

Zintegrowane podejście do wyboru optymalnej serii zapraw tynkarskich do izolacji

An integrated approach in selecting the optimal insulation plaster mortar series

Abdullah Demir

Department of Civil Engineering, Kutahya Dumlupinar University, 43100, Kutahya, Turkey

e-mail: abdullah.demir@dpu.edu.tr

Streszczenie

W niniejszym artykule zaproponowano metodę Taguchiego do rozwiązania hierarchicznej analizy problemu decyzyjnego [Analytic Hierarchy Process – AHP] oraz metodę Simple Additive Weighting [SAW] w celu znalezienia optymalnej serii zapraw tynkarskich do izolacji, w oparciu o wiele kryteriów. Najpierw zastosowano metodę Taguchi w celu określenia planu eksperymentu z czynnikami: cementem, wapnem, dolomitem i perlitem na trzech poziomach dozowania, dla każdego z nich z ortogonalnym planem L9. Następnie, zgodnie z projektem, przeprowadzono eksperymenty metodą ultradźwiękową, określono wytrzymałość na ściskanie, przyczepność, nasiąkliwość kapilarną i przewodność cieplną. Wagi ważności kryteriów uzyskano metodą AHP, a punktację poszczególnych serii obliczono metodą SAW. Na podstawie wyników uzyskano optymalne poziomy czynniki i otrzymano optymalne składniki.

Słowa kluczowe: Seria tynków izolacyjnych; optymalizacja; wielokryterialne podejmowanie decyzji; Taguchi; AHP; SAW

Summary

In this study, an integrated approach by Taguchi, Analytic Hierarchy Process [AHP] and Simple Additive Weighting [SAW] method was proposed to find out the optimal insulation plaster mortar series, based on multiple criteria. Firstly, Taguchi method was applied to define the experimental design plan, with the factors of cement, lime, dolomite and perlite in three levels for each with L9 orthogonal design. Then, ultrasonic pulse velocity, compressive strength, bond strength, capillarity water absorption and thermal conductivity experiments, were made according to the design. The importance weights of criteria were obtained by AHP and the scores of the series were calculated by SAW method. The factors' optimum levels were obtained based on the scores and the optimal series was proposed.

Keywords: insulation plaster mortar series, multi-criteria decision making, Taguchi, AHP, SAW

1. Wprowadzenie

W dzisiejszych czasach bardzo ważna jest oszczędność energii, aby w sposób najbardziej ekonomiczny uzyskać maksymalną wydajność. Jest to kwestia, na którą należy zwrócić uwagę ze względu na ograniczone zasoby. W tym celu w każdym sektorze należy przeprowadzić badania nad oszczędzaniem energii. Poza kwestią energii, aby dostosować się do istniejących warunków otoczenia i przetrwać w konkurencyjnym środowisku, konieczne są badania nad udoskonaleniem systemów każdego sektora. Ulepszenia należy wprowadzać zarówno w produktach, jak i w badaniach doskonalących, prowadzonych w poszczególnych produktach. W celu ulepszenia wytwarzanych produktów, należy

1. Introduction

Today, it is very important to conserve the existing energy, without consuming more energy to obtain the maximum efficiency from scarce resources economically. This is an issue that needs to be paid attention, due to the limited resources. For this purpose, studies on energy conservation should be done in every sector. Besides the energy issue, to adapt to existing environment conditions and survive in a competitive environment, improvement studies are required in the systems of each sector. Improvements should be made on the products and the improvement studies, carried out in the system. To improve on the basis of the criteria determined on the products, the different conditions of the effective criteria

przeanalizować różne kryteria ich wytwarzania i wybierać te, które są najlepsze dla uzyskania założonego celu. Za pomocą statystycznie zaprojektowanych doświadczeń można zbadać wpływ wielu czynników na właściwości produktu i ich wzajemne interakcje.

W celu zdefiniowania warunków, w których można uzyskać najlepsze wyniki, najpierw określa się cechę użytkową i bada czynniki wpływające na nią. Następnie przeprowadza się doświadczenia z uwzględnieniem czynników niekontrolowanych, aby określić wpływ tych czynników na cechę decydującą o właściwościach użytkowych i znaleźć najbardziej odpowiednią kombinację. Najbardziej odpowiednie warunki są określane przez ocenę wskaźnika właściwości użytkowych, uzyskanego w wyniku doświadczeń.

Celem tego badania było zoptymalizowanie czynników wpływających na izolacyjną zaprawę tynkarską. Wraz z rozwojem technologii do izolacji stosuje się lekkie, ekonomiczne i wytrzymałe materiały. Ich właściwości są ważne, aby przygotować materiały efektywne pod względem różnych kryteriów, takich jak wytrzymałość, koszty i oszczędność energii. Dlatego też niniejsza praca jest ważna, aby nakreślić systematyczny sposób określania składu tynku izolacyjnego o najlepszych właściwościach, dla zdefiniowanego wielokryterialnego problemu decyzyjnego.

Najpierw zastosowano metodę Taguchi w celu określenia planu eksperymentu z czynnikami: cementem, wapnem, dolomitem i perlitem, na trzech poziomach zawartości dla każdego z nich. W badaniu zastosowano plan doświadczalny L9. Następnie przeprowadzono kilka doświadczeń w oparciu o zdefiniowane czynniki, wraz z ich poziomami. Były to: prędkość przejścia fali ultradźwiękowej przez materiał, wytrzymałość na ściskanie, przyczepność, nasiąkliwość kapilarna i przewodność cieplna. Na tym etapie problem ten stał się wielokryterialnym problemem decyzyjnym, z powodu wielu kryteriów wyjściowych. Założeniem było określenie optymalnej serii na podstawie wielu danych wyjściowych. Ponadto, kryteria wyjściowe mają różne znaczenie dla zaprawy tynkarskiej do izolacji. Dlatego do uzyskania wag kryteriów wykorzystano metodę AHP [Analytic Hierarchy Process], która jest jedną z metod wielokryterialnych. Po uzyskaniu wag, seria została oceniona za pomocą metody SAW [Simple Additive Weighting]. Zgodnie z wynikami, zaproponowano optymalne poziomy czynników, w oparciu o wielorakie kryteria wyjściowe.

