



# Optimization High-strength concrete mixing design using meta-heuristic genetic algorithm

Mohsen Masihi<sup>1</sup>, Seyed Fathollah Sajedi<sup>1\*</sup>, Ahmad Dalvand<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, Lorestan University, Khoramabad, Iran

**ABSTRACT:** In addition to the mechanical properties and durability of concrete, its production cost can also affect the choice of materials. On the other hand, changing the quantity of materials in the concrete mixing design affects the properties of concrete, including compressive strength and cost of materials, and these two factors are very important factors in deciding to use more or less materials in terms of purchase price for manufacturers in the concrete industry. High-strength concrete (HSC) is in the category of concretes that in addition to having high strength, has a low ratio of water to binder and a greater variety of materials, so in this type of concrete, choosing the exact amount of material to achieve a certain strength class, to have the lowest cost is difficult. In the present study, using a meta-heuristic genetic algorithm, the data of a reference study related to a class of HSC were optimized in terms of compressive strength and fabrication price in addition to achieving the highest possible strength at the lowest cost, the target strengths can also be minimized. The results showed that the meta-heuristic genetic algorithm acted intelligently to change the amount of materials in the mixing design and made the changes in such a way that in the process of obtaining the desired strengths, changes in the amount of materials used in the mixing design, with the least costs may be offered.

## Review History:

Received: Sep. 01, 2021

Revised: Jul. 02, 2023

Accepted: Jul. 27, 2023

Available Online: May, 03, 2024

## Keywords:

High Strength Concrete Mix Design

Meta-Heuristic Genetic Algorithm

Strength

Slump

Price

## 1- Introduction

It is very desirable to use high-strength concrete in the construction industry. In general, strong concrete can be defined in terms of its strength and durability. Generally, by increasing the strength of concrete, its other properties are also improved. In North American construction workshops, concrete with a compressive strength of more than 42 MPa at the age of 28 days is usually called high-strength concrete [1]. This is while concrete with a strength of more than 60 MPa is also called high-strength concrete [2]. According to Mendes and Yang's recommendation, special attention should be paid to all aspects related to the production of this type of concrete, including materials, mix design, transportation, and concreting [3].

Few researches have been done to optimize high-strength concrete mix design by algorithms, but all researchers have either used algorithms for part of the work, or they have only limited themselves to optimization by algorithms and finding a mix design. In this research, the experiments of Simon's report [4] were used as the basis of the work, and by using a meta-heuristic genetic algorithm, the mixture design function was first calculated, and then this function was calculated in terms of the price of materials and by applying restrictions such as the limit of the ratio of water to cement materials and the permissible range. Slump was again optimized by genetic

algorithm and the effect of changing the amount of each of the mixed design materials on the strength at the age of 28 days of concrete was investigated. The purpose of this research is to investigate the change in the amount of materials used for different strength categories at the age of 28 days, to minimize the finished price of concrete, and it answers the question of how to change the amount of materials in a way to While achieving the desired strength, taking into account the selection range for slump and the ratio of water to cement materials, the cost of materials used in concrete construction should be minimized.

## 2- Materials and methods

### 2- 1- Materials and materials used in research

In this research, type 2 Portland cement from the Karon Khuzestan factory and microsilica manufactured by the Azna factory in Aligoderz city in Iran, and polycarboxylate ether-based super lubricant and two types of broken aggregate produced in Khuzestan province were used.

### 2- 2- Determining the optimal mix design using the algorithm

In 1975, Holland presented an initial concept of a genetic algorithm. In this algorithm, after the formation of the initial population, operators such as procreation or genetic mutation are responsible for the cyclical improvement of the

\*Corresponding author's email: sajedi.ac@gmail.com



A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>14</sub>	C <sub>15</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>23</sub>	C <sub>24</sub>	C <sub>25</sub>	C <sub>26</sub>	C <sub>34</sub>	C <sub>35</sub>	C <sub>36</sub>	C <sub>45</sub>	C <sub>46</sub>	C <sub>56</sub>	K
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	---

**Fig. 1. Chromosome view of the problem in meta-heuristic genetic algorithm**

population, and finally, the population of the next cycle is selected by a targeted random selection. Multiple generations in the next cycles improve the population and lead the people of the society to continuous improvement [5]. Chopra et al. used an artificial network and genetic algorithm to predict strength development at 28, 56, and 91 days of age. In this research, 49 designs mixed with common materials and 27 designs with the addition of fly ash were examined in laboratory conditions. Investigations indicated the better performance of the neural network in predicting the growth of strength over time [6].

#### A: Introduction of meta-heuristic genetic algorithm

In the algorithm used, first, the initial population was formed, then, in addition to the general operators of the genetic algorithm, some innovative methods were also used so that the search in the answer space would be more diverse and optimal for the algorithm. Then the process continues by selecting a new population based on random selection with the probability of selecting a better individual. For a better understanding of the topic, the operators were described in 8 steps in the text of the main article. For all the mentioned steps, it is programmed in MATLAB software and the answers are extracted from this process.

#### B: Solving the problem of functions using the algorithm

To solve the problem, according to the number of concrete components with high strength and the intended function, there are 28 unknowns, which are arranged in a string as shown in Figure 1. The algorithm is executed once for the unknowns of calculating the compressive strength function at the age of 28 days and again for the calculation of the unknowns of the slump function.

#### C: Optimizing the mixed-design function

The purpose of this research, in addition to finding a mixture design that is a balance between the strength and the price of its construction, is to provide specific target strength at the lowest possible price. To achieve this goal, the basis of the work will be the function of strength, and by applying the price of the materials, the necessary balance will be made. For this purpose, the strength function needs to be checked again, with the difference that this time the coefficients and powers (K, C<sub>nm</sub>, B<sub>n</sub>, and A<sub>n</sub>) are known and it is necessary that the volume ratios of the materials are such that the output strength of the function and the price of the materials ratios are economic. Considering having the strength function in hand, it is enough to enter the price of each design in its fitting function (the amount of input in the roulette cycle) and then

select the next generation using the roulette cycle. Therefore, the random proportions of the materials are considered for the unknown variables of the function; these ratios must be within the accepted range for high-strength concrete and it is better that they are very close to the selected range of laboratory designs. The use of the slump function is also for the reason that samples with slumps out of range are changed and re-referred to the algorithm cycle. Having the chromosome and the initial population, the algorithm process and operators are implemented. The process continues until no better answer is found or the changes are very minor.

#### D: Validation of meta-heuristic genetic algorithm

In order to find the amount of error of the function provided by the algorithm, first, several different mixed designs, whose details were previously taken from the algorithm in different strength categories, were made in the laboratory. After measuring the slump of fresh concrete according to ASTM C143 and determining the compressive strength at the age of 28 days according to ASTM C39, the results are compared with the output of the algorithm.

### 3- Results and discussion

In Simon's report as reference research, the first 36 mixed designs were tested with a specific scope for materials. He optimized the design of the mixture resulting from the experiments and determined the strength of 54.7 MPa as the optimal point of strength at the age of 28 days. To solve the problem, the data was the same as the data of the reference report. Based on the algorithm process, the output of coefficients and powers were obtained for strength at the age of 28 days and slump, and the least sum of squares was 280 and 7788, respectively.

The best answer in terms of the balance, between strength, price, and the most economical mixture design for different characteristic strengths was calculated according to the price of local materials, and the corresponding answers are presented in the form of volume and weight in Tables 1 and 2. Mix design number 14 is the best answer for the algorithm based on the tested materials.

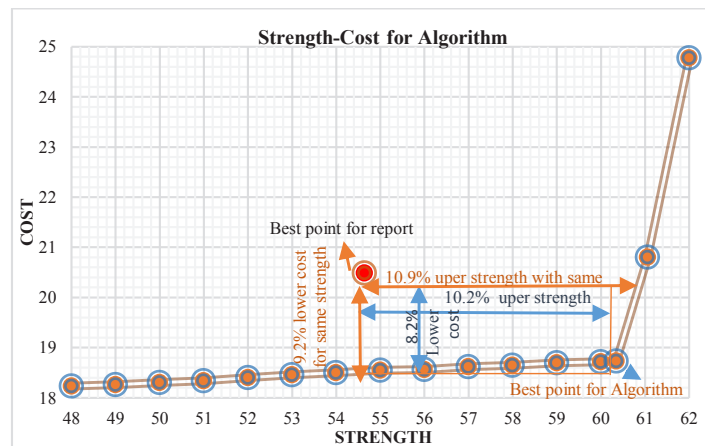
The optimal response found by the meta-heuristic genetic algorithm has 10.2% higher strength and 2.8% less cost compared to the response of the reference report. The comparison of the capability of the algorithm compared to the reference report shows that for the construction of concrete with the same strength as the response of the reference report, the meta-heuristic genetic algorithm proposed a mixture plan with 9.2% less cost, and for concrete construction with the cost of the reference report plan, in the mixture plan algorithm

**Table 1. Volume ratios of the design of optimal mixtures of meta-heuristic genetic algorithm (kg/m<sup>3</sup>)**

Mix code	comp str (MPa)	Water	Cement	Silica fume	SP	Coarse agg	Fine agg	slump (mm)	w/c	price (USD)
1	48	0.1579	0.12	0.012	0.00461	0.4364	0.2191	115	0.470	18.23
2	49	0.189	0.12	0.012	0.00461	0.411	0.2382	127	0.473	18.26
3	50	0.1892	0.12	0.012	0.00461	0.3984	0.2558	140	0.473	18.30
4	51	0.188	0.12	0.012	0.00461	0.3829	0.2729	145	0.470	18.34
5	52	0.181	0.12	0.012	0.00463	0.3813	0.2819	131	0.453	18.40
6	53	0.1725	0.12	0.012	0.00464	0.3823	0.2894	113	0.430	18.46
7	54	0.1639	0.12	0.012	0.00471	0.3875	0.2926	100	0.410	18.50
8	55	0.1612	0.12	0.012	0.0052	0.3898	0.2924	100	0.403	18.55
9	56	0.156	0.12	0.012	0.00552	0.3972	0.2901	100	0.390	18.56
10	57	0.1534	0.12	0.012	0.006	0.3993	0.2899	100	0.384	18.62
11	58	0.1507	0.12	0.012	0.00646	0.4017	0.2896	103	0.377	18.65
12	59	0.1504	0.12	0.012	0.00688	0.4015	0.2918	113	0.376	18.70
13	60	0.15	0.12	0.012	0.00735	0.4008	0.2927	123	0.375	18.72
14	60.35	0.15	0.12	0.012	0.0074	0.4008	0.293	134	0.375	18.73
15	61	0.15	0.143	0.0127	0.0074	0.3939	0.2929	86	0.317	20.80
16	62	0.15	0.15	0.0219	0.00739	0.3779	0.2928	80.5	0.291	24.78

**Table 2. Weight ratios of optimal mixtures design of research genetic algorithm (kg/m<sup>3</sup>)**

Mix code	comp strength (MPa)	Water	Cement	Silica fume	SP	Coarse aggregates	Fine aggregates
1	48	187.9	374.4	25.56	4.84	1134.64	547.75
2	49	189	374.4	25.56	4.84	1082.12	595.5
3	50	189.2	374.4	25.56	4.84	1035.84	639.5
4	51	188	374.4	25.56	4.84	995.54	682.25
5	52	181	374.4	25.56	4.84	991.38	704.75
6	53	172	374.4	25.56	4.84	993.98	723.5
7	54	163.9	374.4	25.56	4.945	1007.5	731.5
8	55	161.2	374.4	25.56	5.46	1013.48	731
9	56	156	374.4	25.56	5.796	1032.7	725.25
10	57	153.4	374.4	25.56	6.3	1038.18	724.25
11	58	150.7	374.4	25.56	6.78	1043.62	725
12	59	150.4	374.4	25.56	7.224	1043.9	729.5
13	60	150	374.4	25.56	7.717	1042.08	731.75
14	60.35	150	374.4	25.56	7.77	1042.08	732.5
15	61	150	446.16	27.05	7.77	1042.14	732.25
16	62	150	468	46.647	7.759	982.54	732



**Fig. 2. Variations in the cost-strength of the optimal responses of meta-heuristic genetic algorithm**

with 10.9% more strength can be achieved.

In order to validate, 4 mixed designs were made to compare the laboratory strength of the samples at the age of 28 days with the strength obtained from the output of the algorithm. The results of the work indicated the existence of 97% accuracy compared to the answers of the algorithm.

In Figure 2, which is taken from the information in Table 1, the outputs of the algorithm are drawn in the strength-price optimization chart. Based on this figure, according to the applied price of materials, three different slopes were obtained in the graph, the first slope is up to 54 MPa, the second slope is up to the optimal point of the graph, i.e. 60.3 MPa, and the third slope is up to the last possible output by applying the initial limit in view taken for materials means 62 MPa. From 54 to 60.3 MPa, the slope of the graph is very gentle and price changes are small compared to strength.

### 3- 1- Analyzing the selection of proportions in the design of the HSC mix

Changing the ratio of materials in the mix plan affects the mechanical properties of concrete. Considering that in this research, the optimization between strength and price has been done, therefore, it is expected that the algorithm, taking into account the function of the mixture design and the price of materials, will be more cost-effective than the economic selection of materials to achieve the target strength, given in this section, while presenting the effect of changing the ratio of materials on the 28-day age strength of this type of concrete for laboratory data in which the selection of the amount of materials was experimental and discrete in terms of order, according to the answers listed in Table 2, the efficiency of the meta-heuristic genetic algorithm is also specified for the selection of materials according to Figure 3. Considering that

the algorithm process is based on random selection and the algorithm suggests one of the optimal solutions, therefore, small changes in the upward or downward trend of the material selection chart can be expected.

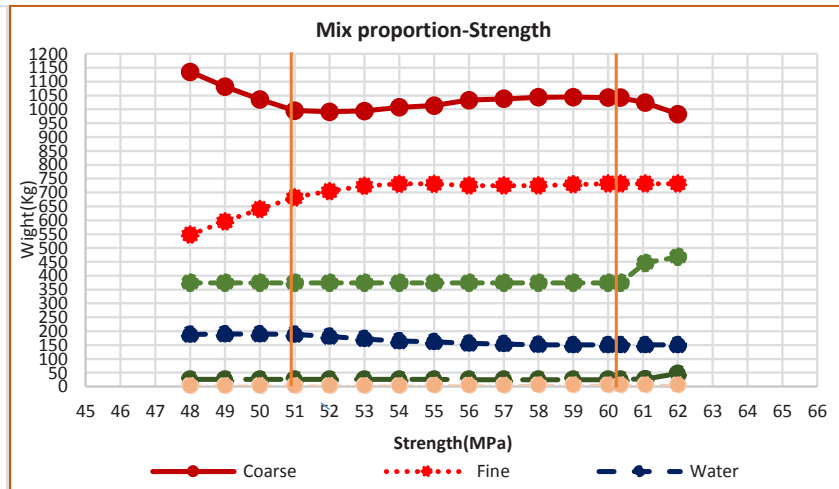
## 4- Conclusions

1- The genetic algorithm of meta-engineering has a high capability in optimizing the design of concrete mix with high strength in terms of the price of materials. For this purpose, the algorithm first tried to meet the goal by changing the amount of cheaper materials, and in the next steps, increased the amount of more expensive materials. The best point with maximum strength and minimum cost was obtained for laboratory data of 60.3 MPa strength at a cost of 18.73 dollars and with a slump of 134 mm. Compared to the optimal design introduced in the reference report with a strength of 54.7 MPa at the age of 28 days, this design has 10.2% more strength and 2.8% less cost.

2- Since the construction of several mixed designs proposed by the algorithm was achieved with a high approximation of 97%, then the designs of the algorithm can be considered effective and to increase the strength of concrete by using a certain type of material, instead of trial-and-error method, The proposed process of this article was carried out to achieve the goal with the lowest cost.

3- In order to increase the strength in the lower grades, the algorithm has replaced coarse aggregates with fine aggregates, so up to the strength grade of 51 MPa, it has only suggested changing the size of aggregates from coarse to fine aggregates, which means that at a low cost, the strength can be increased.

4- To obtain more strength, the genetic algorithm considers reducing the amount of water as the best method,



**Fig. 3. Weight-strength variations of concrete ingredients at the age of 28 days for the mixed design of the optimal responses of the meta-heuristic genetic algorithm**

so to increase the strength at the age of 28 days from 51 to 60.3 MPa, which is the optimal point of strength-cost for this type of material, the amount of water in the mixture design has reduced it to increase the strength by reducing the ratio of water to cement materials and instead used coarse aggregates (the cheapest material after water); aggregate resistance also helps the design.

5- To achieve a strength greater than 60.3 MPa, it is necessary to increase cement and microsilica, and the algorithm has taken action by changing them and giving priority to increasing cement because it is cheaper than microsilica; In order to comply with the quorum of the mix design, the amount of coarse aggregates that played the role of volume filler in the previous stage has been reduced.

6- In the designs in which the water was reduced, superplasticizer was added as an additive to maintain the fluidity of the concrete; in the plans where the amount of cement and microsilica were added, the algorithm also added the amount of superplasticizer.

### References

- [1] S.H. Ahmad, S.P. Shah, High Performance Concrete and Application, McGraw-Hill (TX), (1994).
- [2] FIP/CEB, High strength concrete, State of the art report, Bulletin d'information, 197 (1990).
- [3] S. Mindes, J. F. Young, Concrete Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 530 (1981).
- [4] P. Kondapally, A. Chepuri, V.P. Elluri, B. S. K. Reddy, Optimization of concrete mix design using genetic algorithms, Earth and Environmental Science, (2022) Doi:10.1088/1755-1315/1086/1/012061
- [5] J.H. Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems (1975).
- [6] P. Chopra, R. Kumar Sharma, M. Kumar, Prediction of Compressive Strength of Concrete Using Artificial Neural Network and Genetic Programming. Hindawi Publishing Corporation, (2016), Article ID 7648467, 10 pages.



