = 1 \text{ kg}$
جرم واحد طول دکل	$m_b = 1.5 \text{ kg/m}$
طول دکل	$L = 36.5 \text{ m}$

جدول ۶ مقادیر بهینه متغیرها (روش تحلیلی)

عنوان متغیر	مقادیر
زاویه کابل‌ها با افق (درجه)	$\beta = 35.3$
ارتفاع کابل از زمین (متر)	$h = 36.5 \text{ m}$
فرکانس طبیعی (رادیان)	$\omega_n = 154.8$

برای هر ۳ الگوریتم بهینه‌سازی، جهت محاسبات آماری نتایج خروجی، هر الگوریتم برای ۱۰ بار اجرای مستقل ثبت تا بهترین پاسخ انتخاب گردد.

جدول ۷ نتایج الگوریتم‌های بهینه‌سازی (۲ عدد فتر)

متغیرها	در این پژوهش		
	PSO	GA	FA
$\beta(\text{deg})$	35.41	35.01	35.26
$h(\text{m})$	36.5	36.5	36.5
$\omega_n(\text{rad/s})$	154.94	154.94	154.94
Best	154.94	154.94	154.94
Std	0.0	0.0	0.0

فرکانس ارتعاش سیستم در شرایط استفاده از رفتار فتر ایدئال دو کابل برابر ۱۵۴/۹۴ رادیان بر ثانیه و زاویه کابل‌ها نسبت به افق برابر ۳۵ درجه حاصل می‌شود. در صورتی که به جای دو کابل از یک کابل در شرایط حذف شدن کابل تحت نیروی فشاری استفاده شود زاویه کابل‌ها مطابق با جدول (۸) برابر ۳۵ درجه باقی می‌مانند.

$$K_{eq} = \frac{A_c E_c}{L_c} \cdot \cos^2 \beta \quad (10)$$

در رابطه فوق E_c ، مدول الاستیسیته کابل و A_c سطح مقطع کابل پیش‌تینده و L_c ، طول کابل نگه‌دارنده و β زاویه کابل نگه‌دارنده نسبت به افق می‌باشد. همچنین ارتباط بین طول کابل و زاویه کابل و ارتفاع نصب آن به صورت رابطه (۱۱) بیان می‌شود.

$$L_c = \frac{h}{\sin \beta} \quad (11)$$

$$K_{eq} = \frac{A_c E_c}{h} \cdot \cos^2 \beta \cdot \sin \beta \quad (12)$$

معادله ارتعاش سیستم یک درجه آزاد مطابق شکل (۳) به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$(ML^2 + \frac{1}{3} m_b L^2) \ddot{\theta} + (2E_c A_c h \cos^2 \beta \cdot \sin \beta) \theta = 0 \quad (13)$$

در رابطه بالا M جرم متمرکز دکل، m_b جرم کل دکل و برابر $m_b = m'_b \cdot L$ بوده که فرکانس ارتعاش زاویه‌ای سیستم از رابطه (۱۴) قابل استخراج می‌باشد. در رابطه زیر عدد ۲ در صورت کسر به دلیل لحاظ نمودن اثر مشترک دو کابل با فرض پیش‌تیدگی ایدئال معادل فتر که در سختی جانبی در شرایط رفت و برگشت و ارتعاش سیستم، مشارکت همزمان کابل‌ها در سختی جانبی لحاظ شده باشد.

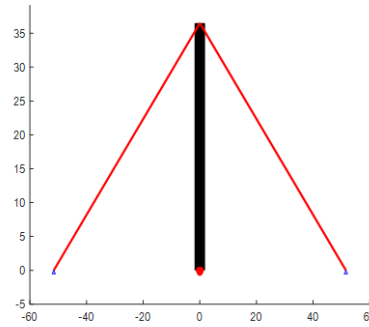
$$\omega_n = \sqrt{\frac{(2E_c A_c h \cos^2 \beta \cdot \sin \beta)}{(ML^2 + \frac{1}{3} m'_b L^3)}} \quad (14)$$

در راستای افزایش سختی جانبی دکل و با حذف آثار اندرکنش بستر سازه جهت دور شدن فرکانس طبیعی از فرکانس تحریک و جلوگیری از پدیده تشدید می‌بایست فرکانس ارتعاش سیستم حداکثر مقدار ممکن را با متغیرهای تعریف شده داشته باشد. حل معادله فوق به صورت تحلیلی با دو متغیر شامل زاویه کابل و ارتفاع نصب کابل، از رابطه (۱۵) به دست می‌آید.

$$\frac{\partial \omega_n}{\partial \beta} = 0 \rightarrow \tan \beta \cdot \tan 2 \beta = 2 \quad (15)$$