Projektowanie doświadczeń i metoda Taguchi to metody przeprowadzania eksperymentów zgodnie z jej matrycą, poprzez zmianę zmiennych systemowych, które mogą mieć wpływ na proces. W literaturze można znaleźć różne obszary zastosowań. Niektóre z ostatnich badań przedstawiają się następująco.

Onoue i in. (1) wykorzystali metodę Taguchi do doświadczalnego zbadania właściwości amortyzacyjnych lekkiego betonu, z wykorzystaniem kruszywa z pumeksu wulkanicznego i jego zastosowania jako materiału buforowego. Tanyıldızı i Şahin (2) zastosowali metodę Taguchi do optymalizacji betonu zbrojonego polimerami, pod wpływem wysokiej temperatury. Hadi i in. (3) Autorzy zastosowali metodę Taguchi do zaprojektowania optymalnych proporcji mieszanki betonu geopolimerowego, z

should be analysed and the best conditions for the purpose, should be preferred. It is possible to examine the effects of many factors on product parameters and their interactions with each other, by statistically designed experiments.

In order to reveal the conditions in which the best results can be obtained, the performance feature is first determined and the factors affecting this feature are examined. Then, experiments are carried out considering the uncontrollable factors, in order to determine the effects of these factors on the performance-determining feature and to find the most appropriate combination. The most appropriate conditions are determined by evaluating the performance indicator, obtained as a result of the experiments.

In this study, the construction sector was addressed and it was aimed to optimize plaster factors, affecting the insulation plaster mortar. Light, economical and resistant materials are used as insulation materials, with the development of technology. Their properties are really important issues according to the preparation of efficient materials in different criteria, such as strength, cost, and energy conservation. Therefore, this study is important to draw a systematic way of determining the optimal insulation plaster mortar series, for the defined multi-criteria decision-making problem.

Firstly, Taguchi method was applied to define the experimental design plan with the factors of: cement, lime, dolomite and perlite, in three levels for each. L9 experimental design was used in the study. Then some experiments were made, based on the defined factors with their levels. These experiments were: ultrasonic pulse velocity, compressive strength, bond strength, capillarity water absorption and thermal conductivity. In this stage this problem became a multi-criteria decision-making problem, because of the multiple output criteria. It was aimed to determine the optimum series based on the multiple outputs. In addition, the output criteria have different importance on the insulation plaster mortar. Therefore, Analytic Hierarchy Process (AHP) which is one of the multi-criteria methods, was used to obtain the weights of the criteria. After obtaining the weights, the series were evaluated by using Simple Additive Weighting (SAW) method. According to the results, the factors' optimum levels were proposed, based on the multiple output criteria.

Design of the experiments and Taguchi method are the methods of conducting experiments according to a design matrix, by changing the system variables, that are likely to have an effect on the process. There are various application fields in the literature. Some of the recent studies are given as the following.

Onoue et al. (1) used the Taguchi method to experimentally examine the shock-absorbing property of lightweight concrete, using volcanic pumice aggregate and its application to the buffer material. Tanyıldızı and Şahin (2) applied the Taguchi method to optimize the polymer reinforced concrete after high temperature. Hadi et al. (3) applied Taguchi method to design the optimum mix proportions for geopolymer concrete with ground, granulated blast furnace slag as aluminosilicate source, at ambient curing condition. Mehta et al. (4) studied the Taguchi method to optimize the