## بهینه‌سازی طرح مخلوط بتن با مقاومت بالا با استفاده از الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

محسن مسیحی<sup>۱</sup>، سیدفتح اله ساجدی<sup>۱\*</sup>، احمد دالوند<sup>۲</sup>

۱- گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲- گروه عمران، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۲/۱۴

### کلمات کلیدی:

طرح مخلوط بتن با مقاومت بالا

الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

مقاومت

اسلامپ

قیمت

**خلاصه:** علاوه بر خواص مکانیکی و دوام بتن، هزینه تولید آن نیز می‌تواند بر انتخاب میزان مصالح تاثیرگذار باشد. از طرف دیگر تغییر کمیت مصالح در طرح مخلوط بتن، بر خواص بتن از جمله مقاومت فشاری، هم‌چنین قیمت تمام شده مصالح آن موثر است و این دو عامل از عوامل بسیار مهم برای تصمیم‌گیری در مصرف میزان مصالح بر اساس قیمت خرید برای تولیدکنندگان در صنعت بتن می‌باشند. بتن با مقاومت بالا در رده بتن‌هایی است که علاوه بر داشتن مقاومت بالا، دارای نسبت آب به مواد سیمانی پایین و تنوع مصالح بیشتری است، لذا انتخاب مقدار دقیق مصالح برای رسیدن به یک رده مقاومتی خاص در این نوع بتن، به نحوی که کمترین قیمت تمام شده را در بر داشته باشد، مشکل است. در تحقیق حاضر با استفاده از الگوریتم ژنتیک فراابتکاری داده‌های یک تحقیق مرجع، از نظر مقاومت فشاری و قیمت مصالح ساخت بهینه‌سازی شدند تا علاوه بر دستیابی به بالاترین مقاومت ممکن با کمترین هزینه، برای رسیدن به مقاومت‌های هدف نیز بتوان هزینه کمینه را به دست آورد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که پاسخ بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری، در مقایسه با نقطه بهینه تحقیق مرجع دارای مقاومتی به میزان ۱۰/۲٪ بالاتر و با هزینه ۸/۲٪ پایین‌تر بود. هم‌چنین با توجه به اینکه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری توانایی انتخاب طرح مخلوط برای رده‌های مقاومتی مختلف را دارد، بررسی طرح مخلوط های مختلف نشان داد که، الگوریتم نسبت به تغییر مقدار مصالح طرح مخلوط با هوشمندی عمل نموده و تغییرات را به نحوی اعمال نموده است که در فرآیند کسب مقاومت‌های مورد نظر، تغییرات میزان مصالح مصرفی در طرح مخلوط، با اعمال کمترین هزینه ممکن، پیشنهاد شوند.

### ۱- مقدمه

است و به هماهنگی کامل بین منابع و کیفیت مصالح و تولیدکننده نیاز دارد. اصولاً طرح مخلوط بتن‌های با مقاومت بالا شامل گام‌های انتخاب مصالح، تعیین مقادیر نسبی و کنترل کیفیت می‌باشد. در بتن‌های با مقاومت بالا، تمام اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط به حد بحرانی خود می‌رسند. بتن‌های با مقاومت بالا را می‌توان به صورت ماده‌ای مرکب از سه بخش خمیر سیمان سخت شده، سنگدانه‌ها و ناحیه انتقال<sup>۲</sup> بین سنگدانه‌ها و خمیر در نظر گرفت. تمام این بخش‌ها باید از نظر کمی و کیفی بهینه باشند و در طرح مخلوط به طور دقیق بررسی شوند. بتن‌های با مقاومت بالا عموماً علاوه بر سیمان پرتلند و آب، شامل مصالح دیگری از قبیل فوق روان‌کننده و مواد سیمانی مکمل نیز هستند. با استفاده از موادی نظیر خاکستر بادی و پودر سرباره به عنوان مواد سیمانی مکمل، می‌توان به مقاومت فشاری تا ۱۰۰ مگاپاسکال دست یافت، اما برای کسب مقاومت‌های بالاتر از ۱۰۰ مگاپاسکال استفاده از

استفاده از بتن‌های دارای مقاومت بالاتر از بتن‌های معمولی، در صنعت ساخت و ساز بسیار مطلوب می‌باشد. به‌طور کلی بتن توانمند را می‌توان بر حسب مقاومت و دوام آن تعریف نمود. عموماً با افزایش مقاومت بتن، سایر خواص آن نیز بهبود می‌یابند. در کارگاه‌های ساختمانی آمریکای شمالی معمولاً به بتن‌های دارای مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بیش از ۴۲ مگاپاسکال بتن با مقاومت بالا گفته می‌شود [۱]. این درحالی است که به بتن با مقاومت بیش از ۶۰ مگاپاسکال نیز بتن با مقاومت بالا گفته می‌شود [۲]. به توصیه میندس و یانگ<sup>۱</sup> باید به تمام جوانب مربوط به تولید این نوع بتن شامل مصالح، طرح مخلوط، حمل و بتن‌ریزی توجه خاص نمود [۳]. کنترل کیفیت یکی از موارد ضروری در تولید بتن‌های با مقاومت بالا

1 Minds & Yong

2 Interfacial Transition Zone (ITZ)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sajedi.ac@gmail.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



نشان می‌دهد که عملکرد روش ترکیبی معرفی شده، به طور قابل توجهی بهتر از الگوریتم‌های فراابتکاری به تنهایی است. علاوه بر این، عملکرد مخلوط‌های طراحی شده توسط همه الگوریتم‌ها بسیار بهتر از عملکرد نمونه های اولیه طراحی شده توسط آزمایش های تجربی است.

کنداپلی<sup>۶</sup> [۷] طراحی مخلوط بتن با استفاده از الگوریتم ژنتیک و برنامه توسعه یافته متلب ارائه داد. طرح مخلوط برای رده‌های مختلف بتن با نسبت آب سیمان متفاوت انجام شد. نتایج مطالعه نشان داد که با استفاده تکنیک الگوریتم ژنتیک مقادیر سیمان در حدود ۲۵ الی ۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب، حدود ۶ الی ۱۰ درصد کاهش یافته است. پژوهش تیپو و همکاران<sup>۷</sup> [۸] با هدف غلبه بر محدودیت در انتخاب مصالح نسبت به قیمت تمام شده بود. آن‌ها با بکارگیری مدل یادگیری ماشین پیش‌بینی کننده و بهینه سازی چند هدفه با استفاده از الگوریتم، برای به حداکثر رساندن مقاومت فشاری، به حداقل رساندن هزینه و کاهش انتشار گاز دی اکسیدکربن، این روش بهینه سازی را پیشنهاد دادند. نتایج بهینه‌سازی سه هدفه این گروه نشان می‌دهد که مقاومت بالا بتن در محدوده ۷۰ تا ۱۱۰ مگاپاسکال را می‌توان با حداقل هزینه و با کمترین میزان سیمان ممکن با استفاده از جایگزینی خاکستر بادی و سرباره تولید کرد.

تحقیقات اندکی برای بهینه سازی طرح مخلوط بتن با مقاومت بالا توسط الگوریتم‌ها انجام شده است، لیکن همه محققین، یا بخشی از کار را از الگوریتم استفاده کرده‌اند یا اینکه صرفاً به بهینه‌سازی توسط الگوریتم و یافتن یک طرح مخلوط بسنده نموده‌اند. در این تحقیق آزمایش‌های یک گزارش مبنای کار قرار گرفت و با استفاده از الگوریتم ژنتیک فراابتکاری ابتدا تابع طرح مخلوط محاسبه شد و سپس این تابع با لحاظ قیمت مصالح و با اعمال قیودی مثل محدودیت نسبت آب به مواد سیمانی و محدوده مجاز اسلامپ، مجدداً توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شد و تاثیر تغییر میزان هریک از مصالح طرح مخلوط بر مقاومت در سن ۲۸ روزه بتن بررسی گردید. هدف از انجام این تحقیق، بررسی وضعیت تغییر میزان مصالح مصرفی به ازاء رده‌های مختلف مقاومتی در سن ۲۸ روزه، به منظور کمینه نمودن قیمت تمام شده بتن است و به این سوال پاسخ می‌دهد که چگونه می‌توان، میزان مصالح را به نحوی تغییر داد که ضمن دستیابی به مقاومت مورد نظر، با در نظر گرفتن محدوده انتخابی برای اسلامپ و نسبت آب به مواد سیمانی، هزینه مصالح مصرفی در ساخت بتن کمینه شود.

میکروسیلیس ضروری است [۱]. سوال اصلی در تولید انواع بتن این است که، با چه میزان از مصالح می‌توان به بتنی دست یافت که علاوه بر پاسخ‌گویی به خواص و دوام مورد انتظار طرح، دارای کمترین هزینه نیز باشد. گروهی از محققان استفاده از روش‌های آماری را پیشنهاد داده‌اند، اما روش دیگری که امروزه برای حل مسئله توابع مبسوط<sup>۱</sup> استفاده می‌شود، روش الگوریتم‌های تکاملی<sup>۲</sup> است. الگوریتم ژنتیک<sup>۳</sup> یکی از روش‌های جستجوگر، برای یافتن پاسخ مطلوب در بین تعداد پاسخ‌های زیاد و ممکن است.

محققین مختلفی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی نسبت به حل مسائل طراحی یا اختلاط در بتن اقدام نمودند. نارکز<sup>۴</sup> [۴] یک الگوریتم ژنتیک در کدگذاری واقعی ایجاد کرد تا به عنوان ابزار کمکی برای طراحی تیرهای بتنی پیش تنیده عمل کند. راه حل یافت شده توسط الگوریتم با راه حل واقعی پروژه‌ای که قبلاً یک فرآیند بهینه سازی سنتی را گذرانده بود مقایسه شد. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی توانست در ۲۱۰ ثانیه راه حل اقتصادی تری پیدا کند. هان و همکاران<sup>۵</sup> [۵] از ترکیب شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی نسبت مخلوط شاتکریت مرطوب استفاده کرد. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی میانگین خطای نسبی برابر  $2/755\%$  را به همراه داشت که نشان‌دهنده یک پیش‌بینی عالی برای ایجاد تابع هدف معقول است. علاوه بر این، الگوریتم ازدحام ذرات، در کمتر از ۶۰ ثانیه نسبت مخلوط بهینه شاتکریت مورد نیاز معدن را محاسبه کرد. به این ترتیب می‌توان گفت که ترکیب دو الگوریتم می‌تواند به عنوان یک راهنمای طراحی کارآمد برای تسهیل تصمیم‌گیری، قبل از مرحله ساخت و ساز استفاده شود.

طبق بررسی‌های انجام شده توسط نویسندگان این مقاله در سوابق مرتبط با تحقیق، تاکنون محققین زیادی برای یافتن طرح مخلوط بهینه تلاش نموده‌اند و عده‌ای دیگر نیز تاثیر تغییرات میزان مصالح طرح مخلوط را بر تغییر مقاومت بررسی کرده‌اند. استفاده از روش عددی و الگوریتم‌های فراابتکاری برای تخمین طرح اختلاط بهینه روسازی های بتنی توسط شیرزادی جاوید و همکاران<sup>۶</sup> [۶] پیشنهاد شد. این روش یک روش جدید برای پیش‌بینی نسبت مخلوط بهینه است که ویژگی‌های اساسی بتن، از جمله مقاومت خمشی، مقاومت سایشی، اسلامپ، جمع شدگی ناشی از خشک شدن، و مقاومت انجماد-ذوب و هزینه واحد آن را بهبود داد. نتایج این مدل

- 1 Non\_polynomial Hard (NP\_Hard)
- 2 Evolutionary Computation
- 3 Genetic Algorithm (GA)
- 4 Narques et al.
- 5 Han et al.

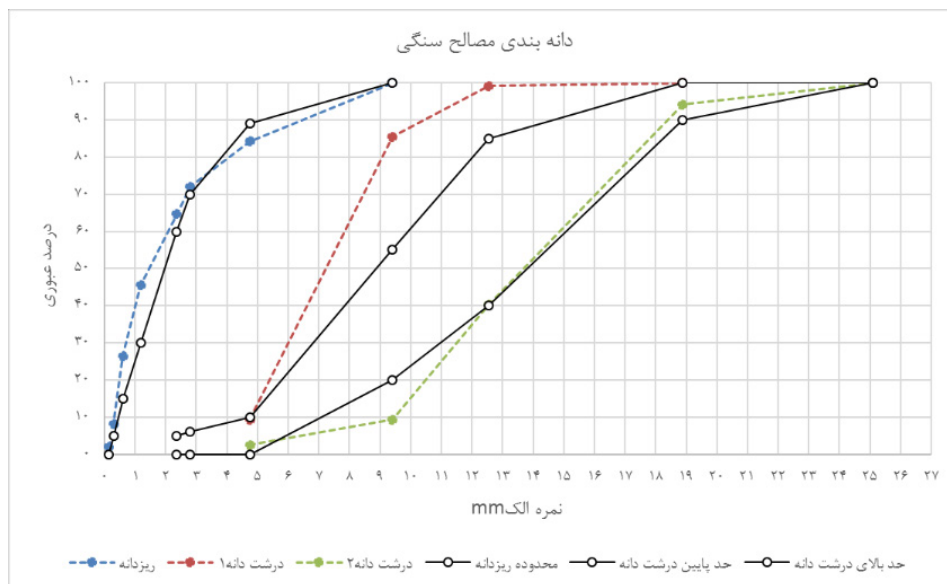
6 Kondapally

7 Tipu

جدول ۱. وزن مخصوص و ترکیبات شیمیایی سیمان و میکروسیلیس

Table 1. Specific weight and chemical composition of cement and microsilica

ترکیبات شیمیایی (درصد)	سیمان	میکروسیلیس
SiO <sub>2</sub>	۲۱/۶۸	۹۶/۴
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۸۲	۱/۱۳۲
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۸۸	۰/۸۷
CaO	۶۵/۴	۰/۴۹
MgO	۲/۰۸	۰/۹۷
SO <sub>2</sub>	۰/۶۸	۰/۱
K <sub>2</sub> O	۰/۸۸	۱/۰۱
Na <sub>2</sub> O	۰/۲۵	۰/۳۱
Specific gravity	۳۱۲۰	۲۱۳۰
Fineness (m <sup>2</sup> /kg)	۳۳۵	۲۰۰۰۰



شکل ۱. دانه بندی مصالح سنگی ریز و درشت استفاده شده در تحقیق بر اساس ASTM C33

Fig. 1. Grain size distribution curve of fine and coarse aggregates used in research based on ASTM C33

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی در تحقیق

در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع ۲ و میکروسیلیس تولیدی در ایران که مشخصات ارائه توسط کارخانه تولید کننده آنها در جدول (۱) نشان داده شده، و فوق روان کننده بر پایه پلی کربکسیلاتی اتر و دو نوع سنگدانه از معادن منطقه خوزستان با دانه بندی داده شده در شکل (۱) استفاده شده است.

۲-۲- مصالح بتن با مقاومت بالا

۲-۲-۱- آب و نسبت آب به مواد سیمانی

بر اساس مطالعات وو و همکاران<sup>۱</sup> نسبت آب به سیمان بتن با مقاومت بالا کمتر از ۰/۴ است و مقاومت ملات تقریباً با سنگدانه‌ها برابر است و به همین دلیل در بعضی موارد ممکن است که توانایی سنگدانه‌ها به تنهایی در



## ۲-۲- سیمان و مواد جایگزین آن

مظلوم و همکاران گزارش کردند که در بتن‌های با مقاومت بالا، افزایش میزان میکروسیلیس، کارایی بتن را کاهش داده ولی خواص مکانیکی ابتدایی مثل مقاومت در سن ۲۸ روزه و مدول سکانت را بهبود داده است. همچنین اعلام کردند درصد میکروسیلیس جایگزین، تاثیر مشخصی بر جمع‌شدگی کلی بتن ندارد [۱۳]. بالاگورو<sup>۲</sup> تحقیقاتی در خصوص ذرات نانو و میکرو سیمانی انجام داد و بیان کرد که خواص بتن بهتر شده و شناخت بهتر سازه و رفتارش در مقیاس‌های کوچک نانو یا میکرو، به بهبود خواص بتن کمک می‌کند [۱۴]. سافن<sup>۳</sup> مطالعاتی بر مقاومت فشاری خمیر سیمان پرتلند و ملات حاوی نانوفریت داشت و بیان نمود که با میزان مناسب دوغاب‌های حاوی نانوفریت به میزان ۱٪ وزنی سیمان، افزایش مقاومت فشاری خمیر سیمان و دوغاب به‌طور متوسط ۴۵٪ خواهد بود [۱۵]. نتایج آزمایش‌های شانانگ<sup>۴</sup> نشان داد که میزان مشخصی از کاربرد توام پوزولان‌های طبیعی و میکروسیلیس می‌تواند مقاومت‌های فشاری و کششی، کارایی و ضریب ارتجاعی را بهبود بخشد، نسبت به زمانی که به‌صورت مجزا در بتن استفاده شوند [۱۶]. امین و ابو الحسن<sup>۵</sup> ۳۴ نمونه با درصد‌های مختلف سیمان ریزدانه، درشت‌دانه متفاوت، میکروسیلیس، آب و دو نوع مصالح نانو ساخته و بر اساس نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری در سنین ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مقاومت‌های کششی و خمشی و ضریب ارتجاعی، بیان کردند که میزان مناسب استفاده از نانوسیلیس ۳٪ و نانوفریت ۲٪ در بتن با مقاومت بالا است. درصد بهبود مقاومت فشاری در استفاده از این مقدار نانوسیلیس و نانوفریت به ترتیب ۱۷٪ و ۲۱٪، بهبود مقاومت کششی برای نانو سیلیس و نانو فریت به ترتیب ۴۴٪ و ۶۶٪ و برای مقاومت خمشی و ضریب ارتجاعی تقریباً با نانوسیلیس ۲۳٪ و با نانوفریت ۲۵٪ بیان شد. افزایش مقدار نانوسیلیس و نانوفریت بیش‌تر از ۲٪ الی ۳٪ وزنی شاخصه‌های فوق را کاهش می‌دهد. همچنین بیان کردند که در مقایسه، نمونه‌های حاوی نانوسیلیس جایگزین با نرخ تقریبی ۱۰٪ بهتر از نانوفریت با همین درصد جایگزینی پاسخ دادند و سنگدانه‌های گرانیتی با نرخ ۱۰٪ بهتر از دلمیتی با همین نرخ جایگزینی پاسخ دادند [۱۷]. کیشور و همکاران<sup>۶</sup>، تاثیر پودر سبوس برنج بر خصوصیات مکانیکی بتن با مقاومت بالا را بررسی کردند. در طرح مخلوط‌ها پودر سبوس با نسبت‌های مختلف ۰، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ بعنوان جایگزین سیمان، در

نظر گرفته شود [۹]. تاثیر جایگزینی فاضلاب به جای آب بر خصوصیات بتن با مقاومت بالا را الجابری و همکاران<sup>۱</sup> با استفاده از خروجی آب سه کارواش در نقاط مختلف مسقط (پایتخت کشور عمان) بررسی کردند. در این تحقیق هر سه نوع آب با هم مخلوط شده و جزئیات شیمیایی آن از نظر pH، ذرات نامحلول، میزان کلر، سختی، مواد قلیایی و سولفاتی اندازه‌گیری شده بود. این آزمایش‌ها نشان داد هرچند که مواد شیمیایی در مخلوط فاضلاب جمع‌آوری شده خیلی بیشتر از آب معمولی بود ولی این آب در حد استاندارد ASTM بوده و امکان استفاده از آن در بتن وجود داشته است. طرح مخلوط‌ها را با میزان مختلف آب و فاضلاب به سیمان به نسبت ۰/۳۵ ساخته و میزان جایگزینی فاضلاب به آب از ۲۵٪ تا ۱۰۰٪ بود. نرخ افزایش مقاومت از سن ۷ به ۲۸ روزه مشابه بتن معمولی عنوان شد اما، پس از ۲۸ روز عمل‌آوری نمونه‌ها، نتایج نشان داد که مقاومت در سن ۲۸ روزه تغییر قابل‌قبولی داشته و میزان جذب آب دارای تغییر نامحسوسی بوده است [۱۰]. شماسی و همکاران نمونه‌های خود را با جایگزینی ۳٪ نانوسیلیس با سیمان در نسبت‌های متفاوت آب به مواد سیمانی ۰/۳۳، ۰/۳۶، ۰/۴، ۰/۴۴ و ۰/۵ و با لحاظ میزان ثابت دیگر مصالح در طرح‌ها ساختند. مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه و مقاومت سایشی در سن ۲۸ روزه اندازه‌گیری شده بود. نتایج نشان داد که با کاهش نسبت آب به سیمان مقاومت فشاری به ترتیب ۳۴/۴٪، ۳۷/۹٪ و ۳۵/۲٪ و مقاومت سایشی ۳۶/۳٪ نسبت به نمونه با نسبت آب به سیمان ۰/۵ بیشتر بود [۱۱]. بهنود و زیاری تحقیقات آزمایشگاهی بر روی تاثیر نسبت آب به سیمان و میزان میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن با مقاومت بالای عمل‌آوری شده با دمای بالا را انجام دادند. سه نوع طرح مخلوط با مقدار متفاوت ۰٪، ۶٪ و ۱۰٪ میکروسیلیس برای عمل‌آوری در شرایط دمایی مختلف با نسبت آب به مواد سیمانی ثابت و چهار طرح مخلوط برای شناخت اثر نسبت آب به مواد سیمانی در بتن، دو طرح با نسبت ۰/۳ و ۰/۴ و بدون میکروسیل و دو طرح دیگر با نسبت ۰/۳ و ۰/۳۵ که حاوی ۶٪ میکروسیلیس بود و سه طرح دیگر برای اندازه‌گیری تاثیر افزایش میکروسیلیس از ۵٪ تا ۱۰٪ و بطور مشابه با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی ساختند. تحقیق آن‌ها نشان داد که با نسبت‌های ۶٪ الی ۱۰٪ میکروسیلیس و آب ۶۰ درجه سانتیگراد مقاومت فشاری ۶/۷٪ کاهش یافته و ۱۴/۱٪ کمتر از شرایط معمولی بود. بهترین نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و مقدار میکروسیلیس ۶٪ بود [۱۲].