با حل رابطه فوق، زاویه بهینه کابل نسبت به افق ۳۵ درجه می‌شود. نتایج حاصل از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیز مقدار زاویه و ارتفاع نصب کابل را مطابق با مقادیر تحلیلی به دست می‌آورند. بنابراین صحت‌سنجی خروجی الگوریتم‌ها صورت می‌گیرد. مشخصات مربوط به معادلات ارتعاشی سیستم دکل

مطابق با نتایج جدول (۹) با استفاده از رابطه (۱۶) با لحاظ اثرات پیش‌تندگی در معادلات سختی فنر معادل کابل‌های مهاری، میزان زاویه بهینه کابل‌ها نسبت به افق برابر ۷۵ درجه مطابق با شکل (۴) می‌شود. همچنین مقادیر فرکانس ارتعاشی سیستم نیز در حدود ۲/۵ رادیان بر ثانیه و متناسب با آن زمان تناوب سازه ۲/۵۴ ثانیه می‌شود.



شکل ۴. شکلی هندسی سازه بهینه شده

جدول ۹. نتایج بهینه‌سازی (اثر پیش‌تندگی)

متغیرها	در این پژوهش		
	PSO	GA	FA
$\beta(\text{deg})$	75.03	75.03	75.03
$h(\text{m})$	36.5	36.5	36.5
$\omega_n(\text{rad/s})$	2.47	2.47	2.47
Best	2.47	2.47	2.47
Std	0.0	0.0	0.0

مثال ۲

در این قسمت، مثال ۱ برای حالت‌هایی که دکل در ترازهای مختلف با کابل مهار شده است بررسی می‌شود. ارتفاع دکل برای تمام حالت‌های بررسی برابر ۳۶/۵ متر است. تعداد فنرهای معادل با کابل مهارکننده در ارتفاع دکل مطابق با شکل (۶) می‌باشد. شروع بهینه‌سازی از نقاط اولیه اتصال فنرهای معادل کابل می‌باشد. مشخصات سازه‌ای مطابق با مثال ۱ می‌باشد. در این قسمت نیز، با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات و کرم شب‌تاب، روند همگرایی و پاسخ‌های مسئله مقایسه شده است.

هر کابل، با تعریف دو متغیر شامل زاویه کابل نسبت به افق و ارتفاع نصب کابل به سازه خرپایی مدل می‌شود. برای دکل با ۱۲ کابل مهاری مسئله بهینه‌سازی با ۲۴ متغیر فرمول‌بندی می‌شود. تعداد کابل‌های مهاری در ۵ مدل مهاری دکل در ارتفاع ۳۶/۵ متر بررسی می‌شود. جهت تعیین موقعیت و محدوده تغییرات فنر معادل کابل مهاری با تقسیم ارتفاع دکل به تعداد مشخص و مشخص شدن تراز هر طبقه، موقعیت اولیه هر کابل به اندازه ۵۰ درصد ارتفاع طبقه فوقانی و ۵۰ درصد از مقادیر ارتفاع طبقه تحتانی قابلیت جابه‌جایی را پیدا می‌کنند. هر کابل

جدول ۸. نتایج الگوریتم‌های بهینه‌سازی (۱ عدد فنر)

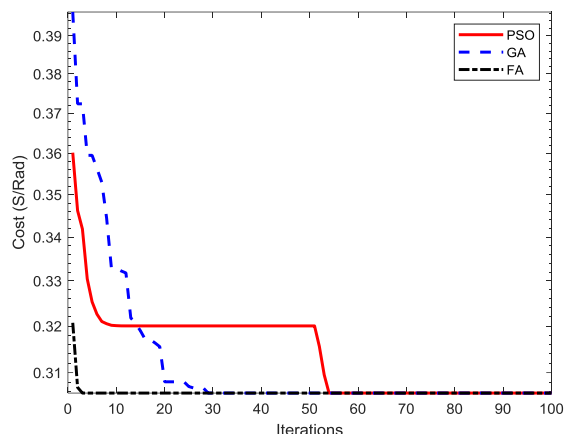
متغیرها	در این پژوهش		
	PSO	GA	FA
$\beta(\text{deg})$	35.27	35.27	35.26
$h(\text{m})$	36.5	36.5	36.5
$\omega_n(\text{rad/s})$	109.56	109.56	109.56
Best	109.56	109.56	109.56
Std	0.0	0.0	0.0

با توجه به جدول (۸)، با فرض حذف شدن یکی از فنرهای ایدئال سیستم مقادیر فرکانس سازه دکل فوق کاهش حدود ۳۰ درصدی را نسبت به حالت استفاده از دو فنر معادل نشان می‌دهد. برای سازه دکل مهاری فوق جهت در نظر گرفتن اثر نیروی پیش‌تندگی کابل‌ها از سختی معادل فنر مطابق با رابطه (۱۶) جهت مقایسه نتایج استفاده می‌شود [22].