mielonym, granulowanym żużlem wielkopieczowym jako źródłem glinokrzemianów, w warunkach twardnienia w temperaturze otoczenia. Mehta i in. (4) badali metodą Taguchi wpływ różnych parametrów na wytrzymałość na ściskanie i właściwości absorpcji wody mieszanek betonowych z popiołów lotnych z geopolimerami. Lerher (5) badał ważne czynniki, które wpływają na wydajność nowej technologii zautomatyzowanego systemu magazynowania i pobierania, zwanego shuttle-based storage and retrieval system, stosując plan doświadczeń. Jahan i in. (6) przeanalizowali termomechaniczną optymalizację konstrukcji kanałów chłodzenia konformalnego, przy użyciu eksperymentalnego projektu. Opracowali oni metodologię projektowania dla wprowadzenia kanałów chłodzących, kompatybilnych z konwencjonalnymi matrycami. Iffa i in. (7) zastosowali eksperymentalną metodę projektowania w celu optymalizacji konfiguracji, zalecanych ze względu na zastosowane czynniki chłodzące i warunki pracy. Wzięli oni pod uwagę wszystkie parametry wpływające na wydajność systemu i temperaturę funkcji roboczych, aby połączyć czynnik chłodniczy w wybranej konfiguracji i stosunkowo niskiej temperaturze roboczej generatora. Fangyao i in. (8) zastosowali doświadczalną konstrukcję, aby określić czynniki i ich wpływ na przewidywanie wyników sportowych. Sevinç i in. (9) zastosowali metodę Taguchi do zbadania właściwości inżynierskich betonu zawierającego baryt, kolemanit, pumeks bazaltowy i mielony żużel wielkopieczowy. Bala i in. (10) omówili optymalizację receptury szybko rozpuszczającej się błony aprepitantu za pomocą planu eksperymentalnego. Suhartono i in. (11) wykorzystali sieć neuronową w estymacji danych szeregów czasowych, które mogą obejmować zarówno modele liniowe, jak i nieliniowe. W sztucznej sieci neuronowej stworzyli projekt doświadczenia, aby uzyskać wynik predykcji, który daje minimalny błąd. Munawar i in. (12) zastosowali metodę eksperymentu projektowego, do optymalizacji parametrów wytwarzania hybrydowych kompozytów poliestrowych wzmocnionych włóknem szklanym, pokrytym ditlenkiem tytanu. Eskandari-Naddaf i Azimi-Pour (13) wykorzystali metodę Taguchi do statystycznego zbadania znaczenia porowatości oraz wytrzymałości na ściskanie i zginanie, w granicach z betonu prasowanego na sucho [DPC]. Başar i in. (14) badali optymalizację wytrzymałości na zerwanie poprzeczne dla kompozytowych materiałów ciernych z brązu wzmocnionych popiołem lotnym, za pomocą metody Taguchi. W tym badaniu do doświadczeń wybrano plan ortogonalny L9. Srivastava i in. (15) badali wytwarzanie kompozytów powierzchniowych AA 6063/SiC i zastosowali metodę Taguchi, do optymalizacji kombinacji parametrów procesu. Samtaş i in. (16) badali wpływ metody jej cięcia, głębokości cięcia, prędkości cięcia i posuwu, na chropowatość powierzchni za pomocą metody Taguchi. W przeprowadzonych badaniach zastosowano macierz ortogonalną Taguchi L27, a za pomocą optymalizacji wyznaczono najbardziej odpowiednie ustawienia procesu skrawania, dające najniższą chropowatość powierzchni. Uysal i in. (17) zastosowali analizę Taguchi i Anova do optymalizacji wytrzymałości betonów. Mohd i in. (18) zastosowali metodę Taguchi do oceny wytrzymałości betonu, przyjaznego środowisku. W niniejszym opracowaniu przeprowadzono eksperymenty w celu sprawdzenia przydatności zastosowania kruszywa grubego z recyklingu, w betonie przyjaznym dla środowiska. Do

influence of various parameters on the compressive strength and water absorption properties, of the geopolymer concrete mixtures. Lerher (5) studied important factors that affect the performance of the new automated storage and retrieval system technology, called shuttle-based storage and retrieval system, by using an experimental design. Jahan et al. (6) analyzed the thermomechanical design optimization of conformal cooling channels, using experimental design. They have developed a design methodology for the introduction of cooling ducts compatible with conventional dies. Iffa et al. (7) applied an experimental design method for optimization of the configurations, recommended by the suction pairs used and operating conditions. They took into account all parameters affecting system performance and operating function temperature, to combine the refrigerant in the choice of configuration and a relatively low working generator temperature. Fangyao et al. (8) used the experimental design to determine the factors and their impact on the prediction of the sport outcome. Sevinç et al. (9) used the Taguchi approach to investigate the engineering properties of concrete containing barite, colemanite, basaltic pumice and ground blast furnace slag. Bala et al. (10) discussed the optimization formulation of the fast-dissolving aprepitant film, using experimental design. Suhartono et al. (11) used a neural network in estimating time series data, which could include both linear and nonlinear models. In the artificial neural network, they created an experimental design to obtain the prediction result that produces the minimum error. Munawar et al. (12) used the experimental design method, to optimize the manufacturing parameters of titanium dioxide embedded glass fiber reinforced polyester hybrid composites. Eskandari-Naddaf and Azimi-Pour (13) used the Taguchi method to statistically investigate the importance of porosity, compressive and flexural strength in dry pressed concrete borders (DPC). Başar et al. (14) studied optimization of transverse rupture strength for fly ash-reinforced bronze-based composite friction materials, using the Taguchi method. In this study, the L9 orthogonal design was chosen for the experiments. Srivastava et al. (15) studied the fabrication of AA 6063/SiC surface compounds and used Taguchi method to optimize the combinations of process parameters. Samtaş et al. (16) studied the effects of cutting, cutting depth, cutting speed, and feed rate parameters on surface roughness using Taguchi method. In the experiments carried out, the Taguchi L27 orthogonal array was used and the most suitable cutting parameters that give the lowest surface roughness were determined with optimization. Uysal et al. (17) used Taguchi and Anova analysis to optimize the durability properties of concretes. Mohd et al. (18) used the Taguchi method to evaluate the strength of environmentally friendly concrete. In this study, experiments were conducted to check the suitability of using recycled coarse aggregate, in environmentally friendly concrete. The Taguchi method and Minitab software were used to optimize the mix design.

2. Experiments

In the study, an integrated approach was proposed in selecting the optimal insulation plaster mortar series. First, the factors and