- 2 Balaguru
- 3 Safin
- 4 Shanang
- 5 Amin & Abu el-hassan
- 6 Kishore et al.

1 AL-Jabri et al.

میزان تخلخل و ساختار حباب دارد و منافذ کوچکتر و به مقدار کمتر هنگامی تولید می‌شود که خمیر سیمان بلافاصله در معرض رطوبت قرار گیرد [۲۱]. لائوسکا پیکارچیک و زابوسکی<sup>۴</sup> تاثیر فوق روان کننده و مواد کفزا بر روی خصوصیات رئولوژیکی و کارایی ملات و بتن خودتراکم را بررسی کردند. ۱۲ طرح مخلوط با نسبت های آب به مواد سیمانی ۰/۴ با فوق روان کننده های پلی کربوکسیلاتی و پلی کربوکسیلاتی اتر و شش نوع مواد کفزا ساخته و نتیجه گرفتند که کفزا میزان حباب هوا را کاهش می‌دهد و ملاتی که کفزا داشته باشد دچار جداشدگی مصالح نمی‌شود همان طور که ملات های با روانی مشابه و حاوی فوق روان کننده جداشدگی نداشتند. گیرش اولیه ملات با کفزا نسبت به ملات با فوق روان کننده بیش تر بود. استفاده از کفزا باعث کاهش نیاز به فوق روان کننده می‌شود ولی تاثیری بر مقاومت نداشت و مقاومتش مشابه مقاومت بتن حاوی فوق روان کننده بود. افزودن مواد کفزا و فوق روان کننده تاثیر بسزایی در مقاومت در برابر یخبندان بتن خود تراکم داشت [۲۲]. السادی<sup>۵</sup> در یک تحقیق آزمایشگاهی با یک طرح مخلوط ثابت، مقدار ۰، ۰/۶، ۰/۸، ۱ و ۱/۲ نسبت وزنی سیمان را با فوق روان کننده جایگزین نمود. همه نمونه ها در شرایط یکسان برای ۲۸ روز عمل آوری شده بودند. همان طور که انتظار می‌رفت با افزایش مقدار فوق روان کننده اسلامپ بیش تر شده و مقاومت طرح ها به ترتیب ۴۴، ۵۲، ۵۴، ۵۵، ۴۳ مگاپاسکال بود. نتیجه گیری کرد که بهترین مقدار فوق روان کننده در ۱٪ وزن سیمان بوده و استفاده بیش تر باعث کاهش مقاومت می‌شود [۲۳]. منصور و همکاران<sup>۶</sup> سه نوع کاهنده آب را برای کاهش نسبت آب به سیمان بتن بکار بردند تحقیقات آن ها نشان داد که استفاده از ۱/۵٪ روان کننده معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ مقاومت سن ۲۸ روزه ۴۵/۶ مگاپاسکال با اسلامپ ۱۱۰ میلی متر داشت که نمونه بتن بدون روان کننده همین طرح اسلامپش ۰ بود. با ۱٪ روان کننده و نسبت آب به سیمان ۰/۵۲ مقاومت ۳۳ مگاپاسکال و اسلامپ ۹۵ میلی متر داشت که نمونه بدون روان کننده آن ۳۵ میلی متر اسلامپ داشت. افزودن ۱/۵٪ روان کننده کندگیر در طرح با نسبت آب به سیمان ۰،۵ مقاومت ۴۷ مگاپاسکال و اسلامپ ۱۹۰ داشت درحالی که نمونه طرح بدون روان کننده کندگیر ۱۵ میلی متر اسلامپ داشت. با افزودن ۱٪ فوق روان کننده در طرح های با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴۵ مقاومت های ۶۳/۵ و ۵۳/۵ مگاپاسکال و اسلامپ های ۲۵ و ۲۲۵ میلی متر حاصل شد. برای همه طرح مخلوط ها بیش ترین اسلامپ زمانی

قالب های مکعبی، استوانه ای و منشوری برای مقاومت M40 و M50 جایگزینی شده بود. مقاومت نمونه ها در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه قابل قبول بیان شد. و میزان بهینه جایگزینی پودر سبوس برنج ر ۱۰٪ اعلام کردند. افزایش میزان پودر سبوس برنج، باعث کاهش کارایی بتن (اسلامپ ۲۷٪ و ضریب تراکم ۹٪)، مقاومت فشاری، تنش کششی، تنش خمشی و مدول الاستیسیته شده بود [۱۸]. راتان راجا و همکاران<sup>۱</sup> برای بررسی تاثیر افزودنی هایی مثل متاکائولین و گل قرمز به جای سیمان، خصوصیات مکانیکی بتن با مقاومت بالا را با طرح مخلوط های مختلف در رده مقاومتی M60 بررسی کردند. بهترین میزان متاکائولین و گل قرمز و یا ترکیب هر دو برای اینکه بیشترین مقاومت، تنش کششی و تنش خمشی را داشته باشند، به ترتیب ۸٪، ۴٪ و ۱۰٪ اعلام شد. استفاده از هر یک از مواد باعث کاهش کارایی بتن شده و نرخ تغییرات بتن با مقاومت بالا با جایگزینی متاکائولین و گل قرمز را از سن ۷ روزه به ۲۸ روزه به ترتیب ۰/۷۷۳ و ۰/۸۲۳ اعلام کردند [۱۹]. سرنیا و همکاران<sup>۲</sup> امکان ساخت بتن سبک با مقاومت بالا را با استفاده از خاکستر بادی به جای سنگدانه مطرح کردند. در آن تحقیق از ۴ نوع سنگدانه مصنوعی ساخته شده از خاکستر بادی استفاده شد. نتایج نشان داد که برای رسیدن به مقاومت بالا میزان سیمان و روان کننده باید افزایش یابد و این افزایش، ریسک افزایش وزن بتن را تا  $2000 \text{ Kg/m}^3$  یعنی مرز بتن سبک افزایش می‌دهد. مقاومت سن ۲۸ روزه نمونه ها از ۴۵ تا ۵۳ مگاپاسکال و وزن آنها از ۱۸۴۰ تا ۱۸۶۰ گزارش شده بود [۲۰].

## ۲-۲-۳- فوق روان کننده

خطیب و منگات<sup>۳</sup> مقدار تخلخل و حباب های هوای خمیر سیمان را تحت تاثیر استفاده از فوق روان کننده و شرایط عمل آوری مختلف بررسی کردند. نمونه های ساخته شده را با و بدون فوق روان کننده با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ ساخته و در شرایط دمای ۲۰ و ۴۵ درجه سانتیگراد در رطوبت ۲۵٪، ۵۵٪ و ۱۰۰٪ به مدت ۲۸ روز و ۶ ماه عمل آوری نمودند. عمل آوری در دمای بالا با شرایط آب و هوایی گرم شبیه سازی شده بود. نتایج نشان داد که استفاده از فوق روان کننده، باعث کاهش میزان کلی حجم هوای خمیر شده و به نظر نمی‌رسد که بر قطر اغلب منافذ تاثیرگذار باشد و درصد حباب های کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر با کاربرد فوق روان کننده افزایش یافته بود. همچنین اعلام کردند که روش عمل آوری تاثیر قابل توجهی بر

4 Łazniewska-Piekarczyk & Szwabowski  
5 Alsadey  
6 Mansor et al.

1 Rathan Raja et al.  
2 Cernya et al.  
3 Khatib & Mangat

پایه را با هدف جستجوی کارا و موثر فضای جستجو، در چارچوب‌های سطح بالاتر ترکیب کند. به زبان ساده الگوریتم، جمعیتی از نتیجه‌ها را برای مساله ایجاد می‌کند. سپس بهترین نتایج انتخاب می‌گردند. این نتیجه‌ها دوباره تولید می‌شوند که محیط جدید دیگری از نتیجه‌ها را در موقعیت متفاوتی از محیط قبلی ایجاد می‌نمایند. این فرایند زمانی تمام می‌شود که نتایج به دست آمده با معیارهای خاص منطبق باشند. امروزه این روش‌ها، الگوریتم‌های فراابتکاری نامیده می‌شوند. الگوریتم ژنتیک یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌های ابتکاری می‌باشد که از آن برای بهینه‌سازی توابع مختلف استفاده می‌شود. در این الگوریتم اطلاعات گذشته با توجه به موروثی بودن الگوریتم استخراج شده و در روند جستجو استفاده می‌شود [۲۹]. پرسپترون<sup>۶</sup> یک الگوریتم یادگیری ماشینی است که در دسته یادگیری با نظارت قرار می‌گیرد. الگوریتم پرسپترون یک الگوریتم دسته‌بندی دو دویی بوده و نوعی از دسته‌بندی است که می‌تواند با توجه به بردار ورودی تصمیم بگیرد که این ورودی متعلق به یک کلاس هست یا خیر. از طرفی این الگوریتم یک دسته‌بند خطی است، به این معنا که پیش‌بینی‌های خود را با توجه به ترکیب خطی وزن‌دار ورودی الگوریتم انجام می‌دهد. همچنین این الگوریتم به دلیل اینکه ورودی‌های خود را به صورت تک‌تک در زمان بررسی می‌کند، یک الگوریتم برخط می‌باشد. الگوریتم پرسپترون در سال ۱۹۵۷ در لابراتوار کرنل آرونوتیکال<sup>۷</sup> به وسیله فرانک روزنبلات<sup>۸</sup> ابداع شد [۳۰]. در واقع این الگوریتم جزو اولین شبکه‌های عصبی<sup>۹</sup> مصنوعی است که به کار گرفته شده است. در سال ۱۹۷۵ هالند<sup>۱۰</sup> یک مفهوم اولیه از الگوریتم ژنتیک<sup>۱۱</sup> ارائه داد. در این الگوریتم پس از تشکیل جمعیت اولیه عملگرهایی مانند فرزندآوری یا جهش ژنتیکی بهبود چرخه‌ای جمعیت را برعهده داشته و در نهایت توسط یک انتخاب تصادفی هدفمند جمعیت چرخه بعدی انتخاب می‌شوند. نسل‌گیری متعدد در چرخه‌های بعدی باعث بهبود جمعیت شده و افراد جامعه را به سمت بهبود مستمر سوق می‌دهد [۳۱]. الگوریتم کلونی مورچه‌ها<sup>۱۲</sup> برای دسترسی به غذا در سال ۱۹۹۲ توسط دوریگو<sup>۱۳</sup> به عنوان یک راه حل چند عامله برای مسائل مشکل بهینه‌سازی مثل فروشنده دوره‌گرد ارائه شد. این الگوریتم بر اساس روش مورچگان برای یافتن غذا پایه‌گذاری شده و فرایند آن به این نحو است که هر مورچه در

حاصل شده‌بود که کاهنده آب در ابتدا و بصورت یک‌جا به مصالح اضافه شده‌بود و مقاومت بیش‌تر زمانی حاصل شد که کاهنده بصورت تدریجی به مصالح اضافه شده‌بود [۲۴].

## ۲-۲-۴- سنگدانه‌ها

تأثیر نوع سنگدانه‌های درشت بر خواص مکانیکی بتن با مقاومت بالا توسط اوزتوران و چچن<sup>۱</sup> گزارش شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مقاومت معمولی بتن با سنگدانه‌های بازالتی قابل دسترس است و با شن معمولی نیز مشابه همین مقاومت به دست می‌آید، در صورتی که بتن با سنگدانه‌های آهکی به مقاومت بیش‌تری می‌رسد. بتن با مقاومت بالا با سنگدانه‌های بازالتی و آهکی خرد شده، دست یافتنی است [۲۵]. آیتسین و مهتا<sup>۲</sup> گزارش کردند که برای مصالح و طرح مخلوط مشابه استفاده از سنگدانه‌های دیاباز و آهکی، نسبت به کاربرد سنگدانه‌های گرانیتی و رودخانه‌ای، به تولید بتنی با مقاومت بیش‌تر منجر می‌شود، [۲۶]. بشر و همکاران<sup>۳</sup> تأثیر کیفیت سنگدانه‌ها را بر مقاومت‌های فشاری و کششی بتن با مقاومت بالا آزمایش کردند و نشان دادند که کیفیت سنگدانه‌ها به‌طور مشخص بر هر دو نوع مقاومت تأثیرگذار است و سنگدانه‌های سرباره‌ای بیش‌ترین تأثیر را بر مقاومت‌ها دارد؛ این در حالی است که سنگدانه‌های آهکی کم‌ترین تأثیر را دارند [۲۷]. کیلیچ و همکاران<sup>۴</sup> تأثیر نوع سنگدانه‌ها را بر مقاومت فشاری و مقاومت سایشی بتن با مقاومت بالا بررسی کردند. از پنج نوع سنگدانه مختلف در طرح‌های اختلاط استفاده شده بود. از طرف دیگر با جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس با سیمان در هر طرح، درنسبت ثابت آب به سیمان ۰/۳۵ نمونه‌ها ساخته شد. نتایج نشان داد که مقاومت‌های فشاری و سایشی سنگدانه‌های بازالتی، آهکی و ماسه‌ای مساوی و برای کوارتز و گابور کم‌تر بود [۲۸].

## ۲-۳- تعیین طرح مخلوط بهینه با استفاده از الگوریتم

### ۲-۳-۱- معرفی الگوریتم‌های تکاملی

از سال ۱۹۶۰ تقلید از پدیده‌های طبیعی برای استفاده در الگوریتم‌های توانمند جهت حل مسائل مشکل بهینه‌سازی مورد توجه قرار گرفت که شیوه‌های محاسبه تکاملی<sup>۵</sup> نام گرفتند. در طی ۲۰ سال گذشته، نوع جدیدی از الگوریتم ابتکاری به‌وجود آمد که اساسا تلاش می‌کند روش‌های اکتشافی

6 Perceptron  
7 Cornell Aeronautical Laboratory  
8 Rosenblatt  
9 Artificial Neural Network (ANN)  
10 Holland  
11 Genetic Algorithm (GA)  
12 Ant Colony Optimization (ACO)  
13 Dorigo

1 Ozturan & Cecen  
2 Aitcin & Mehta  
3 Beshr et al.  
4 Kilic et al.  
5 Evolutionary Computation

شامل گروهی مبتنی بر الگوریتم جستجو است که اولین بار در سال ۲۰۰۵ توسعه یافت. این الگوریتم شبیه‌سازی رفتار جستجوی غذای گروه‌های زنبور عسل است. هر زنبور پس از یافتن غذا توسط رقص خود سه پیام را برای دیگر زنبورها اعلام می‌کند. این پیام‌ها حامل مشخصات فاصله، نوع و جهت محل گل مورد نظر تا کندو است. این مشخصات فرایندی را تشکیل می‌دهد تا دیگر زنبورها نیز به محل غذا دست یابند و بهترین گل را پیدا کنند [۳۶]. الگوریتم‌های دیگری نیز در سالیان اخیر معرفی شدند که از آن جمله می‌توان به الگوریتم چکه‌آب‌های هوشمند<sup>۷</sup> یا چکاه نام برد. این الگوریتم یک الگوریتم بهینه‌سازی بر پایه هوش گروهی است که توسط شاه‌حسینی ابداع شد. الگوریتم چکاه، الگوریتمی است که به گونه گروهی کار می‌کند و الهام‌گرفته از طبیعت است. این الگوریتم در اصل برای بهینه‌سازی ترکیبی به کار برده می‌شود، ولی می‌توان آن را برای بهینه‌سازی پیوسته نیز آماده ساخت. این الگوریتم نخستین بار در سال ۲۰۰۷ میلادی، برای یافتن گشایش و راه حل برای مسأله فروشنده دوره‌گرد پیشنهاد شد. از آن پس، شماری از پژوهشگران در پی بهبود و به کار بستن این الگوریتم برای مشکل‌ها و مسائل گوناگون بوده‌اند. اساس الگوریتم چکاه مسیریابی آب در یافتن پایین‌ترین نقطه از یک سطح است [۳۷]. در سال ۲۰۱۷ توسط آقای کابلی و همکاران الگوریتم بهینه‌سازی قطره‌های باران<sup>۸</sup> ارائه شد. این الگوریتم بر اساس روش یافتن پایین‌ترین نقطه توسط قطره‌های باران به جستجو برای یافتن پایین‌ترین جواب مسأله می‌پردازد و کارایی آن در حل چند مسأله ریاضی و مقایسه آن با دیگر الگوریتم‌ها از نظر سرعت و همگرایی پاسخ‌ها مقایسه شده و نتایج رضایت بخش بود [۳۸].

الگوریتم‌ها توانایی بسیار خوبی در یافتن پاسخ بهینه در فضای جستجوی وسیع و پرشمار دارند. بتن‌های با اجزای ساخت متعدد نیز دارای طرح مخلوط‌های متنوع هستند و لذا یافتن طرح مخلوط بهینه همواره مورد سوال بوده است. الگوریتم ژنتیک یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های ابتکاری است که از آن برای بهینه‌سازی توابع مختلف استفاده می‌شود. در این الگوریتم اطلاعات گذشته با توجه به موروثی بودن الگوریتم استخراج شده و در روند جستجو مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابتدا توسط هالند، یک مفهوم اولیه از الگوریتم ژنتیک ارائه شد و سپس دیگران آن را بسط دادند. الگوریتم‌های ژنتیک، روش‌های جستجوی تصادفی هستند که بر اساس انتخاب طبیعی و نسل‌شناسی طبیعی کار می‌کنند.