$$k = n \cdot \left\{ T_p + \frac{0.5 \cdot A_c \cdot E \cdot \left(\frac{a}{C}\right)^2}{1 + (BT)} \right\} \cdot \frac{1}{C} \quad (16)$$

$$BT = \left\{ \left(\frac{mga}{T_p} \right) \cdot \left(\frac{A_c \cdot E}{12 \cdot T_p} \right) \right\} \quad (1-16)$$

در رابطه فوق، n تعداد کابل در هر نقطه اتصال به دکل، a تصویر افقی طول کابل، C طول مورب هر کابل، mg وزن واحد کابل، T_p نیروی پیش‌تندگی داخل کابل مهاری، A_c سطح مقطع کابل مهاری، E مدول الاستیسیته کابل می‌باشد. چگالی مصالح کابل برابر ۱۰ تن در هر مترمکعب، نیروی پیش‌تندگی نیز معادل ۱۰ درصد تنش نهایی کابل در نظر گرفته می‌شود. تنش نهایی گسیخته شدن کابل نیز برابر ۱۸۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع فرض شده است.



شکل ۶ روند همگرایی الگوریتم‌ها (مثال ۲- حالت ۱)

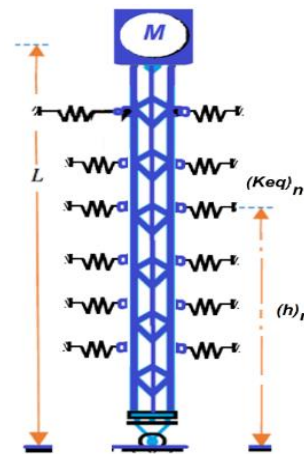
حالت ۲ (مهاری دکل در ۳ تراز). در این قسمت، دکل در سه تراز ارتفاعی با کابل‌های پیش‌تینده مهاری می‌شود. مطابق جدول (۱۱) تراز ارتفاعی بهینه کابل‌های دوم و سوم به ترتیب در ۸۰ و ۵۰ درصد از ارتفاع دکل قرار می‌گیرد و زاویه کابل‌ها ۷۵ درجه برای هر سه کابل به دست می‌آید.

جدول ۱۱ نتایج بهینه‌سازی برای مثال ۲- حالت ۲

متغیر	دکل مهاری شده در ۳ تراز ارتفاعی		
	PSO	GA	FA
β_1	75.03	75.03	75.03
β_2	75.03	75.03	75.03
β_3	75.03	75.03	75.03
h_1 (m)	18.25	18.2	18.25
h_2 (m)	30.41	30.4	30.4
h_3 (m)	36.5	36.5	36.5
ω_n (rad/s)	3.77	3.77	3.77
Best	3.77	3.77	3.77
Std	0.37	0.0	0.0

حالت ۳ (مهاری دکل در ۴ تراز). در این قسمت، روند بهینه‌سازی برای مهاری دکل در ۴ تراز ارتفاعی بررسی می‌شود. نتایج خروجی روند بهینه‌سازی حالت ۳ در جدول (۱۲) مشاهده می‌گردد. تراز ارتفاعی بهینه برای کابل‌های دوم و سوم و چهارم به ترتیب در حدود ۳۷، ۶۲ و ۸۷ درصد از ارتفاع کل دکل بوده و زاویه بهینه کابل‌ها یکسان می‌باشد. مطابق با نتایج جدول (۱۲) با افزایش تعداد کابل‌ها به ۲ برابر در مقایسه با حالت

از موقعیت اولیه خود به اندازه حدود بالای تعریف شده و حد پایین (۵۰ درصد ارتفاع طبقه تحتانی) قابلیت جابه‌جایی برای کشف موقعیت بهینه را خواهد داشت.

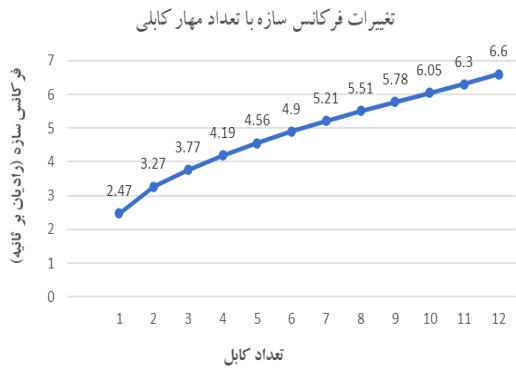


شکل ۵ مدل دکل مهاری با چندین فنر معادل

حالت ۱ (مهاری دکل در ۲ تراز). در این قسمت، بخش سازه خرپایی دکل در ۲ تراز ارتفاعی مهاری می‌شود. با توجه به جدول (۱۰)، تراز ارتفاعی بهینه اتصال کابل دوم حدود ۷۵ درصد از ارتفاع دکل و زاویه کابل‌ها با هر سه الگوریتم بهینه‌سازی، ۷۵ درجه به دست می‌آید. در شکل (۶) روند همگرایی هر سه الگوریتم نسبت به یکدیگر مقایسه و پایداری پاسخ الگوریتم کرم شبتاب نسبت به سایر الگوریتم‌ها مناسب‌تر تشخیص داده می‌شود.