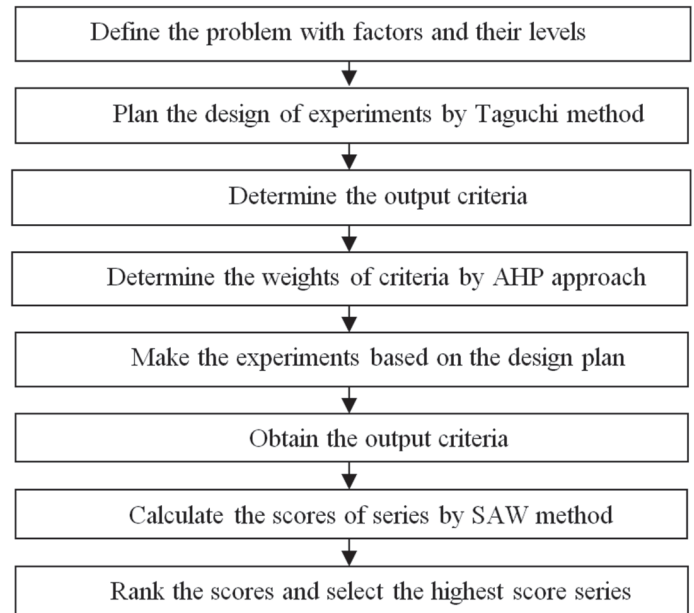
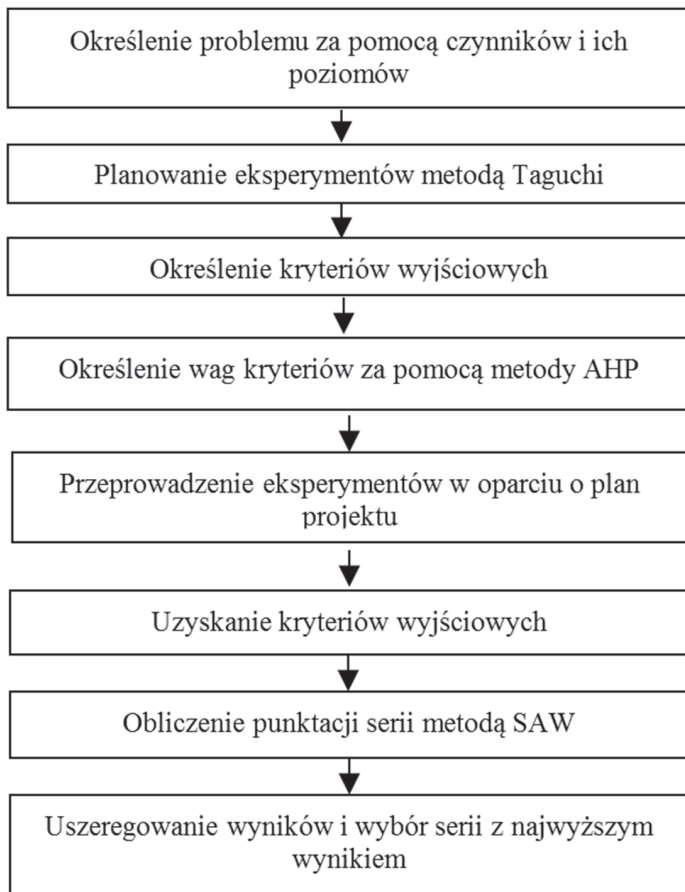


Fig. 1. The flow chart of the integrated approach for plaster design

Rys. 1. Schemat zintegrowanego podejścia do projektowania zaprawy tynkarskiej

optymalizacji projektu mieszanki, wykorzystano metodę Taguchi i oprogramowanie Minitab.

2. Doświadczenia

W badaniu zaproponowano zintegrowane podejście, do wyboru optymalnej serii zaprawy tynkarskiej do izolacji. Po pierwsze, zostały zdefiniowane czynniki i ich poziomy dla analizowanego problemu. Następnie zaplanowano projekt doświadczeń metodą Taguchi. Doświadczenia zostały zdefiniowane w oparciu o kryteria wyjściowe. Kryteria mają różne znaczenie dla poszczególnych właściwości, dlatego wagi kryteriów zostały określone przy użyciu metody AHP. Po przeprowadzeniu eksperymentów i uzyskaniu wartości kryteriów wyjściowych, obliczono punktację właściwości metodą SAW. W końcu wybrano serię z najwyższą liczbą punktów. Schemat blokowy zintegrowanego podejścia jest przedstawiony na rysunku 1.

W badaniu zastosowano metodę Taguchi, która wprowadza innowacje do projektowania doświadczeń. Cechą metody Taguchi jest to, że pozwala ona na jednoczesną zmianę czynników i poziomów w badaniach doświadczalnych za pomocą opracowanych tablic ortogonalnych, dzięki czemu może mierzyć wiele czynników i poziomów.

their levels of the problem were defined. Then, the design of the experiments was planned, using the Taguchi method. The experiments were defined on the basis of the output criteria. The criteria are of different importance in the series; therefore, the weights of the criteria were determined using the AHP approach. After the experiments and obtaining the values of the series output criteria, the scores were calculated using the SAW method. Finally, the series with the highest score was selected. The flow chart of the integrated approach is given in Fig. 1.

The Design of Experiments [DOE] method has various application techniques. In the study, the Taguchi method, which brings innovation to experimental design, was used. The feature of the Taguchi method is that it allows factors and levels to be changed simultaneously in experimental design studies with the developed orthogonal arrays, so that it can measure multiple factors and levels.

The Taguchi method is a simple technique used to optimize the parameters of the process, which includes reducing process variations. It is possible to reduce the number of experiments by using the Taguchi method. Also, the Taguchi method is an experimental design technique that is extremely useful, for high quality system design. According to Taguchi, the design process consists of three stages which are system design, parameter design and tolerance design. In system design, the basic concept is the comparison using theoretical knowledge and experience, to provide the required performance and calculate the values of the basic parameters. The Taguchi method also uses some functions to determine quality features. Loss function values are also converted to a signal-to-noise (S/N) ratio (η). In general, in the S / N ratio analysis there are three different quality features, as in the Eq. (1)-(3) (16):

Smallest best:

$$\eta = S/N_S = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad [1]$$

Metoda Taguchi jest prostą techniką, stosowaną do optymalizacji parametrów procesu, która obejmuje zmniejszenie zmienności procesu. Za pomocą metody Taguchi można zmniejszyć liczbę doświadczeń. Ponadto, metoda Taguchi jest techniką projektowania doświadczeń, która jest niezwykle przydatna w projektowaniu systemów wysokiej jakości. Według Taguchiego, proces projektowania składa się z trzech etapów, którymi są: projektowanie systemu, projektowanie parametrów i projektowanie tolerancji. W projektowaniu systemu podstawową koncepcją jest porównanie z wykorzystaniem wiedzy teoretycznej i doświadczenia, aby zapewnić wymaganą wydajność i obliczyć wartości podstawowych parametrów. Metoda Taguchi wykorzystuje również pewne funkcje do określania cech jakościowych. Wartości funkcji strat są również przeliczane na stosunek sygnału do szumu (S/N) (η). Ogólnie rzecz biorąc, w analizie stosunku sygnału do szumu S/N istnieją trzy różne cechy jakościowe, w postaci równań [1]-[3] (16):