ساجدی و رزاک رابطه بین مقاومت در سنین ۷ و ۲۸ روزه بتن با

7 Intelligent Water Drops (IWD)  
8 Water Fall Optimization (RFO)

راه یافتن غذا اثری از خود به جا می‌گذارد. پس در صورتی که یک مورچه غذایی را پیدا کند به دلیل رفت و برگشت، دو اثر در مسیر می‌گذارد و اگر مورچه‌ای پیدا نکرده باشد یک اثر دارد، بنابراین مورچه دیگری اگر بخواند مسیری را انتخاب کند، مسیری را انتخاب خواهد کرد که دارای اثر بیش‌تری است و به این ترتیب در چرخه‌های متفاوت مسیرهای بهتر انتخاب می‌گردد [۳۲]. الگوریتم پرندگان یا ازدحام ذرات<sup>۱</sup> توسط کندی و ابرهارت<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۵ مطرح شد. یک الگوریتم محاسبه‌ای تکاملی، الهام گرفته از طبیعت و براساس تکرار می‌باشد. منبع الهام این الگوریتم، رفتار اجتماعی حیوانات، همانند حرکت دسته جمعی پرندگان و ماهی‌ها بود [۳۳]. الگوریتم رقابت استعماری با مدلسازی ریاضی فرایند تکامل اجتماعی- سیاسی، الگوریتمی برای حل مسائل ریاضی بهینه‌سازی ارائه می‌دهد. الگوریتم رقابت استعماری<sup>۳</sup> که توسط آتش‌پزگرگری و لوکاس<sup>۴</sup> ارائه شد، مجموعه اولیه‌ای از جواب‌های احتمالی را تشکیل می‌دهد. این جواب‌های اولیه در الگوریتم ژنتیک با عنوان کروموزوم، در الگوریتم ازدحام ذرات با عنوان ذره و در الگوریتم رقابت استعماری نیز با عنوان کشور شناخته می‌شوند. الگوریتم رقابت استعماری با روند خاصی، این جواب‌های اولیه (کشورها) را به تدریج بهبود داده و در نهایت جواب مناسب مسأله بهینه‌سازی (کشور مطلوب) را در اختیار می‌گذارد. پایه‌های اصلی این الگوریتم را سیاست همسان‌سازی، رقابت استعماری و انقلاب تشکیل می‌دهند. این الگوریتم با تقلید از روند تکامل اجتماعی، اقتصادی و سیاسی کشورها و با مدل‌سازی ریاضی بخش‌هایی از این فرایند، عملگرهایی را در قالب منظم به صورت الگوریتم ارائه می‌دهد که می‌تواند به حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی کمک کند [۳۴]. الگوریتم شبیه‌سازی ذوب فلزات، الگوریتم محبوبی است که پس از معرفی توسط کرکپاتریک و همکاران<sup>۵</sup> به‌طور گسترده‌ای در حل بسیاری از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی استفاده شده است. این روش یک سبک جستجوی محلی تصادفی بر پایه اصولی از طبیعت می‌باشد. پایه این الگوریتم بر اساس پرش قطره‌ای فلزات در حین سرد شدن است که مطابق عدد خاصی انجام می‌شود [۳۵]. وان فریسچ<sup>۶</sup>، جزو اولین کسانی بود که از رویه‌های پایه و ساده زنبوری برای حل مسائل ترکیبی بهینه‌سازی استفاده کرد. او سامانه زنبوری را معرفی نمود و از آن برای حل مسأله معروف فروشنده دوره‌گرد استفاده کرد. الگوریتم زنبور،

1 Particle Swarm Optimization (PSO)  
2 Kenned & Eberhart  
3 Imperialist Competitive Algorithm (ICA)  
4 Lucas  
5 Kirkpatrick et al.  
6 Von Frisch

آماری نسبت به بهینه سازی طرح مخلوط بتن با مقاومت بالا اقدام کرده بود [۴۴]، در این تحقیق با استفاده از داده های آزمایشگاهی گزارش سیمون و با استفاده از الگوریتم ژنتیک فراابتکاری ابتدا تابع طرح مخلوط محاسبه شد و سپس این تابع با لحاظ قیمت مصالح و با اعمال قیودی چون محدودیت نسبت آب به سیمان و محدوده مجاز اسلامپ، مجدداً توسط الگوریتم ژنتیک بهینه سازی شد. سپس تاثیر تغییر میزان هریک از مصالح طرح مخلوط در توازن بین مقاومت سن ۲۸ روزه و هزینه بتن بررسی گردید و مشخص شد که الگوریتم با هوشمندی مقدار مصالح را به نحوی تغییر می دهد که ضمن دستیابی به مقاومت مدنظر، هزینه مصالح طرح کمینه باشد.

### ۲-۳-۲- بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

#### ۲-۳-۱- معرفی الگوریتم ژنتیک فراابتکاری تحقیق

در الگوریتم بکار رفته ابتدا جمعیت اولیه تشکیل شده سپس علاوه بر عملگرهای عمومی الگوریتم ژنتیک، از چند روش ابتکاری نیز استفاده شده تا برای الگوریتم، جستجو در فضای پاسخ ها متنوع تر و بهینه باشد. سپس با انتخاب جمعیت جدید بر اساس انتخاب تصادفی با احتمال انتخاب فرد بهتر، فرآیند ادامه می یابد. برای درک بهتر موضوع عملگرها در ادامه شرح داده شده اند.

الف- تشکیل جمعیت اولیه

ب) عملگر تصادفی فرزند آوری

ج) عملگر جهشی

د) عملگر اصلاح نژاد

ه) شایستگی فرد در جامعه

و) اعمال جریمه

ز) انتخاب نسل جدید

ح) نخبه پروری

برای تمام مراحل فوق در نرم افزار MATLAB برنامه نویسی شده و پاسخ ها مستخرج این فرآیند است.

### ۲-۳-۲- تشکیل تابع طرح مخلوط توسط الگوریتم

در این مرحله، هدف رسیدن به توابعی برای اسلامپ و مقاومت است که با اعمال نسبت حجمی مصالح در آن ها، بتوان با یک تقریب خوب اسلامپ و مقاومت در سن ۲۸ روزه آن طرح مخلوط را پیش بینی کرد. داده های اولیه، آزمایش های انجام شده برای طرح مخلوط های مختلف و نتایج طرح

مقاومت بالا را مدل سازی نمودند. برای این کار با استفاده از ۵۰ طرح مخلوط ۶۵۰ نمونه متفاوت ساخته شده از سیمان، آب، میکروسیلیس، سنگدانه و فوق روان کننده تهیه کرده و سپس مقاومت فشاری در سنین ۱، ۳، ۷ و ۲۸ روزه را به دست آوردند. نتایج تحقیقات آن ها نشان داد که رگرسیون چندبعدهی، شبکه عصبی و رگرسیون خطی به ترتیب کارایی بهتری نسبت به یکدیگر در تخمین مقاومت در سن ۲۸ روزه نسبت به مقاومت در سن ۷ روزه دارند. رابطه بیان شده انطباق خوبی با شرایط عمل آوری نمونه ها در اتاق بخار و غوطه وری در آب آهک اشباع در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و نمونه های بدون سرباره داشت [۳۹]. گوررا و کیوسیسی<sup>۱</sup> با استفاده از یک الگوریتم غیرخطی در MATLAB، طراحی بهینه ساختار بتن های مسلح را ارائه دادند و در این کار هزینه فرم دادن، بتن ریزی و آرماتور بندی توسط کارگرها و همچنین مصالح به عنوان ورودی های تابع مساله در نظر گرفته شدند. در این تحقیق هدف بهینه سازی ابعاد تیرها و ستون ها در بتن های مسلح بود که با استفاده از آزمایش های مختلف و برنامه نویسی الگوریتم در MATLAB محقق شد [۴۰]. چاپرا و همکاران<sup>۲</sup> برای پیش بینی سیر رشد مقاومت در سنین ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه از شبکه مصنوعی و الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. در این پژوهش ۴۹ طرح مخلوط با مصالح معمول و ۲۷ طرح با اضافه نمودن خاکستر بادی در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و بررسی ها نشان از عملکرد بهتر شبکه عصبی در پیش بینی رشد مقاومت در طول زمان بود [۴۱]. مسیحی و همکاران موازنه قیمت-زمان-محدودیت منابع، در پروژه های چندحالتی را با یک الگوریتم ژنتیک اصلاح شده حل کرده که در این الگوریتم شناس اعضا بهتر جمعیت، بیش تر بوده و نتیجه موازنه بسیار رضایت بخش بود [۴۲]. حقیقی و احمدی نجل بهینه سازی سیاست بهره برداری و منحنی فرمان برای سیستم های چند مخزنی با استفاده از مدل سازگار شونده شبیه ساز با کاربرد الگوریتم ژنتیکی که خودکار بود، را ارائه دادند. در این طرح الگوریتم در چرخه های متوالی بهینه سازی انجام داده است [۴۳].

طبق بررسی های انجام شده توسط نویسندگان این مقاله در سوابق مرتبط با تحقیق، تاکنون پژوهشگران زیادی برای یافتن طرح مخلوط بهینه که در آن قیمت و مقاومت بتن مد نظر باشد، تلاش نموده اند و عده ای دیگر نیز تاثیر تغییرات مصالح طرح مخلوط را بر تغییر مقاومت بررسی کرده اند از جمله این محققین به سیمون<sup>۳</sup> می توان اشاره نمود که با استفاده از روش

1 Guerra & Kioussis  
2 Chopra et al.  
3 Simon

جدول ۲. معرفی مصالح مصرفی در تحقیق

Table 2. Introduction of the used materials in the research

ریزدانه	درشت دانه	فوق روان کننده	میکروسیلیس	سیمان	آب
X <sub>6</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub>

A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>14</sub>	C <sub>15</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>23</sub>	C <sub>24</sub>	C <sub>25</sub>	C <sub>26</sub>	C <sub>34</sub>	C <sub>35</sub>	C <sub>36</sub>	C <sub>45</sub>	C <sub>46</sub>	C <sub>56</sub>	K
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	---

شکل ۲. نمای کروموزوم مساله در الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

Fig. 2. Chromosome view of the problem in meta-heuristic genetic algorithm

معلومات تابع مساله (۱):  
 درصدهای حجمی با توجه به داده های آزمایشگاهی در نظر گرفته می شود.  
 مقاومت نمونه ها برای تابع مقاومت و اسلامپ نمونه ها برای تابع اسلامپ  
 $X =$  درصد حجمی اجزاء بتن در نمونه ها  
 مجهولات تابع مساله (۱):  
 $A_n =$  ضریب عددی برای درصد حجمی اجزاء بتن  
 $B_n =$  توان برای درصد حجمی اجزاء بتن  
 $C_{nm} =$  ضریب عددی برای حاصلضرب درصدهای حجمی اجزاء بتن  
 $K =$  عدد ثابت

ب: حل مساله توابع با استفاده از الگوریتم

برای حل مساله، با توجه به تعداد اجزاء بتن با مقاومت بالا و تابع مذکور در رابطه (۱)، تعداد ۲۸ مجهول وجود دارد که همانند شکل (۲) بصورت یک رشته مرتب می شوند. الگوریتم یکبار برای مجهولات محاسبه تابع مقاومت فشاری سن ۲۸ روزه و بار دیگر برای محاسبه مجهولات تابع اسلامپ اجرا می شود.

۳-۲-۳- بهینه سازی تابع طرح مخلوط

در این پژوهش، هدف کار علاوه بر یافتن طرح مخلوطی که موازنه ای

ها برای اسلامپ و مقاومت در سن ۲۸ روزه است. شرط این که تابعی بتواند رابطه بین نسبت درصد مصالح در طرح مخلوطها را با مقاومت یا اسلامپ مشخص نماید، داشتن مجموع مربعات کمتر در اختلاف بین خروجی تابع پیش بینی طرح مخلوط، با نتایج آزمایشگاهی همان طرح است. به عبارتی هر تابع پیشنهادی، دارای یک خروجی برای اسلامپ یا مقاومت به ازاء طرح مخلوط خواهد بود که این خروجی اختلافی با نتیجه آزمایشگاه دارد و تابعی روابط بین نسبت مصالح در رسیدن به مقاومت یا اسلامپ را بهتر نشان خواهد که دارای مجموع مربعات کمتر در اختلاف باشد.

الف: تابع طرح مخلوط

تابع پیشنهادی این پژوهش تابعی است که در آن از قبل ضرایب و توان عوامل مشخص نباشد و از طرفی از آنجا که نسبت های حجمی طرح مخلوط همه زیر عدد یک می باشند ضرب سه تایی آنها بسیار ناچیز و در حد صفر خواهد بود، بنابراین تابع از عوامل اصلی و حاصلضرب دوتایی از آن ها تشکیل شده است.

-مصالح اصلی عبارتند از:

-تابع مساله

$$F_{(x)} = \left( \sum_{n=1}^6 A_n * X_n^{B_n} \right) + \left( \sum_{n=1}^5 X_n * \sum_{m=n+1}^6 C_{nm} * X_m \right) + K \quad (1)$$

$X_{N,1}$	$X_{N,2}$	$X_{N,3}$	$X_{N,4}$	$X_{N,5}$	$X_{N,6}$
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

شکل ۳. نمای کروموزم تابع بهینه‌سازی

Fig. 3. Chromosome view of the optimization function

$$F_{(p)} = CN - \sum_{n=1}^6 (X_n * P_n) \quad (4)$$

$P_n$ : قیمت ماده n به ازاء متر مکعب

با داشتن کروموزم و جمعیت اولیه و روابط محاسباتی (۲) تا (۴) فرآیند الگوریتم و عملگرها اجرایی می‌شود. روند کار تا جایی ادامه پیدا می‌کند که جواب بهتری پیدا نشود یا تغییرات بسیار جزئی باشد.

### ۲-۳-۲-۴-صحت سنجی الگوریتم

برای یافتن میزان خطای تابع ارائه شده توسط الگوریتم با واقعیت، ابتدا چند طرح مخلوط مختلف که قبلا جزئیات آنها در رده‌های مختلف مقاومتی از الگوریتم گرفته شدند را در آزمایشگاه ساخته و پس از اندازه‌گیری اسلامپ بتن تر طبق استاندارد ASTM C143 و تعیین میزان مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بر اساس استاندارد ASTM C39، نتایج با خروجی الگوریتم مقایسه می‌شوند.

### ۳- تحلیل نتایج روش‌ها ۳-۱- داده‌های آزمایشگاهی

در گزارش سیمون به عنوان پژوهش مرجع ابتدا ۳۶ طرح مخلوط با لحاظ دامنه مشخص برای مصالح آزمایش شدند. مشخصات و نتایج آنها به شرح جداول (۳) تا (۵) است.

جدول ۳. محدوده حجمی مصالح مصرفی در طرح مخلوط‌های سیمون [۴۴]

Table 3. The volumetric range of materials used in Simon's mixture design [44]

مصالح	آب ( $m^3$ )	سیمان ( $m^3$ )	میکروسیلیس ( $m^3$ )	فوق روان‌کننده ( $m^3$ )	درشت دانه ( $m^3$ )	ریزدانه ( $m^3$ )
مشخصه	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
کمترین مقدار ترکیب	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۵
بیشترین مقدار ترکیب	۰/۱۸۵	۰/۱۵	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۴۴۲۴	۰/۲۹۲۴

بین مقاومت و قیمت ساخت آن باشد، تامین مقاومت هدف مشخصی با کمترین قیمت امکان پذیر نیز می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، مبنای کار تابع مقاومت خواهد بود و با اعمال قیمت مصالح، موازنه لازم صورت می‌گیرد. به همین منظور مجدداً تابع مقاومت (۱) نیاز به بررسی دارد با این تفاوت که این بار ضرایب و توان‌ها ( $K$ ,  $C_{nm}$  و  $B_n$  و  $A_n$ ) مشخص است و لازم است نسبت های حجمی مصالح (به گونه ای باشند که مقاومت خروجی تابع و قیمت مصالح آن نسبت ها اقتصادی باشد. با توجه به در دست داشتن تابع مقاومت کافی است قیمت هر طرح را در تابع برزش آن دخیل کرده و سپس در فرایند انتخاب نسل بعد با استفاده از چرخه رولت، انتخاب انجام گردد. از این رو، نسبت های تصادفی مصالح برای متغیر های مجهول تابع در نظر گرفته می‌شوند؛ این نسبت ها حتما باید در محدوده پذیرفته شده برای بتن های با مقاومت بالا بوده و بهتر آن است که بسیار نزدیک به محدوده انتخابی طرح های آزمایشگاهی باشند. کاربرد تابع اسلامپ نیز به این دلیل است که نمونه های با اسلامپ غیرمقبول تغییر یافته و مجدداً به چرخه الگوریتم ارجاع داده شوند.

$$0.98 \leq \sum_{n=1}^6 X_n \leq 1 \quad (2)$$

$$\text{Fitness Function} = F_{(\text{strenght-cost})} = F_{(c_s)} + F_{(p)} \quad (3)$$

جدول ۴. نسبت‌های حجمی طرح مخلوط‌های آزمایشگاهی سیمون [۴۴]

Table 4. Volume ratios of Simon's design of laboratory mixtures [44]