جدول ۱۰ نتایج بهینه‌سازی برای مثال ۲- حالت ۱

متغیر	دکل مهاری شده در ۲ تراز ارتفاعی		
	PSO	GA	FA
β_1	75.03	75.03	75.03
β_2	75.03	75.03	75.03
h_1 (m)	27.37	27.30	27.37
h_2 (m)	36.5	36.5	36.5
ω_n (rad/s)	3.27	3.27	3.27
Best	3.27	3.27	3.27
Std	0.1	0.01	0.0

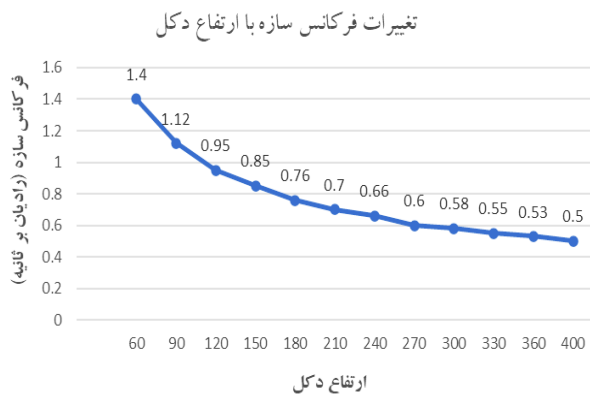


شکل ۸ نمودار تغییرات فرکانس سیستم با تغییرات تعداد کابل

مثال ۳

در این قسمت، تغییرات فرکانس سازه متناسب با تغییرات ارتفاع سازه دکل از ۶۰ متر تا ۴۰۰ متر با تعداد کابل‌های مهاری حاصل از تقسیم ارتفاع کل دکل به ۱۵ متر بررسی می‌گردد. میزان نیروی پیش‌تندگی کابل‌ها در حدود ۱۰ درصد تنش نهایی کابل و قطر کابل‌ها نیز ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. وزن آنتن در رأس سازه دکل ۱۰۰ کیلوگرم و وزن واحد طول دکل ۲۵ کیلوگرم بر متر طول می‌باشد.

فواصل اولیه کابل‌ها نسبت به یکدیگر جهت شروع بهینه‌سازی به صورت یکسان و برابر ۱۵ متر انتخاب می‌شود. به طور مثال برای دکل ۶۰ متری، ۴ عدد کابل پیش‌تند شده با ۸ متغیر بهینه‌سازی تعریف می‌شود. مطابق با شکل (۹) مشاهده می‌شود با ۴ برابر شدن ارتفاع دکل، فرکانس سازه ۵۰ درصد کاهش و به تناسب، زمان تناوب سازه دکل ۲ برابر افزایش می‌یابد. برای تمام ارتفاع دکل، زاویه بهینه نسبت به افق با هر تعداد کابل مهاری برابر ۷۵ درجه در شرایط بهینه می‌شود. زاویه فوق در شرایط عدم محدودیت زمین جهت نصب فونداسیون کابل‌ها می‌باشد.

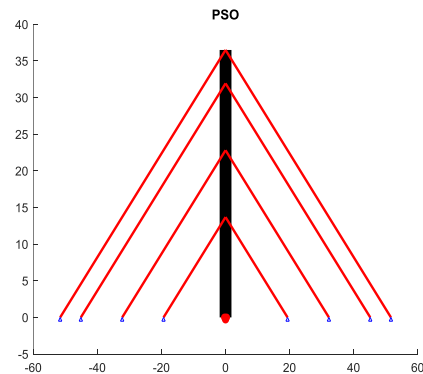


شکل ۹ نمودار تغییرات فرکانس سیستم با تغییرات ارتفاع دکل

مهاری در ۲ تراز میزان فرکانس سازه حدود ۲۸ درصد افزایش یافته است.