Tablica 1 / Table 1

PLAN DOŚWIADCZALNY

DESIGN OF EXPERIMENTS FOR SERIES

Series Serie	Factors / Czynniki			
	Cement, g	Lime / Wapno, g	Dolomite / Dolomit, g	Perlite / Perlit, g
1	250	25	50	50
2	250	50	100	100
3	250	75	150	150
4	500	25	100	150
5	500	50	150	50
6	500	75	50	100
7	750	25	150	100
8	750	50	50	150
9	750	75	100	50

Najmniejsza najlepsza:

$$\eta = S/N_S = -10 \cdot \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad [1]$$

Największa najlepsza:

$$\eta = S/N_L = -10 \cdot \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad [2]$$

Nominalna najlepsza:

$$\eta = S/N_T = -10 \cdot \log\left(\frac{\bar{y}}{s_y^2}\right) \quad [3]$$

W równaniach [1]-[3], \bar{y} jest średnią wartości mierzonej, s_y jest wariancją y , n jest liczbą zanotowanych wartości, a y jest mierzona daną. Bez względu na to, jaki wzór zostanie użyty do obliczenia wartości proporcji S/N, wartość z najwyższą S/N ma najwyższą wydajność. W niniejszym badaniu zastosowano metodę Taguchi z planem eksperymentalnym L9, w programie Minitab 16. Prowa-

Greatest best:

$$\eta = S/N_L = -10 \cdot \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad [2]$$

Nominal best:

$$\eta = S/N_T = -10 \cdot \log\left(\frac{\bar{y}}{s_y^2}\right) \quad [3]$$

In Eq. (1)-(3), \bar{y} is the average of the observed value, s_y is the variance of y , n is the number of observed values and y is the observed data. No matter which formula is used in the calculation of S/N proportion values, the value with the highest S/N has the highest performance. In this study, Taguchi method was used with L9 experimental design by Minitab 16. It is expensive and difficult to

make experiments for material, in a construction sector. Therefore, L9 experimental design helps to analyse the problem and to see the optimal solutions systematically, in a low cost and time.

The factors were defined as content of cement, lime, dolomite and perlite in three levels for each. The factors with their levels are given in Table 1.

Experiments were made based on the defined factors with their levels. These experiments were ultrasonic pulse velocity [C1], compressive strength [C2], bond strength [C3], capillarity water absorption [C4] and thermal conductivity [C5].

Ultrasonic pulse velocity

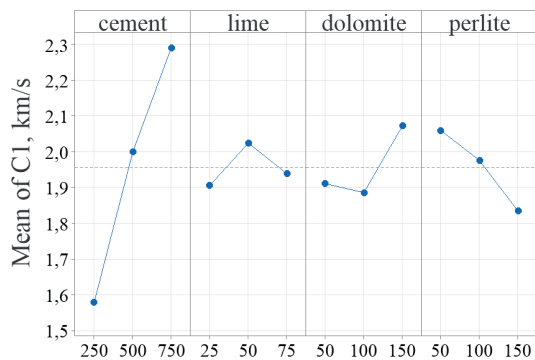
The ultrasonic pulse velocity experiment is the calculation of the sound speed in the sample, based on the transition time. This experiment shows how fast the supersonic wave passes the sample. It indicates the void ratio in the sample. The lower the void ratio in the sample, the faster the sound passes through the sample. The ultrasonic pulse velocity measuring device is given in Fig. 2.

The main effects plot and S/N proportion graphs of the ultrasonic pulse velocity are given in Fig. 3.

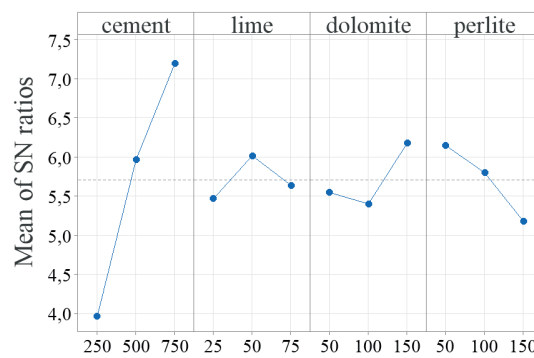
The order of importance of the main factors in the ultrasonic pulse velocity experiment, was determined as cement, perlite, lime and dolomite, respectively. According to Fig. 3, the 3rd level of cement content [750 g], the second level of lime content [50 g], the third



Rys. 2. Stanowisko do pomiaru szybkości przejścia fali ultradźwiękowej
Fig. 2. Ultrasonic pulse velocity measuring device



(a)



(b)

Rys. 3. Wartości uzyskane w badaniu szybkości przejścia fali ultradźwiękowej (a) oraz stosunek S/N (b)

Fig. 3. Main effects plot (a) and S/N graph (b) of ultrasonic pulse velocity

dzenie doświadczeń na materiałach w sektorze budowlanym, jest kosztowne i trudne. Dlatego plan eksperymentalny L9 pomaga analizować problem i systematycznie dostrzegać optymalne rozwiązania, przy niskich kosztach i w krótkim czasie. Czynniki zostały zdefiniowane jako cement, wapno, dolomit i perlit na trzech poziomach dozowania, dla każdego z nich. Czynniki wraz z ich poziomami są podane w tabelcy 1.