شماره طرح	شماره ساخت	آب (m <sup>3</sup> )	سیمان (m <sup>3</sup> )	میکروسیلیس (m <sup>3</sup> )	فوق‌روان‌کننده (m <sup>3</sup> )	درشتدانه (m <sup>3</sup> )	ریزدانه (m <sup>3</sup> )	مقاومت ۲۸ روزه (MPa)	اسلامپ (mm)
۵	۷	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۴۶	۰/۴۲۸۴	۰/۲۵	۴۸/۵	۱۳
۱۱	۶	۰/۱۸۵	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴۱۷۴	۰/۲۵	۴۸/۵	۱۰۲
۱۳	۱۵	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۹۲۴	۵۳/۲	۵۷
۱۵	۳۸	۰/۱۶۵۶	۰/۱۵	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۴	۰/۲۵	۵۸/۱	۵۱
۱۶	۸	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴۴۲۴	۰/۲۵	۵۳/۱	۳۵
۲۰	۱۳	۰/۱۸۵	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۶۷۴	۵۰/۹	۱۱۸
۲۲	۴	۰/۱۸۵	۰/۱۴۷۴	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۵	۴۸/۲	۶۷
۲۸	۱۶	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۷۸۴	۵۳/۶	۲۹
۳۷	۳۰	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۴	۰/۲۶۵۶	۵۶	۳۵
۳۸	۲۶	۰/۱۷۶۷	۰/۱۴۱۷	۰/۰۲۷	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۵	۵۳/۲	۲۹
۴۸	۲۸	۰/۱۷۲۵	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۷۴	۰/۴	۰/۳۷۷۱	۵۸/۱	۱۷۱
۶۳	۲۷	۰/۱۷۲۵	۰/۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۴۱۳۱	۰/۲۵	۵۵/۲	۱۲۴
۶۵	۳۱	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۴۱۵۶	۰/۲۵	۵۱/۱	۳۲
۶۶	۲۵	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۴۱۲۸	۰/۲۶۲۸	۵۹/۸	۷۶
۷۰	۲۹	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	۰/۴	۰/۳۷۱	۵۴/۵	۵۱
۷۱	۵	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۷۴	۰/۴۰۹۸	۰/۲۵۹۸	۵۵/۲	۵۷
۷۸	۱۱	۰/۱۸۵	۰/۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۴۰۰۳	۰/۲۵۰۳	۵۱/۷	۱۲۷
۸۷	۲۴	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴۲۱۲	۰/۲۷۱۲	۵۱	۶۷
۸۹	۱۹	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۸۲۴	۵۴/۳	۳۸
۹۱	۹	۰/۱۸۵	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۷۴	۰/۴۰۷۳	۰/۲۵۷۳	۶۰/۴	۲۰۰
۹۸	۱۷	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴۳۲۴	۰/۲۵	۵۱/۹	۳۲
۱۰۱	۱۰	۰/۱۷۱۲	۰/۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴۱۱۲	۰/۲۵	۵۳/۶	۲۲
۱۰۳	۱۴	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	۰/۴۲۱	۰/۲۵	۵۴/۶	۶۴
۱۱۰	۲۱	۰/۱۷۱۲	۰/۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۶۱۲	۵۳/۲	۵۱
۱۱۶	۳۳	۰/۱۷۲۵	۰/۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۴	۰/۲۶۳۱	۵۶/۲	۱۱۴
۱۲۳	۳۶	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۰۰۶	۰/۴۱۲	۰/۲۶۲	۶۱	۹۹
۱۲۷	۱۲	۰/۱۷۲	۰/۱۳۹۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	۰/۴۰۹۸	۰/۲۵۹۸	۵۰/۲	۹۹
۱۶۳	۲۰	۰/۱۶۵۶	۰/۱۳۴۳	۰/۰۱۶۵	۰/۰۰۶۷	۰/۴۲۳۴	۰/۲۵۳۶	۶۰/۸	۹۵
۵	۲۲	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۴۶	۰/۴۲۸۴	۰/۲۵	۵۴/۱	۲۵
۱۱	۲۳	۰/۱۸۵	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴۱۷۴	۰/۲۵	۴۸	۱۱۴
۲۰	۳۴	۰/۱۸۵	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۶۷۴	۵۱/۶	۱۲۷
۳۸	۳۹	۰/۱۷۶۷	۰/۱۴۱۷	۰/۰۲۷	۰/۰۰۴۶	۰/۴	۰/۲۵	۴۵/۵	۲۵
۷۱	۳۵	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۷۴	۰/۴۰۹۸	۰/۲۵۹۸	۶۵/۳	۱۰۸
۱۲۷	۱۸	۰/۱۷۲	۰/۱۳۹۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	۰/۴۰۹۸	۰/۲۵۹۸	۵۴/۱	۹۲
۱۲۷	۳۲	۰/۱۷۲	۰/۱۳۹۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	۰/۴۰۹۸	۰/۲۵۹۸	۵۷/۲	۱۲۱
۱۲۷	۳۷	۰/۱۷۲	۰/۱۳۹۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	۰/۴۰۹۸	۰/۲۵۹۸	۵۴/۶	۱۰۲



جدول ۵. نسبت های وزنی طرح مخلوط های آزمایشگاهی سیمون ( $\text{Kg/m}^3$ ) [۴۴]

Table 5. Weight ratios of Simon's laboratory mixture design ( $\text{Kg/m}^3$ ) [44]

شماره ساخت	آب ( $\text{m}^3$ )	سیمان ( $\text{m}^3$ )	میکروسیلیس ( $\text{m}^3$ )	فوق روان کننده ( $\text{m}^3$ )	درشتدانه ( $\text{m}^3$ )	ریزدانه ( $\text{m}^3$ )
۷	۱۸۵	۴۰۵/۶	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۸۵/۲۴	۶۲۵
۶	۱۸۵	۴۵۹/۸۸۸	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۴۰	۶۲۵
۵	۱۶۰	۴۰۵/۶	۵۷/۵۱	۴/۸۳	۱۱۳/۸۴	۶۲۵
۳۸	۱۸۵	۴۰۵/۶	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۸۵/۲۴	۶۲۵
۸	۱۷۲	۴۳۵/۲۴	۲۷/۶۹	۶/۳	۱۰۶۵/۴۸	۶۴۹/۵
۱۳	۱۸۵	۶/۴۰۵	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۴۰	۶۶۸/۵
۴	۱۶۰	۴۰۵/۶	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۹۵/۱۲	۶۷۸
۱۶	۱۶۰	۴۳۶/۸	۵۷/۵۱	۷/۷۷	۱۰۸۰/۵۶	۶۲۵
۳۰	۱۸۵	۴۰۵/۶	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۴۰	۶۶۸/۵
۲۶	۱۸۵	۴۰۵/۶	۵۷/۵۱	۷/۷۷	۱۰۴۰/۷۸	۶۲۵/۷۵
۲۸	۱۶۰	۸/۴۳۶	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۱۲۴/۲۴	۶۲۵
۲۷	۱۶۰	۴۰۵/۶	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۱۵۰/۲۴	۶۲۵
۳۱	۱۶۰	۴۰۵/۶	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۴۰	۷۳۱
۲۵	۱۷۶/۷	۴۳۲/۱۰۴	۵۷/۵۱	۴/۸۳	۱۰۴۰	۶۲۵
۲۹	۱۷۱/۲	۴۶۸	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۴۰	۶۵۳
۵	۱۶۰	۴۰۵/۶	۵۷/۵۱	۴/۸۳	۱۰۴۰	۶۹۶
۱۱	۱۷۱,۲	۴۶۸	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۶۹/۱۲	۶۲۵
۲۴	۱۶۰	۴۰۵/۶	۵۷/۵۱	۴/۸۳	۱۱۱۳/۸۴	۶۲۵
۱۹	۱۷۲	۴۳۵/۲۴	۲۷/۶۹	۶/۳	۱۰۶۵/۴۸	۶۴۹/۵
۹	۱۶۰	۴۳۶/۸	۲۷/۶۹	۴/۸۳	۱۰۴۰	۷۰۶
۱۷	۱۶۰	۴۶۸	۲۷/۶۹	۶/۳	۱۰۴۰	۶۷۷/۵
۱۰	۱۷۶/۷	۴۴۲/۱۰۴	۵۷/۵۱	۴/۸۳	۱۰۴۰	۶۲۵
۱۴	۱۶۰	۴۶۸	۲۷/۶۹	۶/۳	۱۰۹۴/۶	۶۲۵
۲۱	۱۷۲	۴۳۵/۲۴	۲۷/۶۹	۶/۳	۱۰۶۵/۴۸	۶۴۹/۵
۳۳	۱۷۲/۵	۴۰۵/۶	۵۷/۵۱	۷/۷۷	۱۰۷۴/۰۶	۶۲۵
۳۶	۱۶۰	۴۶۸	۲۷/۶۹	۷/۷۷	۱۰۶۵/۴۸	۶۴۹/۵
۱۲	۱۶۰	۴۳۶/۸	۵۷/۵۱	۷/۷۷	۱۰۴۰	۶۶۴
۲۹	۱۷۲/۵	۴۰۵/۶	۵۷/۵۱	۷/۷۷	۱۰۴۰	۷۵۶۵۷
۲۲	۱۷۲	۴۳۵/۲۴	۲۷/۶۹	۶/۳	۱۰۶۵/۴۸	۶۴۹/۵
۲۳	۱۶۵/۶	۴۶۸	۵۷/۵۱	۷/۷۷	۱۰۴۰	۶۲۵
۳۴	۱۷۲/۵	۴۰۵/۶	۲۷/۶۹	۷/۷۷	۱۰۴۰	۶۹۲/۷۵
۳۹	۱۶۰	۴۰۵/۶	۵۷/۵۱	۷/۷۷	۱۰۷۳/۲۸	۶۵۷
۳۵	۱۸۵	۴۰۵/۶	۲۷/۶۹	۷/۷۷	۱۰۵۸/۹۸	۶۴۳/۲۵
۱۸	۱۶۵/۶	۴۱۹/۰۱۶	۳۵/۱۴۵	۷/۰۳۵	۱۱۰۰/۸۴	۶۳۴
۳۲	۱۶۰	۴۳۶/۸	۴۲/۶	۶/۳	۱۰۷۱/۲	۶۵۵
۳۷	۱۶۰	۴۶۸	۲۷/۶۹	۷/۷۷	۱۰۶۵/۴۸	۶۴۹/۵

جدول ۶. ضرایب تابع مقاومت فشاری الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

Table 6. Coefficients of compressive strength function of meta-heuristic genetic algorithm

F(Cs)	۱	۲	۳	۴	۵	۶
A	۰/۵۲۶۵۱	۲۰۲۷/۹۱۴	۰/۵۰۱۸۱۶	۱۷۰۹/۱۰۸	۰/۵۹۲۱۴۶	۰/۲۶۷۲۳
B	۲	۵/۰۵۹۸۳۰۴۷۹	۰/۶۶۶۶۶۷	۱	۰/۶۶۶۶۶۷	۰/۶۶۶۶۶۷
C <sub>1</sub>	-	-۲۵۹/۰۷	-۱۶۲۶/۷۸	-۳۱۱۲/۲۲	-۶۱/۲۱۵۷	۸۱/۷۸۴۳۳
C <sub>2</sub>	-	-	۳۲۱۵/۱۸۷	-۱۳۶۴/۹۵	-۳/۲۱۵۶۷	۱۱۲/۲۹۵۷
C <sub>3</sub>	-	-	-	-۲۸۷۴/۶۶	-۸۴۸/۸۱۷	۶۶۲/۹۸۴۱
C <sub>4</sub>	-	-	-	-	۱۹۹۷/۰۴۲	-۸۵۸/۷۸۵
C <sub>5</sub>	-	-	-	-	-	۶۳/۷۸۴۳۳
K <sub>Cs</sub>	-	-	-	-	-	۳۸/۸۹۳۰۸

جدول ۷. ضرایب تابع اسلامپ الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

Table 7. Slump function coefficients of meta-heuristic genetic algorithm

F(Slump)	۱	۲	۳	۴	۵	۶
A	۳۰۷۸/۹۳۴	-۳۸۶۲/۶۲	-۲۷۰۴/۷۶	۲۳۹۲/۶۶۱	-۱۰۸۸/۳۵	-۹۸۰/۹۳۸
B	۱/۴۵۸۸۹۱	۱/۳۹۹۰۹	۱	-۳۳۳۳۳۳	۰/۲۵	۲
C <sub>1</sub>	-	-۳۲۳۹/۵۷	۲۸۴/۲۱۲۰۱۴۶	۲۳۹۹/۲۱۵۲۲	۱۲۷۶/۵۵۲	۳۴۲۴/۷۸۳
C <sub>2</sub>	-	-	-۲۷۴۶/۹۲	۱۶۷۸/۷۷۴	۲۹۱۲/۵۶۹	۱۷۳۰/۹۵
C <sub>3</sub>	-	-	-	-۱۷۲۵/۱۱	۲۴۲۵/۹۱۶	-۱۶۵۴/۴۹
C <sub>4</sub>	-	-	-	-	۹۹/۵۶۳۹۶	-۱۴۰۱/۴۶
C <sub>5</sub>	-	-	-	-	-	-۱۷۸۹/۸۶۱
K <sub>Sl</sub>	-	-	-	-	-	۹۰/۸۴۵۲

۳-۲- محاسبات الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

۳-۲-۱- تعریف توابع مقاومت و اسلامپ

برای حل مساله، داده‌های جدول آزمایشگاهی همان داده‌های گزارش مرجع بود. با استفاده از روابط (۶) و (۷) و بر اساس فرآیند الگوریتم، خروجی ضرایب و توان‌ها برای مقاومت ۲۸ روزه جدول (۶) و اسلامپ جدول (۷) بدست آمده و حداقل مجموع مربعات به ترتیب ۲۸۰ و ۷۷۸۸ شد.

۳-۲-۲- بهینه‌سازی تابع مقاومت- قیمت

سیمون در گزارش خود طرح مخلوط منتج از آزمایشات را بهینه‌سازی نموده و مقاومت ۵۴/۷ مگاپاسکال با طرح مخلوطی به شرح ذکر شده در جدول (۸) را نقطه بهینه بیان نمود. برای بهینه‌سازی با الگوریتم فراابتکاری، ابتدا الگوریتم با دامنه معرفی شده در گزارش مرجع سیمون به شرح جدول (۳)، راه اندازی گردید و پاسخ بهینه الگوریتم، ذکر شده در جدول (۸)،

جدول ۸. دامنه‌های گزارش مرجع و قیمت در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی طرح مخلوط در الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

**Table 8. Ranges of reference report and price considered for optimization of mixed design in meta-heuristic genetic algorithm**

پاسخ با انتخاب دامنه یکنواخت	مقاومت فشاری (MPa)	آب (m <sup>3</sup> )	سیمان (m <sup>3</sup> )	میکروسیلیس (m <sup>3</sup> )	فوق‌روان‌کننده (m <sup>3</sup> )	درشتدانه (m <sup>3</sup> )	ریزدانه (m <sup>3</sup> )	اسلامپ (mm)	آب سیمانی	قیمت (دلار)
الگوریتم	۵۹/۵۶	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۷۴	۰/۴	۰/۲۸۹۵	۱۳۵	۰/۳۵۷	۲۰/۱۲
گزارش مرجع	۵۴/۷	۰/۱۶	۰/۱۳۳	۰/۰۱۴	۰/۰۰۵۴	۰/۴۰۹	۰/۲۸۷	۷۵/۷۹	۰/۳۵۷	۲۰/۴۲

جدول ۹. دامنه‌های جدید و قیمت در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی طرح مخلوط در الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

**Table 9. The new domains and the price considered for the optimization of the mixed design in meta-heuristic genetic algorithm**

مصالح در الگوریتم	آب (m <sup>3</sup> )	سیمان (m <sup>3</sup> )	میکروسیلیس (m <sup>3</sup> )	فوق‌روان‌کننده (m <sup>3</sup> )	درشتدانه (m <sup>3</sup> )	ریزدانه (m <sup>3</sup> )	اسلامپ (mm)	آب مواد سیمانی
مشخصه	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	-	-
کمترین	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۵	۰/۳۷	۰/۲۰	۸۰	۰/۲۹
بیشترین	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۰۲۸	۰/۰۰۷۴	۰/۴۵	۰/۳۰	-	-
قیمت به دلار	۰/۱۲۱	۸۰/۲۲۸	۳۸۰/۱۷۸	۵۷/۱۴	۵/۰۰۷	۷/۱۴	-	-

حجمی و وزنی درجداول (۱۰) و (۱۱) آورده شده است.

طرح مخلوط شماره ۱۴ بهترین پاسخ الگوریتم براساس مصالح آزمایش

شده است.

۳-۲-۳- مقایسه طرح مخلوط بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری با پاسخ بهینه گزارش مرجع

همانگونه که در جدول (۱۲) قابل مشاهده است، پاسخ بهینه یافته شده

توسط الگوریتم ژنتیک فراابتکاری، نسبت به پاسخ گزارش مرجع دارای ۱۰/۲

درصد مقاومت بالاتر با ۸/۲ درصد هزینه کمتر است.

در جدول (۱۳) توانمندی الگوریتم نسبت به گزارش مرجع مقایسه شده

است. این مقایسه نشان میدهد که برای ساخت بتنی با مقاومت مشابه پاسخ

نشان داد که در دامنه معرفی شده، الگوریتم فراابتکاری قابلیت یافتن پاسخ بهتری نسبت به گزارش مرجع دارد. در مرحله بعد برای بهینه‌سازی تابع مقاومت-قیمت (۴) و به جهت نشان دادن توانایی بیشتر الگوریتم فراابتکاری و تحقیق در این خصوص که آیا امکان دارد با تغییر دامنه مصالح به پاسخ های بهتری دست یافت، دامنه‌ها و قیمت مصالح به شرح جدول (۹) لحاظ شده و در فرآیند بهینه‌سازی اعمال شدند.

با توجه به اینکه پاسخ حاصله توسط الگوریتم از دامنه تعریفی جدید بهتر از پاسخ یافت شده توسط الگوریتم از دامنه گزارش مرجع بود، لذا بهترین پاسخ از نظر توازن بین مقاومت، قیمت و همچنین اقتصادی ترین طرح مخلوط برای مقاومت‌های مشخصه مختلف با توجه به قیمت مصالح بومی و در دامنه جدید وفق جدول (۹)، محاسبه شد که پاسخ‌های مربوطه به صورت

جدول ۱۰. نسبت های حجمی طرح مخلوط های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

Table 10. Volume ratios of optimal mixture design of meta-heuristic genetic algorithm

مشخصه طرح در الگوریتم	مقاومت فشاری (MPa)	آب (m <sup>3</sup> )	سیمان (m <sup>3</sup> )	میکروسیلیس (m <sup>3</sup> )	فوق روان کننده (m <sup>3</sup> )	درشتدانه (m <sup>3</sup> )	ریزدانه (m <sup>3</sup> )	اسلامپ (mm)	آب سیمانی	قیمت (دلار)
۱	۴۸	۰/۱۵۷۹	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۶۱	۰/۴۳۶۴	۰/۲۱۹۱	۱۱۵	۰/۴۷۰	۱۸/۲۳
۲	۴۹	۰/۱۸۹	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۶۱	۰/۴۱۱	۰/۲۳۸۲	۱۲۷	۰/۴۷۳	۱۸/۲۶
۳	۵۰	۰/۱۸۹۲	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۶۱	۰/۳۹۸۴	۰/۲۵۵۸	۱۴۰	۰/۴۷۳	۱۸/۳
۴	۵۱	۰/۱۸۸	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۶۱	۰/۳۸۲۹	۰/۲۷۲۹	۱۴۵	۰/۴۷۰	۱۸/۳۴
۵	۵۲	۰/۱۸۱	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۶۳	۰/۳۸۱۳	۰/۲۸۱۹	۱۳۱	۰/۴۵۳	۱۸/۴
۶	۵۳	۰/۱۷۲۵	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۶۴	۰/۳۸۲۳	۰/۲۸۹۴	۱۱۳	۰/۴۳۰	۱۸/۴۶
۷	۵۴	۰/۱۶۳۹	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴۷۱	۰/۳۸۷۵	۰/۲۹۲۶	۱۰۰	۰/۴۱۰	۱۸/۵
۸	۵۵	۰/۱۶۱۲	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۵۲	۰/۳۸۹۸	۰/۲۹۲۴	۱۰۰	۰/۴۰۳	۱۸/۵۵
۹	۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۵۵۲	۰/۳۹۷۲	۰/۲۹۰۱	۱۰۱	۰/۳۹۰	۱۸/۵۶
۱۰	۵۷	۰/۱۵۳۴	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	۰/۳۹۹۳	۰/۲۸۹۹	۱۰۰	۰/۳۸۴	۱۸/۶۲
۱۱	۵۸	۰/۱۵۰۷	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶۴۶	۰/۴۰۱۷	۰/۲۸۹۶	۱۰۳	۰/۳۷۷	۱۸/۶۵
۱۲	۵۹	۰/۱۵۰۴	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶۸۸	۰/۴۰۱۵	۰/۲۹۱۸	۱۱۳	۰/۳۷۶	۱۸/۷
۱۳	۶۰	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷۳۵	۰/۴۰۰۸	۰/۲۹۲۷	۱۲۳	۰/۳۷۵	۱۸/۷۲
۱۴	۶۰/۳۵	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷۴	۰/۴۰۰۸	۰/۲۹۳	۱۳۴	۰/۳۷۵	۱۸/۷۳
۱۵	۶۱	۰/۱۵	۰/۱۴۳	۰/۰۱۲۷	۰/۰۰۷۴	۰/۳۹۳۹	۰/۲۹۲۹	۸۶	۰/۳۱۷	۲۰/۸
۱۶	۶۲	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۰۲۱۹	۰/۰۰۷۳۹	۰/۳۷۷۹	۰/۲۹۲۸	۸۰/۵	۰/۲۹۱	۲۴/۷۸

گزارش مرجع، در کشور دیگری و با مصالح خاص آن منطقه ساخته شده بود و مسلما با شرایط موجود در این تحقیق متفاوت هستند. لذا در گام اول چند طرح از طرح مخلوط های مرجع ساخته شدند. از طرف دیگر با توجه به وجود تفاوت کیفیت مصالح دو منطقه، امکان تغییر در میزان حجم مصالح نبود، به این دلیل که جزئیات طرح مخلوط های سیمون رعایت نمی شد و لذا به همین دلیل تصمیم گرفته شد غیر از فوق روان کننده که تاثیر آن بر میزان اسلامپ زیاد بود و از طرفی بر حجم کلی بتن تاثیر گذار نبود، مابقی مصالح همان میزان استفاده شوند تا از نتیجه آزمایش ها، درصدی به عنوان انحراف یا خطای مغایرت جنس مصالح پژوهش مرجع با پژوهش حاضر در نظر

گزارش مرجع، الگوریتم ژنتیک فراابتکاری طرح مخلوطی با ۹/۲ درصد هزینه کمتر پیشنهاد داده و برای ساخت بتنی با هزینه طرح گزارش مرجع، در الگوریتم طرح مخلوطی با ۱۰/۹ درصد مقاومت بیشتر دست یافتنی است.