جدول ۱۲ نتایج بهینه‌سازی برای مثال ۲- حالت ۳

متغیر	دکل مهاری شده در ۴ تراز ارتفاعی		
	PSO	GA	FA
β_1	75.03	75.03	75.03
β_2	75.03	75.03	75.03
β_3	75.03	75.03	75.03
β_4	75.03	75.03	75.03
h_1 (m)	13.68	13.55	13.68
h_2 (m)	22.8	22.80	22.8
h_3 (m)	31.9	31.93	31.9
h_4 (m)	36.5	35.91	36.5
ω_n (rad/s)	4.19	4.19	4.19
Best	4.19	4.19	4.19
Std	0.2	0.011	0.0

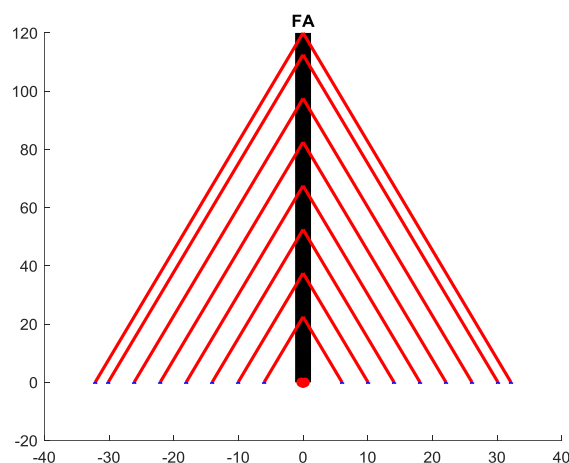


شکل ۷ شکل هندسی بهینه برای مثال ۲- حالت ۳

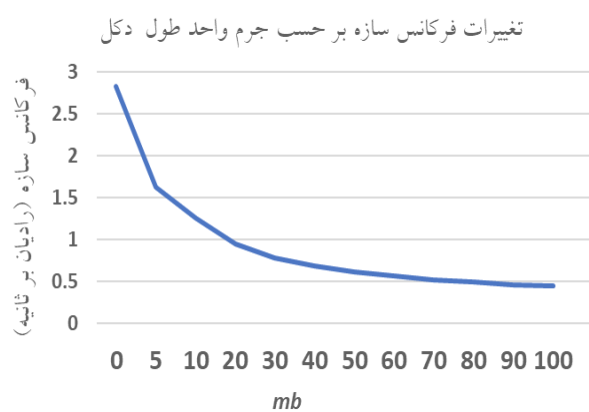
حالت ۴ (مهاری دکل تا ۱۲ تراز ارتفاعی). در این حالت، تغییرات فرکانس ارتعاشی سیستم در مقابل تغییرات افزایشی تعداد مهاری جانبی بررسی می‌شود. با توجه به شکل (۸) تغییرات فرکانس سازه دکل نسبت به افزایش تعداد کابل‌های مهاری نشان داده شده است. بیشترین درصد افزایشی فرکانس سازه زمانی ایجاد می‌شود که مهاری جانبی دکل از ۱ مهاری به ۲ مهاری در ارتفاع افزایش یابد. همچنین اگر طراح قصد افزایش فرکانس چنین سیستمی را به اندازه ۲ برابر فرکانس قبلی باشد می‌بایست تعداد مهاریها در حدود ۶ برابر تراز قبلی افزایش داده شوند.



شکل ۱۱ تغییرات فرکانس طبیعی با تغییرات جرم متمرکز آنتن



شکل ۱۰ هندسه بهینه شده (دکل ۱۲۰ متری)



شکل ۱۲ تغییرات فرکانس طبیعی سیستم بر حسب تغییرات جرم بر واحد طول سازه دکل

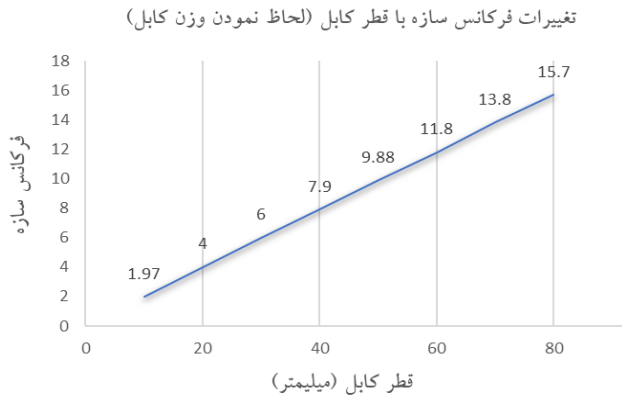
مثال ۴

جهت بررسی اثرات تغییرات جرم متمرکز آنتن و جرم بر واحد طول دکل، بر میزان تغییرات فرکانس ارتعاشی سیستم، دکل ۱۲۰ متری با ۸ عدد کابل در ارتفاع و در هر طرف با قطر ۳ سانتی‌متر بررسی می‌شود.