Następnie przeprowadzono kilka doświadczeń w oparciu o zdefiniowane czynniki, wraz z ich poziomami. Były to: prędkość impulsu ultradźwiękowego [C1], wytrzymałość na ściskanie [C2], wytrzymałość spoiny [C3], kapilarna nasiąkliwość wody [C4] i przewodność cieplna [C5]. Wyniki doświadczeń są podane w tabelcy 2. Wyniki zostały przeanalizowane w programie Minitab 16. Oceniono efekty główne dla średnich i proporcji S/N.

Szybkość przejścia fali ultradźwiękowej

Badania ultradźwiękowe polegały na obliczeniu prędkości przejścia fali ultradźwiękowej, w oparciu o czas przejścia fali przez próbkę. Wielkość ta pokazuje, jak długo fala naddźwiękowa przechodzi przez próbkę. Prędkość fali ultradźwiękowej wskazuje na ilość porów występujących w próbce. Im mniejsza porowatość materiału, tym szybciej dźwięk przechodzi przez próbkę. Urządzenie do pomiaru prędkości ultradźwięków jest przedstawione na rysunku 2. Wykresy efektów głównych i proporcji S/N dla prędkości ultradźwięków pokazano na rys. 3.

Istotność głównych czynników w eksperymencie z prędkością ultradźwięków, została określona odpowiednio jako: cement, perlit, wapno i dolomit. Na podstawie rysunku 3, aby uzyskać pożądany wynik tego eksperymentu, należy wybrać 3. poziom zawartości cementu [750 g], 2. poziom zawartości wapna [50 g], 3. poziom zawartości dolomitu [150 g] i 1. poziom zawartości perlitu [50 g].

Wytrzymałość na ściskanie

Badanie prowadzono według wytycznych normy TS EN 1015-11 (21). Po 28 dniach dojrzewania próbki zostały umieszczone w prasie i poddane obciążeniu z prędkością 400 N/s, bez nagłego skoku obciążenia ze stałą prędkością aż do pęknięcia. Największe przyłożone obciążenie zostało zapisane jako N. Wytrzymałość



Rys. 4. Prasa wytrzymałościowa

Fig. 4. Press machine

level of dolomite content [150 g] and the first level of perlite content [50 g], should be selected for the desired result of this experiment.

Compressive strength

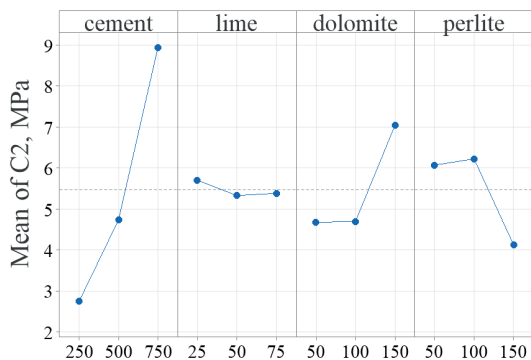
The test was carried out according to the guidelines of the TS EN 1015-11 standard (21). After 28 days of maturation, the specimens were placed in the press and subjected to the load, at a speed of 400 N/s without a sudden load jump at a constant speed, until breakage. The highest load applied was noted as N. The compressive strength was calculated by dividing the maximum load that the sample can bear, by the cross-sectional area of the sample under compression. The press is shown in Figure 4. Graphs of the main effects and S/N ratio of compressive strength, are shown in Figure 5.

The main effects plot and S/N proportion graphs of the compressive strength, are given in Fig. 5.

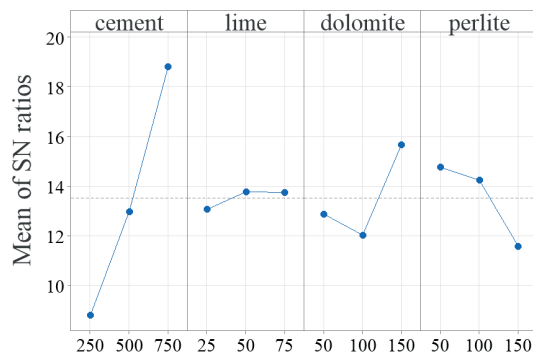
The order of importance of the main factors in the compressive strength experiment was determined as: cement, dolomite, perlite and lime, respectively. To optimize this experiment, the third level of cement content [750 g], the second level of lime content [50 g], the third level of dolomite content [150 g] and the first level of perlite content [50 g], should be selected.

Bond strength

To determine the adhesion of the plaster to the substrate, an experiment to determine the bond strength was carried out based on



(a)



(b)

Rys. 5. Wartości uzyskane w badaniu wytrzymałości na ściskanie (a) oraz stosunek S/N (b)

Fig. 5. Main effects plot (a) and S/N graph (b) of compressive strength

na ściskanie została obliczona przez podzielenie maksymalnego obciążenia, które próbka może przyjąć, przez pole przekroju próbki poddanej ściskaniu. Użyta w badaniach prasa została przedstawiona na rysunku 4. Wykresy głównych efektów i proporcji S/N wytrzymałości na ściskanie, są przedstawione na rysunku 5.

Kolejność istotności głównych czynników w badaniu wytrzymałości na ściskanie, została określona odpowiednio jako: cement, dolomit, perlit i wapno. Aby zoptymalizować ten eksperyment, należy wybrać 3. poziom zawartości cementu [750 g], 2. poziom zawartości wapna [50 g], 3. poziom zawartości dolomitu [150 g] i 1. poziom zawartości perlitu [50 g].