۳-۲-۴- صحت سنجی نتایج حاصل از الگوریتم

تاکنون همه موارد گفته شده جنبه تئوری داشته و نیاز بود در عمل نیز میزان تحقق طرح ها بررسی گردد، به همین منظور ۴ طرح مخلوط از جدول (۱۵) ساخته شدند تا مقاومت آزمایشگاهی نمونه ها در سن ۲۸ روزه با مقاومت حاصل از خروجی الگوریتم مقایسه گردند. داده های آزمایشگاهی

جدول ۱۱. نسبت‌های وزنی طرح مخلوط‌های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری (kg/m<sup>3</sup>)

Table 11. Weight ratios of the optimal mixture design of meta-heuristic genetic algorithm (kg/m<sup>3</sup>)

شماره طرح الگوریتم	مقاومت فشاری (MPa)	آب	سیمان	میکروسیلیس	فوق‌روان‌کننده	درشتدانه	ریزدانه
۱	۴۸	۱۸۷/۹	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۸۴	۱۱۳۴/۶۴	۵۴۷/۷۵
۲	۴۹	۱۸۹	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۸۴	۱۰۸۲/۱۲	۵۹۵/۵
۳	۵۰	۱۸۹/۲	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۸۴	۱۰۳۵/۸۴	۶۳۹/۵
۴	۵۱	۱۸۸	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۸۴	۹۹۵/۵۴	۶۸۲/۲۵
۵	۵۲	۱۸۱	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۸۴	۹۹۱/۳۸	۷۰۴/۷۵
۶	۵۳	۱۷۲	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۸۴	۹۹۳/۹۸	۷۲۳/۵
۷	۵۴	۱۶۳/۹	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۹۴۵	۱۰۰۷/۵	۷۳۱/۵
۸	۵۵	۱۶۱/۲	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۵/۴۶	۱۰۱۳/۴۸	۷۳۱
۹	۵۶	۱۵۶	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۵/۷۹۶	۱۰۳۲/۷	۷۲۵/۲۵
۱۰	۵۷	۱۵۳/۴	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۶/۳	۱۰۳۸/۱۸	۷۲۴/۲۵
۱۱	۵۸	۱۵۰/۷	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۶/۷۸	۱۰۴۳/۶۲	۷۲۵
۱۲	۵۹	۱۵۰/۴	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۷/۲۲۴	۱۰۴۳/۹	۷۲۹/۵
۱۳	۶۰	۱۵۰	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۷/۷۱۷	۱۰۴۲/۰۸	۷۳۱/۷۵
۱۴	۶۰/۳۵	۱۵۰	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۷/۷۷	۱۰۴۲/۰۸	۷۳۲/۵
۱۵	۶۱	۱۵۰	۴۴۶/۱۶	۲۷/۰۵	۷/۷۷	۱۰۴۲/۱۴	۷۳۲/۲۵
۱۶	۶۲	۱۵۰	۴۶۸	۴۶/۶۴۷	۷/۷۵۹	۹۸۲/۵۴	۷۳۲

جدول ۱۲. مقایسه پاسخ بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری با روش گزارش

Table 12. Comparison of the optimal response of the meta-heuristic genetic algorithm in the reporting method

پاسخ‌ها	بهینه گزارش	بهینه الگوریتم	مقایسه
مقاومت (MPa)	۵۴/۷	۶۰/۳	+۱۰/۲٪
هزینه (\$)	۲۰/۴۲	۱۸/۷۳	-۸/۲٪

جدول ۱۳. مقایسه توانمندی الگوریتم ژنتیک فراابتکاری با روش گزارش

Table 13. Comparison of meta-heuristic genetic algorithm capability in reporting method

توانمندی الگوریتم	هزینه مشابه برای الگوریتم	مقاومت مشابه برای الگوریتم	پاسخ گزارش	پاسخ ها
+۱۰/۹٪	۶۰/۶۹	۵۴/۷	۵۴/۷	مقاومت (MPa)
-۹/۲٪	۲۰/۴۲	۱۸/۵۳	۲۰/۴۲	هزینه (\$)

جدول ۱۴. آزمایش میدانی دو طرح منتخب از داده‌های مرجع

Table 14. Field test of two selected designs from reference data

درصد اختلاف مقاومت فشاری طرح با نمونه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح Str (MPa)	اسلامپ نمونه (mm)	اسلامپ طرح (mm)	ریزدانه (kg)	درشتدانه (kg)	فوق‌روان‌کننده (kg)	میکروسیلیس (kg)	سیمان (kg)	آب (kg)	شماره ساخت	شماره طرح
-۳/۷	۵۸/۵۴	۶۰/۸	۹۰	۹۵	۶۳۴	۱۱۰۰/۸۴	۷/۰۳۵	۳۵/۱۴۵	۴۱۹/۰۱۶	۱۵۶/۶	۲۰	۱۶۳
+۱/۲	۵۵/۹	۵۵/۲	۶۱	۵۷	۶۴۹/۵	۱۰۶۵/۴۸	۷/۷۷	۲۷/۶۹	۴۶۸	۱۶۰	۵	۷۱

۴- نتایج و تحلیل آنها

۴-۱- توانمندی الگوریتم در دست‌یابی به طرح مخلوط‌های بهینه

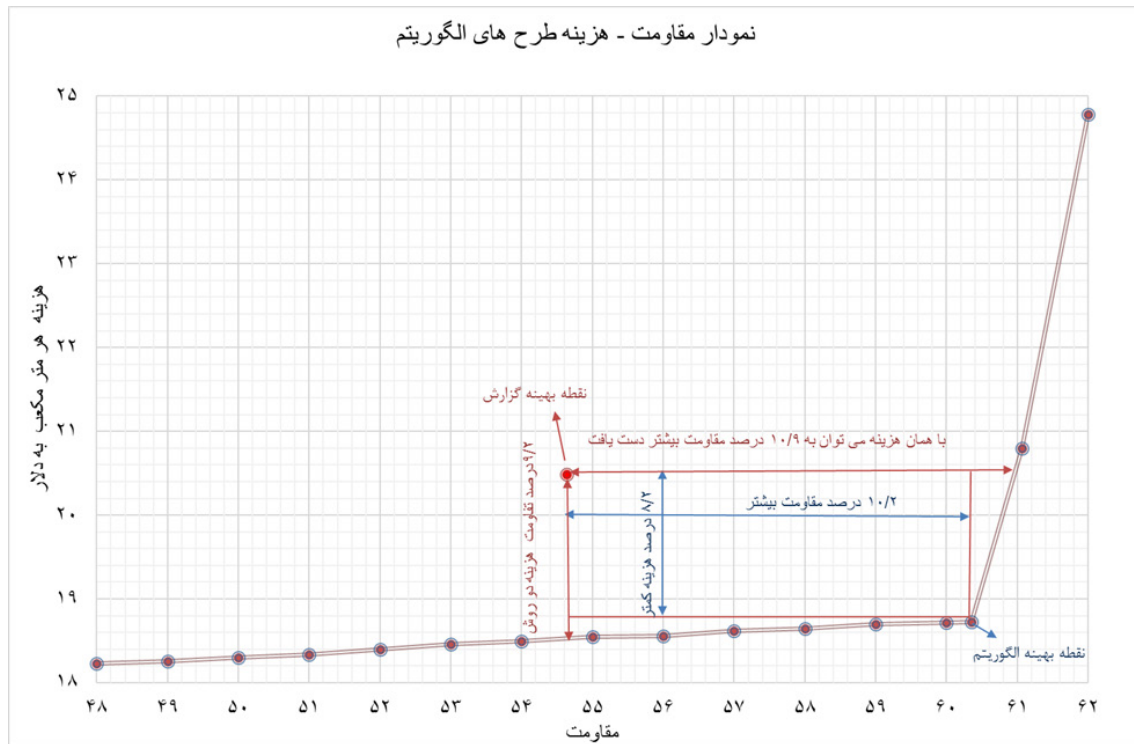
الگوریتم به این دلیل که تابع را با عددگذاری بهینه می‌کند، علاوه بر یافتن بهترین طرح مخلوط ممکن برای داده‌های پایه، توانایی یافتن طرح مخلوط بهینه برای یک مقاومت خاص را نیز دارد، در حالی که در بهینه‌سازی عددی، فقط یک پاسخ به عنوان طرح بهینه داده می‌شود. به عبارت دیگر در الگوریتم، مقاومت هدف می‌تواند جزو داده‌های مساله باشد و طرح مخلوط و قیمت را موازنه نماید.

گرفته شود. پس از انجام چند طرح مخلوط برای یافتن میزان فوق‌روان‌کننده مناسب و به منظور رسیدن به اسلامپ طرح مخلوط مربوطه، نهایتاً دو طرح مخلوط داده شده در جدول (۱۴) برای یافتن میزان تفاوت مصالح دو کشور انجام شدند که این اختلاف جنس مصالح، تفاوتی به مقدار ۲/۵٪ در مقاومت فشاری نسبت به آزمایش‌های مرجع ایجاد می‌کرد. در مرحله بعد ۴ طرح خروجی از الگوریتم و طرح بهینه رگرسیون ساخته شده و میزان اسلامپ و مقدار مقاومت در سن ۲۸ روزه آنها با خروجی‌های الگوریتم و رگرسیون مقایسه شدند که نتایج در جدول (۱۵) داده شده است.

جدول ۱۵. صحت‌سنجی آزمایشگاهی طرح مخلوط‌های خروجی از الگوریتم

Table 15. Experimental validation of the design of mixtures output from the algorithm

ردیف	شماره طرح الگوریتم	آب (kg)	سیمان (kg)	میکروسلیس (kg)	فوق‌روان‌کننده (kg)	درشتدانه (kg)	ریزدانه (kg)	اسلامپ طرح (mm)	اسلامپ نمونه	مقاومت ۲۸ روزه طرح (MPa)	مقاومت ۲۸ روزه نمونه	درصد اختلاف
۱	۱	۱۸۷/۹	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۸۴	۱۱۳۴/۶۴	۵۴۷/۷۵	۱۱۵	۱۲۵	۴۸	۴۶/۵۴	-۳/۰
۲	۵	۱۸۱	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۴/۸۶	۹۹۱/۳۸	۷۰۴/۷۵	۱۳۱	۱۲۷	۵۲	۵۲/۲۴	+۰/۵
۳	۱۰	۱۵۳/۴	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۶/۳	۱۰۳۸/۱۸	۷۲۴/۷۵	۱۰۰	۱۰۵	۵۷	۵۸/۶۵	+۲/۸
۴	۱۴	۱۵۰	۳۷۴/۴	۲۵/۵۶	۷/۷۷	۱۰۴۲/۰۸	۷۳۲/۵	۱۳۴	۱۴۲	۶۰/۳۵	۶۲/۱۲	+۲/۸

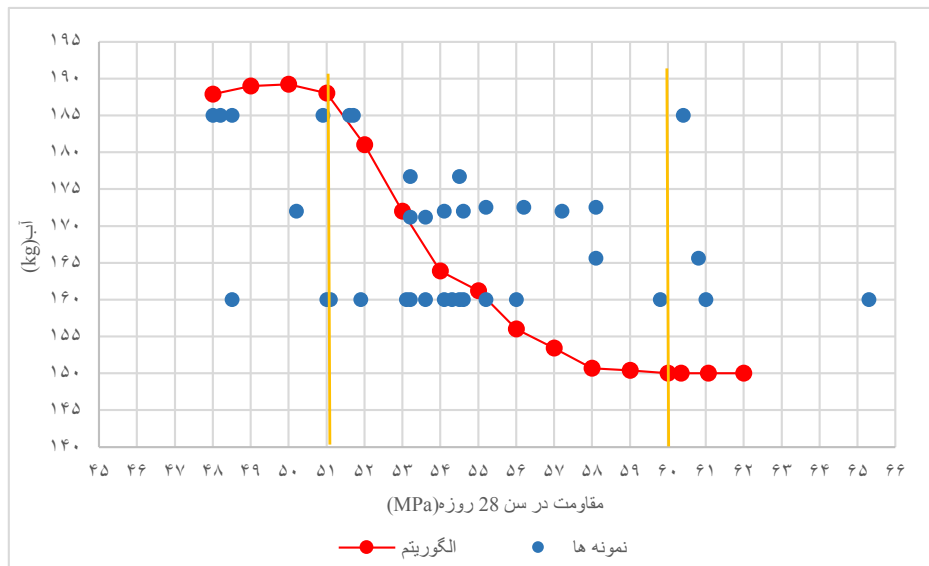


شکل ۴. نمودار مقاومت- هزینه پاسخهای بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

Fig. 4. The cost-strength relationship of concrete in the optimal responses of meta-heuristic genetic algorithm

در شکل (۴) که برگرفته از اطلاعات جدول (۱۰) می‌باشد، خروجی های الگوریتم در نمودار بهینه‌سازی مقاومت- قیمت ترسیم شده است. براساس این شکل، باتوجه به قیمت اعمال شده مصالح، سه شیب متفاوت در نمودار حاصل شد که اولی تا ۵۴ مگاپاسکال و دومی تا نقطه بهینه نمودار یعنی ۶۰/۳ مگاپاسکال و سومی تا آخرین خروجی امکان پذیر با اعمال محدودیت اولیه در نظر گرفته شده برای مصالح یعنی ۶۲ مگاپاسکال است. از ۵۴ تا ۶۰/۳ مگاپاسکال شیب نمودار بسیار ملایم و تغییرات قیمت نسبت به مقاومت کم است.

در شکل (۴) که برگرفته از اطلاعات جدول (۱۰) می‌باشد، خروجی های الگوریتم در نمودار بهینه‌سازی مقاومت- قیمت ترسیم شده است. براساس این شکل، باتوجه به قیمت اعمال شده مصالح، سه شیب متفاوت در نمودار حاصل شد که اولی تا ۵۴ مگاپاسکال و دومی تا نقطه بهینه نمودار یعنی ۶۰/۳ مگاپاسکال و سومی تا آخرین خروجی امکان پذیر با اعمال محدودیت اولیه در نظر گرفته شده برای مصالح یعنی ۶۲ مگاپاسکال است. از ۵۴ تا ۶۰/۳ مگاپاسکال شیب نمودار بسیار ملایم و تغییرات قیمت نسبت به مقاومت کم است.



شکل ۵. نمودار مقاومت- مقدار آب پاسخ‌های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری و داده‌های آزمایشگاهی

Fig. 5. Weight ratios of Simon's laboratory mixture design (Kg/m3) [44]

الگوریتم‌ها براساس انتخاب تصادفی است و الگوریتم یکی از جواب‌های بهینه را پیشنهاد می‌دهد، لذا تغییرات اندک در روند صعودی یا نزولی نمودار انتخاب مصالح قابل انتظار است.

#### ۴-۳-۱- بررسی نحوه انتخاب مقدار آب

میزان آب برای ساخت طرح مخلوط داده‌های پایه، بین ۱۶۰ تا ۱۸۵ و برای الگوریتم فراابتکاری ۱۵۰ تا ۱۹۰ کیلوگرم در هر مترمکعب در نظر گرفته شد. طبق شکل (۵)، انتخاب میزان آب در داده‌های آزمایشگاهی از ترتیب خاصی پیروی نمی‌کند و با رشد مقدار مقاومت گاهی بیشتر و گاهی کم‌ترین حد تعریف شده آن که ۱۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده انتخاب شده است؛ این در حالی است که برای رسیدن به مقاومت بالاتر میزان آب به تدریج باید کم‌تر شود. این کاهش، در نمودار میزان آب طرح مخلوط داده شده با استفاده از الگوریتم کاملاً رعایت شده است. الگوریتم تا مقاومت ۵۱ مگاپاسکال نزدیک به ۱۹۰ کیلوگرم در هر مترمکعب را پیشنهاد داده تا علاوه بر دستیابی به مقاومت هدف، با استفاده بیشتر از مصالح با قیمت کم‌تر، قیمت بتن را کاهش داده باشد و برای مقاومت بالاتر یعنی تا ۶۰ مگاپاسکال، میزان آب را به حداقل تعریف شده در برنامه خود یعنی ۱۵۰ کیلوگرم بر

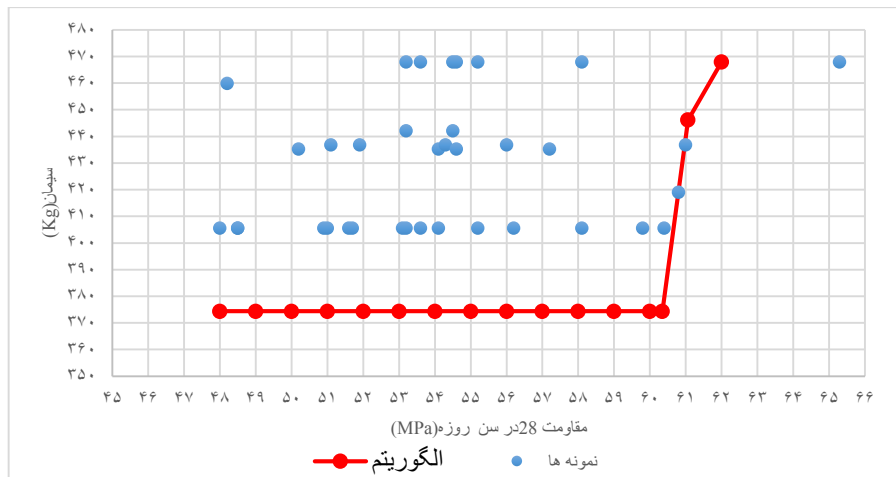
#### ۴-۲- نتایج آزمایشگاهی طرح‌ها

ساخت نمونه‌ها در آزمایشگاه نشان از میانگین تحقق بیش از ۹۷٪ طرح مخلوط‌های منتخب الگوریتم را داشت و برای طرح بهینه گزارش مرجع نیز تقریباً به همین صورت بود، هرچند درصد خطایی نیز به دلیل تغییر شرایط کارگاهی داده‌های گزارش مرجع با شرایط کارگاهی تحقیق حاضر که تقریباً ۲/۴۵٪ به دست آمد، نیز وجود دارد.