برای بررسی اثرات تغییر در جرم متمرکز بالای دکل مقادیر وزن واحد طول سازه دکل ۲۵ کیلوگرم بر متر طول فرض می‌گردد. همچنین جهت بررسی تغییرات فرکانس با تغییرات وزن واحد سازه دکل، جرم متمرکز آنتن نیز ۱۰۰ کیلوگرم در معادلات لحاظ می‌گردد. نتایج تحلیل تغییرات جرم متمرکز مطابق شکل (۱۱) و تغییرات جرم واحد سازه دکل مطابق شکل (۱۲) می‌باشد. مطابق با نمودارها مشخص می‌گردد با افزایش جرم متمرکز آنتن، فرکانس ارتعاشی سیستم کاهش ولی آثار کاهش فرکانس به تغییرات در جرم متمرکز آنتن محسوس نمی‌باشد. البته به دلیل اینکه در معادلات ارتعاش سیستم دکل عمودی با رفتار صلب فرض شده است، تغییرات فرکانس قابل توجه نمی‌باشد. با تغییرات در جرم واحد دکل و با ثابت بودن جرم متمرکز در رأس دکل، تغییرات فرکانس سازه به تغییرات جرم واحد طول سازه دکل قابل توجه می‌باشد. با افزایش جرم واحد طول دکل، میزان فرکانس سیستم به شدت کاهش می‌یابد. اگر طراح، بخش برج دکل را سبک‌تر طراحی نماید فرکانس سیستم افزایش قابل توجه خواهد داشت.

مثال ۵

در این قسمت، تغییرات فرکانس سازه مثال ۱ با تغییرات در مقادیر نیروی پیش‌تندگی کابل‌های مهاری، همچنین نسبت به تغییرات قطر کابل‌ها در دو حالت لحاظ نمودن وزن کابل و عدم لحاظ وزن کابل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. بازه بررسی مقادیر نیروی پیش‌تندگی از ۱ درصد تنش نهایی کابل تا ۹۵ درصد مطابق شکل (۱۳) می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش در مقادیر نیروی پیش‌تندگی و لحاظ نمودن وزن کابل‌ها، میزان فرکانس سازه روند افزایشی دارد. به منظور بررسی تغییرات فرکانس سازه با تغییرات در قطر کابل مطابق شکل (۱۴) و با فرض نیروی پیش‌تندگی معادل ۱۰ درصد تنش نهایی کابل مثال ۱ مورد بررسی قرار می‌گیرد. با افزایش قطر کابل‌های مهاری به تناسب وزن کابل نیز روند افزایشی داشته که در این بخش، وزن کابل در معادلات سختی کابل لحاظ نمی‌شود و فرکانس سازه در حالت عدم اعمال وزن



شکل ۱۵ تغییرات فرکانس طبیعی سیستم بر حسب تغییرات قطر کابل در شرایط اعمال وزن کابل

نتیجه گیری

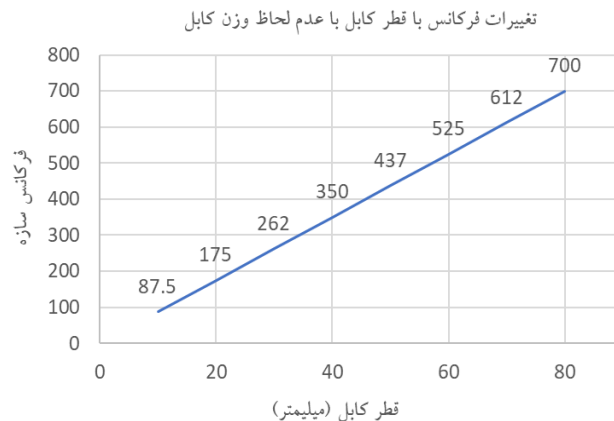
در این پژوهش، بهینه‌سازی زاویه کابل‌های دکل مهاري توسط الگوریتم‌های ژنتیک، کرم شبتاب و ازدحام ذرات در ۵ مثال با تابع هدف افزایش فرکانس سازه، مورد مطالعه قرار گرفت. در مثال اول، دکل مهاري در شرایط معادل‌سازی رفتار کابل با فنر ایدهال و در سه حالت شامل پیش‌تندگی کافی کابل‌ها و عدم حذف فنرهای معادل، حالت دوم نیز با حذف یکی از فنرهای معادل به دلیل نیروی فشاری داخل کابل، حالت سوم با استفاده از رابطه (۱۶) جهت اعمال اثرات پیش‌تندگی و وزن کابل در رفتار فنر معادل می‌باشد. در مثال دوم مشخصات سازه‌ای مطابق با مثال اول، با استفاده از رابطه (۱۶) و لحاظ نمودن سختی جانبی کابل‌ها، و افزایش در تعداد ترازهای مهار دکل مثال ۱ مقادیر تغییرات فرکانس سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مثال ۳ تغییرات فرکانس سازه دکل مهاري در ارتفاع مختلف دکل مورد مقایسه قرار می‌گیرد. جهت بررسی اثرات تغییرات جرم متمرکز آنتن و جرم بر واحد طول دکل، مثال ۴ برای دکل با ارتفاع ۱۲۰ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مثال ۵ نیز تغییرات فرکانس سازه برای مشخصات مثال ۱ با تغییرات در مقادیر نیروی پیش‌تندگی کابل‌های مهاري، همچنین تغییرات قطر کابل مهاري در حالت لحاظ نمودن وزن کابل‌ها و عدم لحاظ آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به صورت زیر خلاصه می‌شود.