Przyczepność

W celu określenia przyczepności tynku do podłoża przeprowadzono badanie siły wiązania z podłożem, w oparciu o wytyczne normy TS EN 1015-12 (22). Beton, który odpowiada warunkom określonym w normie, został użyty jako beton podkładowy. Nałożona zaprawa tynkarska była przechowywana przez 7 dni w temperaturze otoczenia $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i 21 dni w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $65 \pm 5\%$. Później przymocowano głowice do zrywania zaprawy i wykonano badanie w określonym w normie zakresie prędkości zrywania i rejestrowano wyniki. Przyrząd do określania przyczepności pokazano na rysunku 6. Wyniki przedstawiono na rysunku 7.

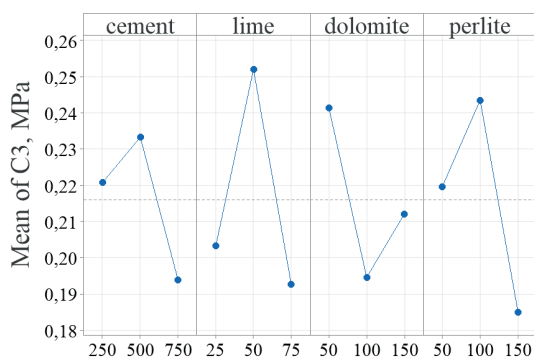
TS EN 1015-12 (22). Concrete that complies with the conditions defined in the standard, was used as a subconcrete. The applied plaster mortar was kept for 7 days at $20 \pm 2^\circ\text{C}$ environment and 21 days at $20 \pm 2^\circ\text{C}$ temperatures and $65 \pm 5\%$ of the relative humidity. Later, hardened mortar pulling heads were affixed and processed in the drawing speed range defined in the standard and the results were recorded. The bond strength determination device is shown in Fig. 6.

The main effects plot and S/N proportion graphs of the bond strength, are given in Fig. 7.

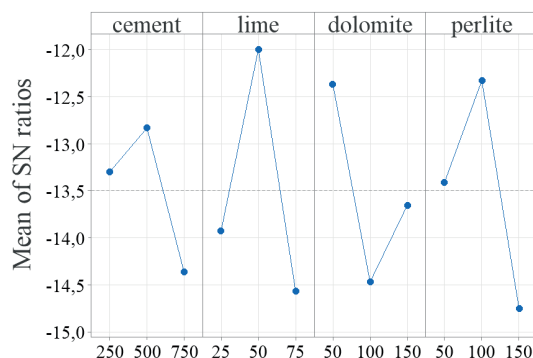


Rys. 6. Urządzenie do badania przyczepności zapraw

Fig. 6. Bond strength determination device



(a)



(b)

Rys. 7. Wartości uzyskane w badaniu przyczepności (a) oraz stosunek S/N (b)

Fig. 7. Main effects plot (a) and S/N graph (b) of bond strength

Istotność głównych czynników w eksperymencie dotyczącym pomiaru przyczepności, została określona odpowiednio jako wapno, perlit, dolomit i cement. Aby zoptymalizować to doświadczenie, należy wybrać 2. poziom zawartości cementu [500 g], 2. poziom zawartości wapna [50 g], 1. poziom zawartości dolomitu [50 g] i 2. poziom zawartości perlitu [100 g].

Nasiąkliwość kapilarna

Sześć połówek beleczek 40 mm x 40 mm x 160 mm zostało zwężone, po wysuszeniu przez 24 godziny w suszarce w temperaturze 60°C. Następnie powierzchnie o wymiarach 40 x 40 mm pozostawiono w kontakcie z wodą, równoległe do niej i zanurzono na 2 mm. Próbkę zważono po 10 minutach nasączenia i określono wartość M1. Ten sam proces powtórzono po upływie 90 minut i otrzymano wartość M2. Na koniec eksperymentu obliczono współczynnik nasiąkliwości kapilarnej zgodnie z normą TS EN 1015-18 (23). Szybkość absorpcji wody [C] podano w równaniu [4].

$$C = 0.1 (M2 - M1) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}) \quad [4]$$

Sposób określenia nasiąkliwości kapilarnej przedstawiono na rysunku 8.

Wyniki badania nasiąkliwości kapilarnej oraz stosunek S/N pokazano na rysunku 9.

Istotność głównych czynników w doświadczeniu nasiąkliwości kapilarnej, została określona odpowiednio jako cement, perlit, dolomit i wapno. Aby uzyskać pożądany wynik tego eksperymentu, należy wybrać 3. poziom zawartości cementu [750 g], 1. poziom zawartości wapna [25 g], 1. poziom zawartości dolomitu [50 g] i 1. poziom zawartości perlitu [50 g].

Przewodność cieplna

Próbki przygotowane zgodnie z TS EN 1015-2 (24) po 28 dniach dojrzewania i przygotowaniu zgodnie z TS EN 1015-11 (21), zostały poddane badaniu przewodności cieplnej. Wykresy efektów głównych i proporcji S/N przewodności cieplnej są przedstawione na rys. 11.

Istotność głównych czynników w doświadczeniach przewodności cieplnej, została określona odpowiednio jako cement, perlit, wapno

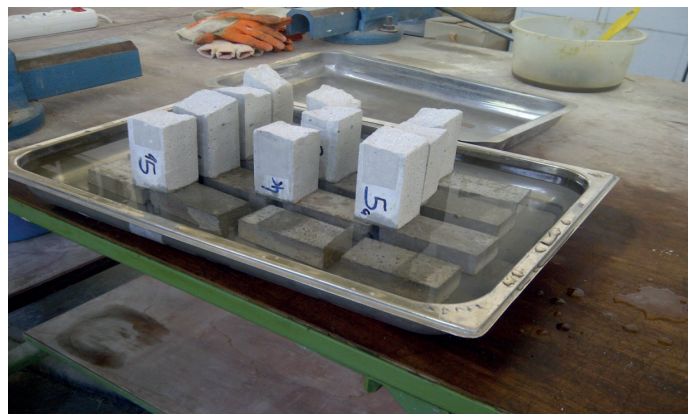


Fig. 8. Capillarity water absorption experiment

Rys. 8. Stanowisko do badania nasiąkliwości kapilarnej

The importance order of the main factors in the bond strength experiment was determined as lime, perlite, dolomite and cement, respectively. To optimize this experiment, the second level of the cement content [500 g], the second level of the lime content [50 g], the first level of the dolomite content [50 g] and the second level of the perlite content [100 g], should be selected.