#### ۴-۳- تحلیل انتخاب نسبت‌ها در طرح مخلوط بتن با مقاومت بالا

تغییر نسبت مصالح در طرح مخلوط بر خواص مکانیکی بتن تاثیرگذار است. با توجه به اینکه در این تحقیق بهینه‌سازی بین مقاومت و قیمت صورت گرفته است، لذا انتظار می‌رود تا الگوریتم با در نظر گرفتن تابع طرح مخلوط و قیمت مصالح، نسبت به انتخاب اقتصادی مصالح برای دستیابی به مقاومت هدف دقت عمل به‌خرج داده باشد. در این بخش ضمن بررسی تاثیر تغییر نسبت مصالح بر مقاومت سن ۲۸ روزه این نوع بتن برای داده‌های آزمایشگاهی که انتخاب مقدار مصالح در آن تجربی و از نظر ترتیب گسسته بودند، با توجه به پاسخ‌های درج شده در جدول (۱۱)، کارایی الگوریتم ژنتیک فراابتکاری نیز برای انتخاب مصالح بررسی می‌شود. نظر به اینکه فرآیند





شکل ۶. نمودار مقاومت- مقدار سیمان پاسخ های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری و داده‌های آزمایشگاهی

Fig. 6. Coefficients of compressive strength function of meta-heuristic genetic algorithm

مقاومت‌های بالاتر، براساس تابع مقاومت، مقدار سیمان طرح بیش‌تری را انتخاب کرده است و سیر صعودی استفاده از سیمان تقریباً مشابه صیر صعودی منحنی مقاومت- قیمت در شکل (۴) است که یکی از علل آن تغییر ناگهانی نیز همین افزایش مقدار سیمان از  $60/3$  تا  $62$  مگاپاسکال می‌باشد. مقدار سیمان داده‌های آزمایشگاهی در محدوده  $54$  تا  $55$  مگاپاسکال پراکنده بوده درحالی که برای الگوریتم سیر تغییرات یک خط افقی است.

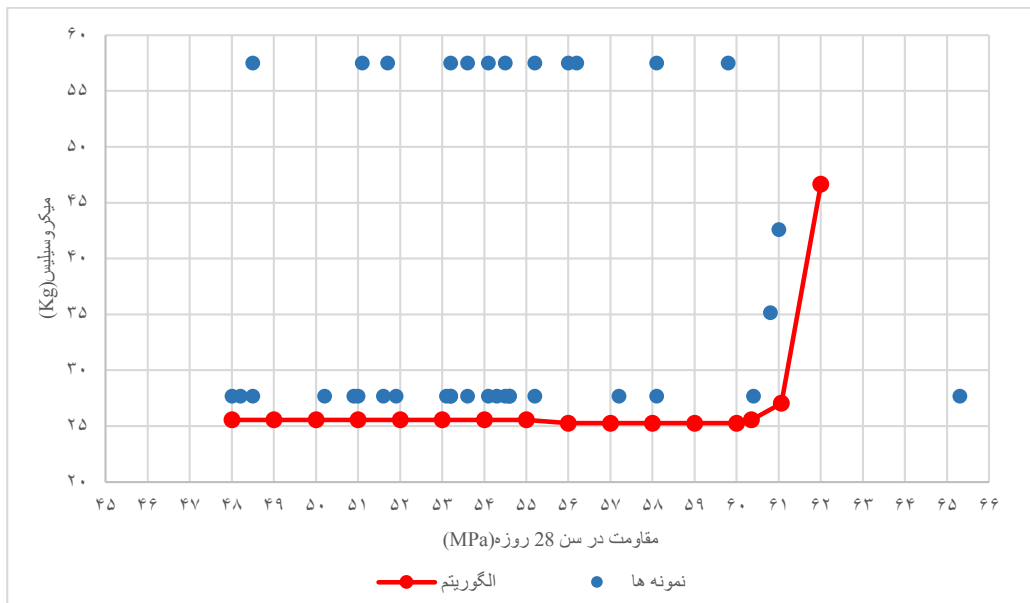
#### ۳-۳-۳- بررسی نحوه انتخاب مقدار میکروسیلیس

میزان میکروسیلیس در نمونه های آزمایشگاهی  $27/69$  تا  $57/51$  و برای الگوریتم  $25/26$  تا  $59/64$  کیلوگرم در مترمکعب انتخاب شده است. با توجه به قیمت بالاتر میکرو سیلیس نسبت به سیمان، در انتخاب میزان آن برای طرح مخلوط باید دقت عمل بیشتری صورت گیرد در حالی که معمولاً در ساخت نمونه های آزمایشگاهی از آنجا که تصمیم گیری برای مقدار آنها در طرح مخلوط تجربی است، این عمل همانگونه که در نمودار (۷) مشخص است اتفاق نمی افتد. برای الگوریتم اما نحوه انتخاب متفاوت است و تا مقاومت  $60/3$  مگاپاسکال میزان میکروسیلیس را در پایین‌ترین حد ممکن نگه داشته و سعی در افزایش مقاومت بر اساس تغییر در مقادیر دیگر مصالح داشته است همانطور که در نمودار مقاومت-قیمت اتفاق افتاده بود. به این ترتیب هم مقدار مقاومت بیش‌تر شده و هم اضافه قیمتی از بابت افزایش

مترمکعب کاهش داده و برای مقاومت بالاتر از آن نیز همین مقدار را حفظ کرده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که تصمیم‌گیری الگوریتم که بر اساس فرایند برنامه‌نویسی و تابع طرح مخلوط است با واقعیت همخوانی داشته و میزان آب طرح مخلوط‌ها را مناسب تشخیص داده است، درحالی که برای انتخاب‌های آزمایشگاهی این منطق رعایت نشده است. به‌عنوان مثال برای داده‌های آزمایشگاهی در محدوده  $54$  تا  $55$  مگاپاسکال  $7$  طرح مخلوط با وزن‌های متفاوت برای آب در نمودار دیده می‌شود که بعضی دارای تفاوت زیادی هستند، درحالی که برای نمودار الگوریتم به‌صورت یک خط کاهشی نمایش داده شده است.

#### ۳-۳-۲- بررسی نحوه انتخاب مقدار سیمان

مقدار سیمان طرح مخلوط‌های آزمایشگاهی بین  $405/6$  تا  $468$  و برای الگوریتم از  $374/5$  تا  $499/2$  کیلوگرم در مترمکعب انتخاب شده است. در ساخت نمونه‌های مرجع نسبت‌ها متفاوت بوده و روند قابل بحث و بررسی را طی نکرده است. مطابق شکل (۶) در الگوریتم با توجه به اینکه سیمان یکی از مصالح گران‌بتن است، برای مقاومت  $48$  تا  $60/3$  مگاپاسکال، پایین‌ترین حد ممکن یعنی  $374/5$  کیلوگرم در مترمکعب را انتخاب نموده است؛ این موضوع نشان می‌دهد که بر اساس روش کار الگوریتم، می‌توان با مقدار کمتری سیمان به مقاومت‌های مورد نظر رسید. در ادامه الگوریتم برای



شکل ۷. نمودار مقاومت- مقدار میکروسیلیس پاسخ های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری و داده های آزمایشگاهی

Fig. 7. The relationship between the amount of microsilica and the strength of concrete in the optimal responses of meta-heuristic genetic algorithm and laboratory data

کاهش میزان آب اختلاط، سیر نزولی تقریباً یکنواختی پیدا می کند و این تغییرات تا ۶۲ مگاپاسکال که میزان سیمان و میکروسیلیس بیشتر می شود، شدت بیش تری می گیرد. به عنوان مثال در مقطع ۵۴ تا ۵۵ مگاپاسکال نسبت آب به مواد سیمانی تقریباً در سه سطح پراکنده هستند در حالیکه برای الگوریتم بصورت یک خط نزولی نمایش داده شده است.

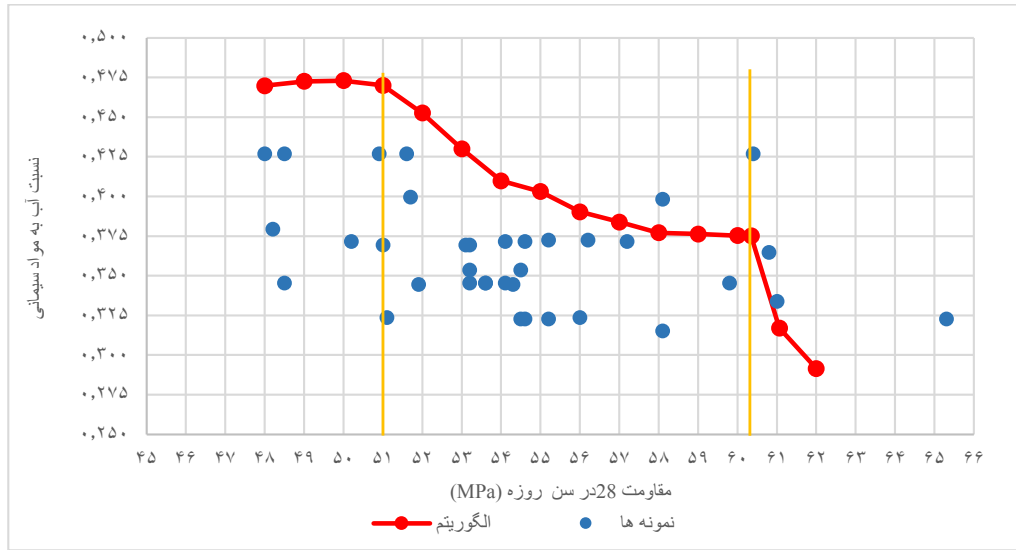
#### ۴-۳-۵- بررسی نحوه انتخاب میزان فوق روان کننده

دامنه انتخاب میزان فوق روان کننده برای هر دو روش ۴/۸۳ تا ۷/۷۷ انتخاب شد، اما از آنجا که محدودیت اسلامپ حداقل ۸۰ میلی متر برای الگوریتم تعیین شده و نسبت آب به مواد سیمانی نیز عامل دیگری بود تا به جای آب از فوق روان کننده استفاده شود، همانگونه که در شکل (۹) نمایان است، الگوریتم برای مقاومت های پایین تر، کمترین میزان روان کننده در مترمکعب را پیشنهاد داده است و تا مقاومت ۵۴ مگاپاسکال این مقدار تقریباً ثابت است اما سیر تغییرات آن منظم بوده و از آن رده به بعد، سیر صعودی را طی می کند تا در ۶۰/۳ مگاپاسکال به سقف انتخاب یعنی ۷/۷۷ کیلوگرم در متر مکعب برسد و پس از آن نیز تقریباً همین مقدار را انتخاب نمود. در ساخت نمونه های آزمایشگاهی نظمی مشخص نیست. مثال واضح

مقدار میکروسیلیس به طرح اضافه نشده است.

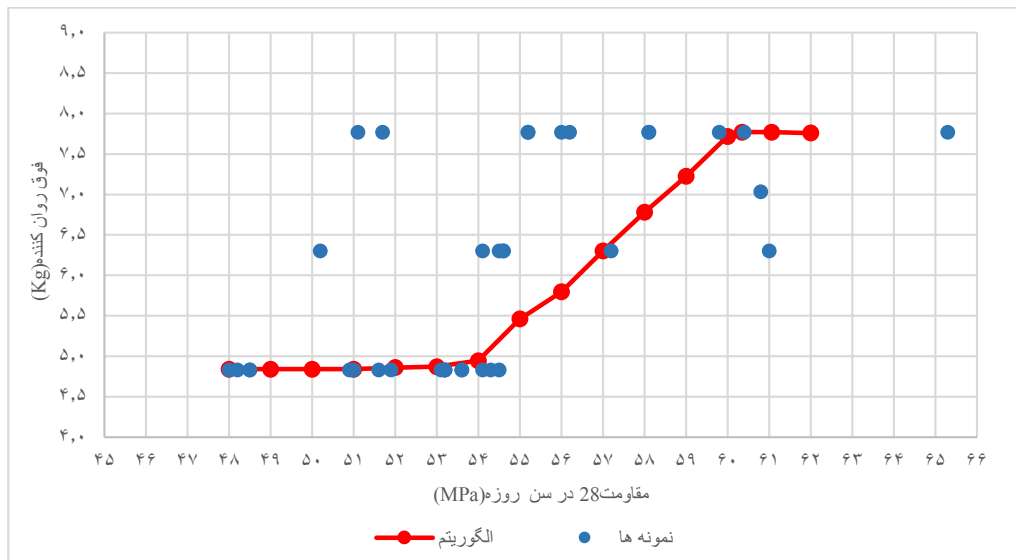
#### ۴-۳-۴- بررسی نسبت آب به مواد سیمانی

معمولاً در استانداردهای طرح مخلوط، طراحی را از نسبت آب به سیمان شروع کرده و سپس مقدار آب و سیمان را تعیین می کنند. مطابق شکل (۸) در داده های پایه، نظمی در نسبت آب به مواد سیمانی با مقاومت مشهود نیست و مشخص است که طراحی نمونه ها نیز براساس این نسبت نبوده است. در برنامه اجرایی الگوریتم نیز انتخاب مقدار مصالح براساس نسبت مذکور نبوده اما این نسبت به عنوان یک محدودیت در فرآیند تصمیم گیری دخالت داشته به این ترتیب که از نظر الگوریتم طرح مخلوط های با نسبت زیر ۰/۲۷ مورد قبول نبوده و آنها را تغییر داده است. نکته جالب تر اینکه در بهینه سازی الگوریتم، آب، سیمان و میکروسیلیس در طرح بررسی و انتخاب شده اما با توجه به نظم حاکم بر انتخاب مقدار این سه ماده، سیر تغییرات نسبت آب به مواد سیمانی نیز منظم و با تحقیقات پژوهشگران که کاهش میزان این نسبت را برای افزایش مقاومت ضروری می دانند منطبق است. در پاسخ های الگوریتم تا مقاومت ۵۱ مگاپاسکال تقریباً این نسبت به دلیل ثبات تقریبی سه مصالح فوق ثابت و بعد از آن تا مقاومت ۶۰/۳ مگاپاسکال به دلیل



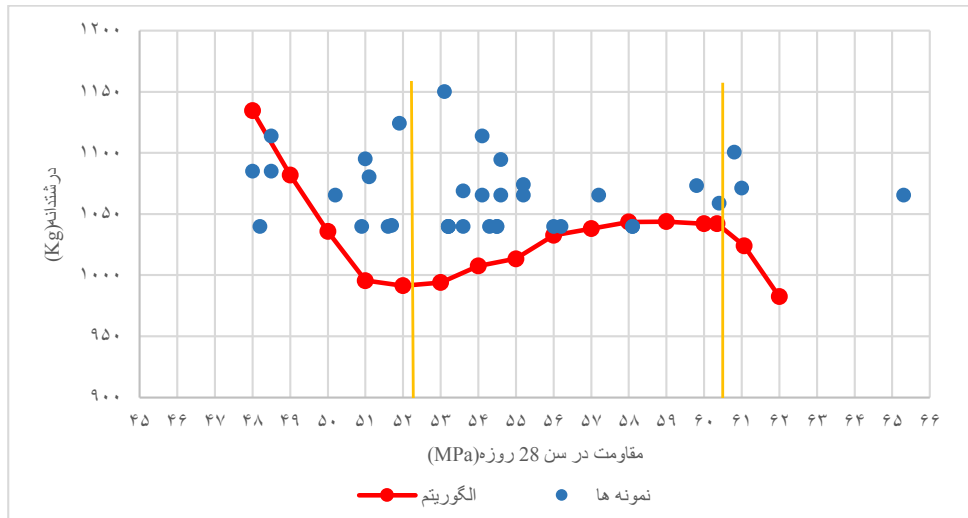
شکل ۸. نمودار نسبت آب به مواد سیمانی- مقاومت پاسخ های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری و داده های آزمایشگاهی

Fig. 8. The relationship between the ratio of water to cement materials and the strength of concrete in the optimal responses of meta-heuristic genetic algorithm and experimental data



شکل ۹. نمودار مقاومت- مقدار فوق روان کننده پاسخ های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری و داده های آزمایشگاهی

Fig. 9. The relationship between the amount of superplasticizer and the strength of concrete in the optimal responses of meta-heuristic genetic algorithm and laboratory data



شکل ۱۰. نمودار مقاومت- مقدار درشت‌دانه پاسخ های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری و داده‌های آزمایشگاهی

Fig. 10. The relationship between the amount of coarse aggregates and the strength of concrete in the optimal responses of meta-heuristic genetic algorithm and laboratory data

مابقی کاهش در درشت‌دانه، سیمان و میکروسیلیس اضافه کرده است. شکل (۱۳) مقدار سنگدانه در طرح مخلوط‌های الگوریتم را نشان می‌دهد که تغییرات کلی سنگدانه‌ها تا ۵۱ مگاپاسکال جزئی و قابل اغماض است، ولی از ۵۱ تا ۶۰/۳ مگاپاسکال میزان سنگدانه طرح مخلوط‌ها افزایش یافته است. رفتار درشت‌دانه در شکل (۱۳)، برعکس رفتار آب در شکل (۵) به ازای تغییر مقاومت است؛ به عبارت دیگر الگوریتم به‌طور کلی برای افزایش مقاومت فشاری، از مقدار آب طرح‌ها کم و به جای آن سنگدانه را اضافه کرده است.