۱) اگر هدف اصلی در طراحی چنین سازه‌ها تعیین زاویه بهینه کابل‌های پیش‌تندگی باشد برای تمام حالت‌های دکل مهاري، با فرض عدم محدودیت اجرایی، زاویه ۷۵ درجه پیشنهاد می‌شود.

کابل‌ها در شرایط بهینه به دست می‌آید. با عدم لحاظ وزن کابل‌ها، افزایش قابل توجه در مقادیر فرکانس سازه مشاهده می‌شود. از روی نمودار قابل مشاهده است که با ۲ برابر شدن قطر کابل‌ها فرکانس سازه نیز حدود ۲ برابر حالت قبلی افزایش یافته است.



شکل ۱۳ تغییرات فرکانس طبیعی سیستم بر حسب تغییرات مقادیر نیروی پیش‌تندگی کابل به صورت درصدی از تنش نهایی کابل



شکل ۱۴ تغییرات فرکانس طبیعی سیستم بر حسب تغییرات قطر کابل در شرایط عدم لحاظ نمودن وزن کابل

مطابق شکل (۱۵) با افزایش قطر کابل‌های مهاري به تناسب سختی جانبی سازه افزایش و با لحاظ نمودن وزن کابل و طول واقعی کابل در معادلات سختی جانبی، فرکانس سازه کاهش حدود ۴۳ برابری نسبت به حالت بدون لحاظ وزن واقعی کابل با طول کابل را خواهد داشت.

(۷) با افزایش ارتفاع دکل، مقادیر فرکانس ارتعاشی سیستم دکل مهاری روند کاهشی را نشان می‌دهد.

(۸) با افزایش تعداد متغیرهای بهینه‌سازی، کارایی الگوریتم ازدحام ذرات کمتر ولی الگوریتم کرم شب‌تاب در تعداد تکرار کمتری به پاسخ بهینه همگرا می‌شود.

(۹) با استفاده از رابطه شماره (۱۶) مقادیر سختی جانبی کابل نسبت به حالت فنر ایدئال کاهش قابل توجه داشته و مطابق نمودار شکل (۱۳) با افزایش در مقادیر نیروی پیش‌تندگی، روند افزایش فرکانس سازه قابل توجه بوده و با ۴ برابر شدن مقادیر نیروی پیش‌تندگی کابل، فرکانس سازه حدود ۲ برابر افزایش می‌یابد.

(۱۰) مقادیر فرکانس سازه دکل مهاری در شرایط عدم لحاظ وزن کابل، بیش از ۴۰ برابر حالت لحاظ نمودن وزن واقعی کابل در مقادیر پیش‌تندگی حدود ۱۰ درصد تنش نهایی کابل برای دکل با مشخصات مثال ۱ می‌باشد.

سیاسگزار

(۲) با افزایش تعداد مهارهای سازه دکل، مقادیر فرکانس ارتعاشی سیستم دکل افزایش می‌یابد. مطابق با نتایج، با افزایش ۶ برابری تعداد کابل‌های مهاری، میزان فرکانس ارتعاش سیستم دو برابر می‌شود.

(۳) برای دکل مهار شده با یک کابل، بیشترین فرکانس ارتعاشی سیستم در حالت بدون اثر پیش‌تندگی و لحاظ وزن کابل‌ها، ۳۵ درجه با افق و در شرایط اعمال نیروی پیش‌تندگی، مقادیر زاویه بهینه برابر ۷۵ درجه می‌شود.

(۴) با کاهش جرم متمرکز در رأس دکل، افزایش فرکانس طبیعی سیستم صورت می‌گیرد ولی مقادیر این افزایش قابل توجه نمی‌باشد.

(۵) اقتصادی‌ترین روش افزایش فرکانس طبیعی سیستم سازه دکل، سبک‌سازی و کاهش جرم واحد طول سازه خرپایی دکل می‌باشد.

(۶) با مقایسه الگوریتم‌ها مشاهده می‌شود که الگوریتم کرم شب‌تاب سرعت همگرایی بیشتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها داشته و با انحراف از معیار کمتر، نشان از پایداری پاسخ‌های قابل قبول الگوریتم می‌باشد.