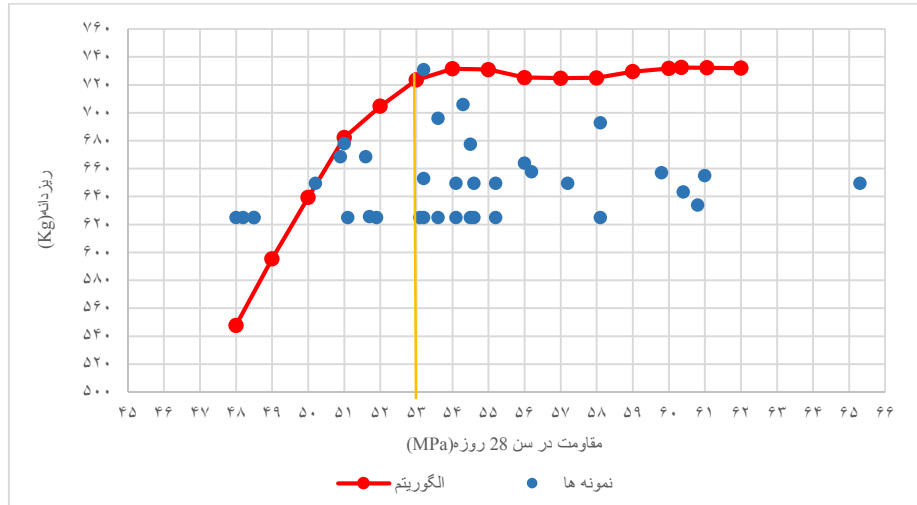
#### ۵- نتایج

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی اولیه از مصالح بتن با مقاومت بالا و با توجه به اینکه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری مقدار مصالح را برای رسیدن به مقاومت هدف، بر اساس تابع طرح مخلوط انتخاب می‌کند و آن را همواره به عنوان ورودی عددی یک تابع در نظر می‌گیرد، می‌توان گفت که، این الگوریتم توانمندی بالایی در بهینه‌سازی طرح مخلوط بتن با مقاومت بالا با لحاظ قیمت مصالح دارد. به این ترتیب می‌توان برای یک رده مقاومت، طرح مخلوط خاص همان رده را داشت، با این مزیت که قیمت مصالح در

آن در محدوده ۵۴ تا ۵۵ مگاپاسکال است که دو سطح فوق روان‌کننده در داده‌های آزمایشگاهی به کار رفته و در الگوریتم یک خط صعودی نمایانگر انتخاب است.

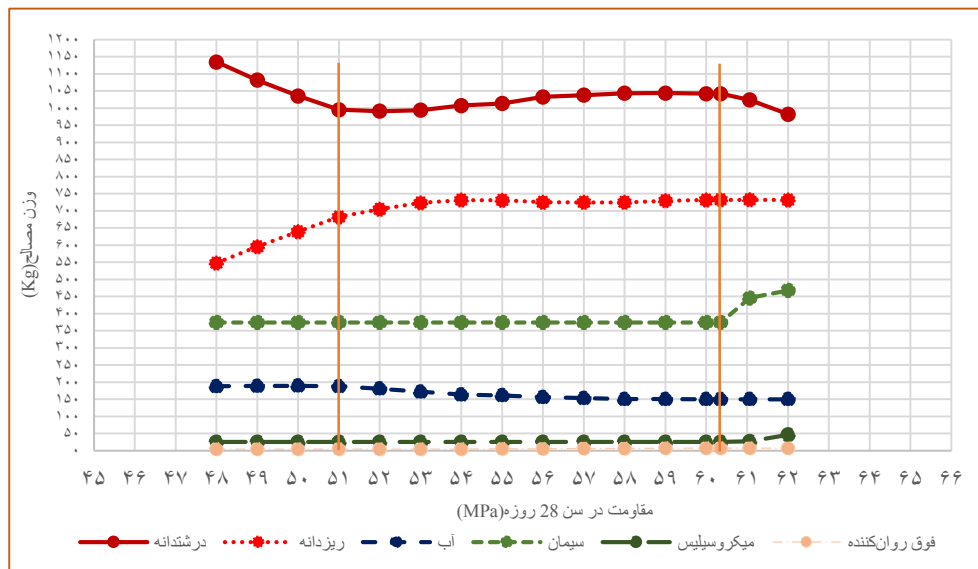
#### ۴-۳-۶- بررسی نحوه تاثیر انتخاب میزان سنگدانه‌ها

با توجه به اینکه بعد از آب ارزان‌ترین مصالح سنگدانه است، لذا الگوریتم در انتخاب میزان سنگدانه به حدود تعریف شده نزدیک شده اما به آن‌ها نرسیده است. به عبارتی مصالح دیگر تعیین‌کننده بوده و در مرحله بعد بین ریزدانه و درشت‌دانه انتخاب صورت گرفته است. مطابق شکل‌های (۱۰-۱۲) الگوریتم برای افزایش مقاومت تا ۵۲ مگاپاسکال مقدار درشت‌دانه کاهش داده و میزان ریزدانه تا ۵۳ مگاپاسکال افزایش یافته تا صرفاً با تغییر در اندازه سنگدانه بتوان مقاومت را افزایش داد. بعد از آن تا مقاومت ۶۰/۳ مگاپاسکال، الگوریتم برای تامین مقاومت مورد نظر مقدار آب طرح مخلوط را کاهش و مقدار درشت‌دانه را افزایش داده است. در همین مقطع تغییرات ریزدانه کاهش‌ی ولی با مقدار کم است و کاهش اندک آن را می‌توان بر اساس تابع مقاومت، افزایش میزان فوق روان‌کننده دانست. در مقاومت بالاتر الگوریتم مجدداً میزان درشت‌دانه را کاهش و ریزدانه را کمی افزایش داده و به جای



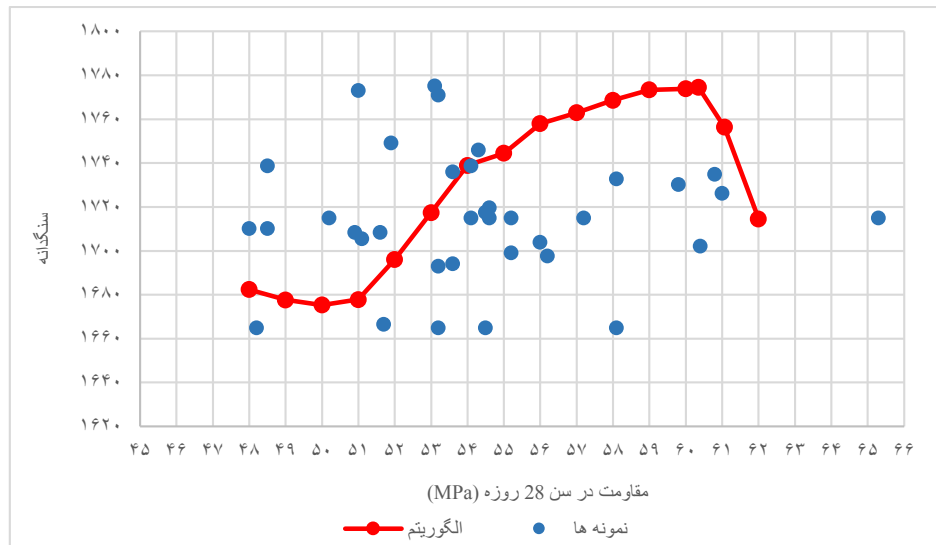
شکل ۱۱. نمودار مقاومت- مقدار ریزدانه پاسخ های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری و داده‌های آزمایشگاهی

Fig. 11. The relationship between the amount of fine aggregates and the strength of concrete in the optimal responses of meta-heuristic genetic algorithm and laboratory data



شکل ۱۲. نمودار مقاومت- جزئیات طرح مخلوط پاسخ های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری

Fig. 12. The relationship between the details of the mix design and concrete strength in the optimal responses of the meta-heuristic genetic algorithm



شکل ۱۳. نمودار مقاومت- مقدار سنگدانه پاسخ های بهینه الگوریتم ژنتیک فراابتکاری و داده های آزمایشگاهی

Fig. 13. The relationship between the amount of aggregates and the strength of concrete in the optimal responses of meta-heuristic genetic algorithm and laboratory data

۲- برای دست یابی به مقاومت بالاتر، الگوریتم ژنتیک کاستن از مقدار آب را بهترین روش دانسته است، پس برای افزایش مقاومت از ۵۱ تا ۶۰/۳ مگاپاسکال که نقطه بهینه مقاومت- هزینه برای این نوع مصالح است، مقدار آب طرح مخلوط را کم کرده است تا با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، مقاومت افزایش یابد و به جای آن از سنگدانه درشت که ارزان ترین مصالح بعد از آب است، استفاده نموده و از این طریق مقاومت سنگدانه نیز به طرح کمک می کند.

۳- برای رسیدن به مقاومت بالاتر از ۶۰/۳ مگاپاسکال، افزایش مقدار سیمان و میکروسیلیس الزامی است و الگوریتم با تغییر در این مقادیر با اولویت افزایش سیمان به دلیل ارزان تر بودن نسبت به میکروسیلیس اقدام کرده و برای رعایت حد نصاب حجم طرح مخلوط، از مقدار درشت دانه که در مرحله قبل نقش پرکننده داشت، کاسته است.

۴- از مقطعی که مقدار آب طرح مخلوط کم شده است، فوق روان کننده به عنوان یک افزودنی برای حفظ روانی بتن اضافه شده و برای مقطعی که مقدار سیمان و میکروسیلیس اضافه شده، الگوریتم مقدار فوق روان کننده را نیز بیش تر نموده است.

آن بهینه شده باشد. برای این کار، الگوریتم ابتدا سعی کرده تا با تغییر در مقدار مصالح ارزان تر هدف را تامین کرده و در مراحل بعد مقدار مصالح گران تر را افزایش داده است. بهترین نقطه از نظر داشتن بیش ترین مقاومت ممکن و هزینه اقتصادی بهینه، برای داده های آزمایشگاهی مقاومت ۶۰/۳ مگاپاسکال با هزینه ۱۸/۷۳ دلار و با اسلامپ ۱۳۴ میلی متر بدست آمد. این طرح در مقایسه با طرح بهینه معرفی شده در گزارش مرجع با مقاومت ۵۴/۷ مگاپاسکال، دارای ۱۰/۲ درصد مقاوت بالاتر و هزینه ای به میزان ۸/۲ درصد پایین تر بود. از آنجا که ساخت چند طرح مخلوط پیشنهادی الگوریتم با تقریب بالای ۹۷٪ محقق شد، پس می توان طرح های الگوریتم را اجرایی دانست و برای افزایش مقاومت بتن با در دست داشتن یک نوع مصالح ثابت، به جای سعی و خطا به ترتیب روند زیر را اجراء نمود تا هم هدف حاصل شود و هم اینکه هدف با کمترین هزینه به دست آمده باشد.

۱- الگوریتم برای افزایش مقاومت در رده های پایین، جایگزینی درشت دانه با ریزدانه را انجام داده لذا تا رده مقاومت ۵۱ مگاپاسکال، صرفا تغییر در اندازه سنگدانه ها از درشت دانه به ریزدانه را پیشنهاد داده است به این معنی که با هزینه کمی می توان مقاومت را افزایش داد.

- Abrasion Strength of the Nano Silica Concretes, World Applied Sciences Journal, 17(4)(2012) 540-545.
- [12] A. Behnood, H. Ziari, Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures, Cement & Concrete Composites. 30 (2008) 106–112.
- [13] M. Mazloom, A.A. Ramezani pour, J.J. Brooks, Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete, Cement & Concrete Composites, 26(4) (2004) 347–357.
- [14] M.A. Safn, Compressive Sterength of Portland cement pastesand mortar containing CU-ZN nano-frite, International Journal of Nano Dimention,3(2) (2012) 91-100.
- [15] P.N. Balaguru, Nanotechnology and concrete, Opportunities and challenges proceeding of the international conference- application of technology in concrete design. Scotland. UK, (2005) 113-122
- [16] M.J. Shanang, High strength concrete containing natural Pozzolan and Silica Fume, Cement & Concrete Composites, 22(6) (2000) 399-406.
- [17] M. Amin, K. Abu el-hassan, Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of high strength concrete, Construction and Building Material, 80(1) (2015) 116-124.
- [18] R. Kishore, V. Bhikshma, P.J. Prakash, Study on Strength Characteristics of High Strength Rice Husk Ash Concrete, The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. 14 (2011) 2666–2672.
- [19] R. Rathan Raja, E.B. Perumal Pillaib, A.R. Santhakumar, Evaluation and mix design for ternary blended high strength concrete, Chemical, Civil and Mechanical Engineering Tracks of 3rd Nirma University International Conference. (NUiCONE 2012). 51 (2013) 65 – 74.
- [20] V. Cernya, M. Kocianovaa, R. Drochytkaa, Possibilities of lightweight high strength concrete production from sintered fly ash aggregate, 18th International Conference on Rehabilitation and Reconstruction of Buildings.
- [1] S.H. Ahmad, S.P. Shah, High Performance Concrete and Application, Mcgraw-Hill (TX), (1994).
- [2] FIP/CEB, High strength concrete, State of the art report, Bulletin d’information, 197 (1990).
- [3] S. Mindes, J. F. Young, Concrete Prentice Hall Inc. Englwood Cliffs, New Jersey USA, 530 (1981).
- [4] T. V. N Narques, R. C. Carvalho, A. Christoforo, F. J. R. Mascarenhas, F.N. Arroyo, F. C. Bomfim Junior, H. Fd. Santos, Use of Real Coded Genetic Algorithm as a Pre-Dimensioning Tool for Prestressed Concrete Beams, Buildings,13(2023), <https://doi.org/10.3390/buildings13030819>.
- [5] S. Han, L. Xiao, An improved adaptive genetic algorithm. SHS Web of Conferences 140, (2022), <https://doi.org/10.1051/shsconf/202214001044>
- [6] A.A. Shirzadi Javid, H. Naseri, M.A. Eatbari Ghasebeh, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 45(2021)913–927, <https://link.springer.com/article/10.1007/s40996-020-00352-6>.
- [7] P. Kondapally, A. Chepuri, V.P. Elluri, B. S. K. Reddy, Optimization of concrete mix design using genetic algorithms, Earth and Environmental Science, (2022) Doi:10.1088/1755-1315/1086/1/012061
- [8] R. K. Tipu, V. R. Panchal, K. S. Pandya, Multi-objective optimized high-strength concrete mix design using a hybrid machine learning and metaheuristic algorithm, Asian Journal of Civil Engineering volume 24 (2023) 849–867.
- [9] K.R. Wu, B. Chen, W. Yao, D. Zhang, Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete, Cement and Concrete Research, 31(10) (2001) 1421–1425.
- [10] K.S. AL-Jabri, A.H. AL-Saidy, R. Taha, A.J. AL-Kemyany, Effect of using Wastewater on the Properties of High Strength Concrete, Procedia Engineering, 14 (2011) 370–376.
- [11] A. Shamsai, K. Rahmani, S. Peroti, L. Rahemi, the Effect of Water-Cement Ratio in Compressive and

- [30] F. Rosenblatt, 1957. The Perceptron a perceiving and recognizing automaton, Cornell Aeronautical Laboratory. Report 85-460-1.
- [31] J.H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (1975).
- [32] M. Dorigo, *Optimization Learning and natural algorithms*. PhD Thesis, Dip Electronica information, Politecnico di Milan. Italy. (1992).
- [33] J. Kennedy, R. Eberhart, A New Optimizer Using Particle Swarm Theory, In the Sixth International Symposium on Micro-Machine and Human Sciences. (1992) 43-39.
- [34] E. Atashpaz-Gargari, C. Lucas, Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, IEEE Congress on Evolutionary Computation. (2007) 4661-4667.
- [35] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecchi, Optimization by Simulated Annealing, American Association for the Advancement of Science, 220(4598) (1983) 671-680.
- [36] K. Von Frisch, *The Dance Language and Orientation of Bees*, Harvard University Press Cambridge. MA US: Harvard University Press. (1967).
- [37] H. Shah-Hosseini, Problem solving by intelligent water drops, Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. (2009) 3226-3231.
- [38] S.Hr. Aghay Kaboli, J. Selvaraj, N.A. Rahim, Rain-fall optimization algorithm: a population-based algorithm for solving constrained optimization problems, Journal of Computational Science, 19 (2017)31-42.
- [39] F. Sajedi F, H. Abdul-Razak, Relationship between 7- and 28-days CS for HSC by use of ANN and regression methods, Asian Journal of Civil Engineering (AJCE), Iran. 11(2) (2010) 207-218.
- [40] A. Guerra, P.D. Kiouisis, Design optimization of reinforced concrete structures, Computers and Concrete, 3(5) (2006) 313-334.
- [41] P. Chopra, R. Kumar Sharma, M. Kumar, Prediction of Compressive Strength of Concrete Using Artificial Neural Network and Genetic Programming. Hindawi Publishing Corporation, (2016), Article ID 7648467, 10 (CRRB2016). 195 (2017) 9 – 16.
- [21] J.M. Khatib, P.S. Mangat, Influence of superplasticizer and curing on porosity and pore structure of cement paste. Cement & Concrete Composites. 21 (1999) 431-437.
- [22] B. Łazniewska-Piekarczyk, J. Szwabowski, Influence of the Type of Anti-Foaming Admixture and Superplasticizer on the Properties of Self-Compacting Mortar and Concrete, Journal of Civil Engineering And Management, 18(3) (2012) 408–415.
- [23] S. Alsadey, Influence of Superplasticizer on Strength of Concrete, International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET), 1(3) (2012).
- [24] A.M. Mansor, R. P. Borg, A. M. M. Hamed, M. M. Gadeem, M. M. Saeed, The effects of water-cement ratio and chemical admixtures on the workability of concrete, Materials Science and Engineering. 442 (2018) 012017 doi:10.1088/1757-899X/442/1/012017
- [25] T. Ozturan, C. Cecen, Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths, Cement and Concrete Research, 27(2) (1997) 165–170.
- [26] P.C. Aitein, P.K. Mehta, Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high strength concrete. ACI Material journal, American Concrete Institute Ditroit. 87(2) (1990) 03–107.
- [27] H. Beshr, A.A. Almusallam, M. Maslehuddin, Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete, Construction and Building Materials. 17(2) (2003) 97–103.
- [28] A. Kılıc, C.D. Atis, A. Teymen, O. Karahan, F. O`zcan, C. Bilim, M. O`zdemir, The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete, Cement & Concrete Composites, 30(4) (2008) 290–296.
- [29] M. Masihi, N. Shahsavaripour, A.K. Abbasi, Optimization of the Multi-Mode Resource Constrained Time –Cost Trade off Project Scheduling Problem by using Modified Genetic Algorithm. MD thesis, Ahwaz Islamic Azad University. Chapter2. (2012). (In Persian).



- of Operating Rules and Rule Curves for Multi reservoir Systems Using a Self-Adaptive Simulation-GA Model, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(10) (2016) 1943-5452.
- [44] M.J. Simon, 2003. Concrete Mixture Optimization Using Statistical Methods, Final Report. FHWA-RD-03-060, Grant No. DTFH61-97-Y-30033.
- pages.
- [42] M. Masihi, N. Shahsavari Pour, H. Daneshvar, M. Veissii, Optimization of the Multi-Mode Resource – Constrained Time –Cost Trade off Project Scheduling Problem by using Modified Genetic Algorithm, *Indian Journal of Natural Sciences*. 5(30) (2015) 6798-6811.
- [43] A. Hghighi A. Ahmadi-Najl, Simultaneous Optimization

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Masihi, S. F. Sajedi, A. Dalvand, Optimization High-strength concrete mixing design using meta-heuristic genetic algorithm, Amirkabir J. Civil Eng., 56(4) (2024) 407-440.*

DOI: [10.22060/ceej.2024.20494.7440](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.20494.7440)