مراجع

- [1] Bell, Lansford C., and Daniel M. Brown, "Guyed tower optimization", *Computers & Structures* 6, No. 6, (1976). [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(76\)90038-9](https://doi.org/10.1016/0045-7949(76)90038-9).
- [2] C. Gantes, R. Khoury, J.J. Connor, C. Pouangare, "Modeling, loading, and preliminary design considerations for tall guyed towers", *Computers & Structures*, pp. 797-805, (1993). [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(93\)90027-B](https://doi.org/10.1016/0045-7949(93)90027-B).
- [3] K.S. Madugula, *Dynamic Response of Lattice Towers and Guyed Masts*. ASCE Publications, (2001).
- [4] A. Rooshenas, M. Barghian, Seismic behavior of cable braces strengthened with a central steel plate. *Numerical Methods in Civil Engineering*, vol.6 no.4 Pp. 47-58, (2022). <https://doi.org/10.52547/nmce.6.4.47>
- [5] G. Saudi, "Structural assessment of a guyed mast through measurement of natural frequencies", *Engineering Structures*, vol.59, Pp. 104-112, (2014). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.09.049>
- [6] P. Harikrishna, A. Annadurai, S. Gomathinayagam, N. Lakshmanan,, "Full scale measurements of the structural response of a 50 m guyed mast under wind loading", *Engineering structures*, vol.25, no. 7, Pp. 859-867, (2003). [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00005-1).
- [7] J. Ballaben, M. Rosales, "Nonlinear dynamic analysis of a 3D guyed mast", *Nonlinear Dynamics*, vol.93, Pp. 1395-1405, (2018). <https://doi.org/10.1007/s11071-018-4267-1>.
- [8] A. Luzardo, P. Vivian, P. Rodríguez, "Guy tension influence on the structural behavior of a guyed mast", *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*. Vol.53, No. 2, Pp. 111-116, (2012).

- [9] B. Błachowski, "Model based predictive control of guyed mast vibration", *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol.45, No. 2, Pp. 405-423, (2007).
- [10] M. Mohammadnejad, H. Haji Kazemi, "Dynamic response analysis of tall buildings under axial force effects", *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol.31, No. 2, Pp. 41-56, (2018). <https://doi.org/10.22067/civil.v31i2.56550>
- [11] M. Pezo, V. Bakic, "Numerical determination of drag coefficient for guyed mast exposed to wind action", *Engineering Structures*, vol. 62–63, Pp. 98-104, (2014). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.025>
- [12] AL Materazzi, I Venanzi, "Optimal design of a cable-stayed mast exposed to turbulent wind", In Proceedings of the 9th International Conference on Structural Safety and Reliability, Rotterdam (2005).
- [13] J. Goldberg, T. Gaunt, "Stability of guyed towers", *Journal of the Structural Division*, vol.99, No. 4, Pp. 741-756, (1973). <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0003490>
- [14] R. Cucuzza, M. Rosso, A. Aloisio, J. Melchiorre, M. Giudice, G. Marano. "Size and Shape Optimization of a Guyed Mast Structure under Wind, Ice and Seismic Loading.", *Applied Sciences*, vol.12, no.10, Pp. 4875, (2022). <https://doi.org/10.3390/app12104875>
- [15] R. Belevičius, D. Jatulis, D. Rusakevičius, D. Mačiūnas, "Optimal schemes for tall guyed telecommunication masts", In *Proceedings of The Fifteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing. Civil-Comp Press*, Prague, Czech Republic, (2015). <https://doi.org/10.1155/2017/4561376>
- [16] S. Sivanandam, S. Deepa, Genetic algorithms. Springer Berlin Heidelberg, (2008). [E-book] Available: Safari e-book. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73190-0_2
- [17] A. Banaei, J. Alamatian, "Minimizing Multivariate Objective Function Using Improved Genetic Algorithms in Active Control of Oscillation of Structures", *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*. Vol.31, No. 4, Pp.21-40, (2019). <https://doi.org/10.22067/civil.v31i4.61547>
- [18] M. Mitchell, "An introduction to genetic algorithms", A Bradford Book The MIT Press. Cambridge, Massachusetts• London, England. Fifth printing. [GS SEARCH] (1999).
- [19] R. Perez, K. Behdian, "Particle swarm approach for structural design optimization", *Computers & Structures*, Vol.85, No. 19-20, Pp. 1579-1588, (2007). <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2006.10.013>
- [20] X. Yang, " Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation", *International journal of bio-inspired computation*, Vol.2, No. 2, Pp 78-84, (2010). <https://doi.org/10.1504/IJBIC.2010.032124>
- [21] CAC. Coello, "Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art", *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 191, No. 11-12, Pp. 1245-1287, (2002). [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(01\)00323-1](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(01)00323-1).
- [22] G. Margariti, C. Gantes, "Linear and nonlinear buckling response and imperfection sensitivity of cable-stayed masts and pylons. "Structural Engineering International, Vol.25, no.1, Pp.43-49, (2015). <https://doi.org/10.2749/101686614X14043795570255>