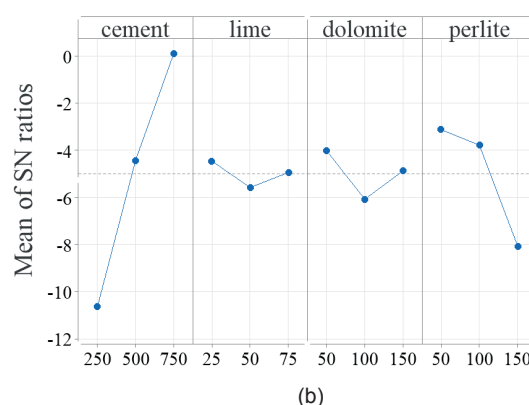
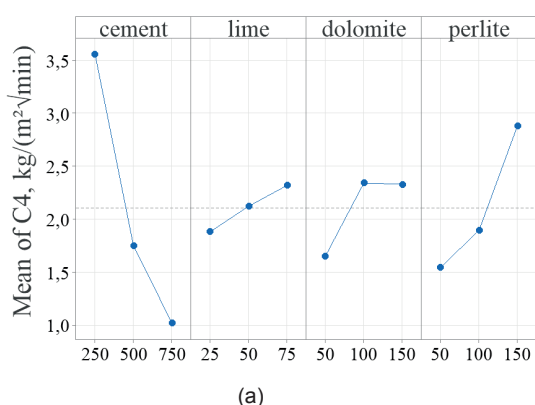
Capillarity water absorption

Six halves of 40 mm x 40 mm x 160 mm mortar bars were weighed, after drying for 24 hours in an oven at 60°C. Then, surfaces of dimensions 40 mm x 40 mm were left in contact with the water parallel to it and immersed for 2 mm. The samples were weighed after 10 minutes of soaking and the M1 value was determined. The same process was repeated after 90 minutes to obtain an M2 value. At the end of the experiment, the capillary water absorption coefficient was calculated in accordance with the TS EN 1015-18 standard (23). The rate of water absorption [C] is given in equation [4].

$$C = 0.1 (M2 - M1) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}) \quad [4]$$

The capillarity water absorption experiment arrangement is given in Fig. 8.

The main effects plot and S/N proportion graphs of the capillarity water absorption, are given in Fig. 9.



Rys. 9. Wartości uzyskane w badaniu nasiąkliwości kapilarnej (a) oraz stosunek S/N (b)

Fig. 9. Main effects plot (a) and S/N graph (b) of capillarity water absorption

i dolomit. Aby uzyskać pożądany wynik tego eksperymentu, należy wybrać 1. poziom cementu (250 g), 3. poziom wapna (75 g), 1. poziom dolomitu (50 g) i 3. poziom perlitu (150 g). Na podstawie każdego doświadczenia najlepsze poziomy i najlepsze serie mogą być różne; dlatego nie jest łatwo podjąć decyzję o optymalnej serii. Wyniki dla każdego eksperymentu są podane w tabeli 3.

3. Wyniki

W tym badaniu, po przeprowadzeniu doświadczenia w oparciu o metodę projektowania Taguchi, dokonano oceny wielu kryteriów za pomocą podejścia AHP-SAW, w celu znalezienia optymalnej serii zaprawy tynkarskiej do izolacji.

3.1. Analiza AHP [Analytic Hierarchy Process]

Koncepcja procesu hierarchii analitycznej [AHP] została opracowana przez Thomasa Saaty'ego w 1980 roku (19). AHP jest jedną z metod wielokryterialnego podejmowania decyzji, która porównuje alternatywy dla każdego kryterium i określa średnią ważność alternatyw. Podejście AHP było badane w różnych dziedzinach, takich jak edukacja, administracja rządowa, gospodarka i zdrowie (20).

Poszczególne kroki analizy AHP przedstawiają się następująco:

1. Zbudowanie hierarchii problemu z celem, alternatywami i kryteriami.
2. Określenie priorytetów wśród elementów hierarchii za pomocą ocen opartych na skali ocen Saaty'ego. Skala podana jest w tabelicy 4 (19), a porównanie parami zostało podane w tabelicy 5.
3. Dokonanie syntezy ocen i obliczenie wag.
4. Obliczenie spójności.
5. Uszeregowanie kryteriów.

Kryteria wyjściowe, które są podane w tabelicy 2, mają różne wagi istotności, w analizowanym problemie. Dlatego zastosowano metodę AHP do określenia znaczenia szybkości przejścia fali ultradźwiękowej [C1], wytrzymałości na ściskanie [C2], przyczepności [C3], nasiąkliwości kapilarnej [C4] i przewodności cieplnej [C5].

Współczynnik spójności obliczony wyniósł 0,02, a macierz porównawczą, uznano za bezpieczną. Obliczenia wektora własnego

The order of importance of the main factors in the capillarity water absorption experiment was determined as cement, perlite, dolomite and lime, respectively. For the desired result of this experiment, the third level of cement content [750 g], the first level of the lime content [25 g], the first level of the dolomite content [50 g] and the first level of the perlite content [50 g], should be selected.

Thermal conductivity

Samples prepared according to TS EN 1015-2 (24) were cured for 28 days and maintained according to TS EN 1015-11 (21) and then subjected to thermal conductivity test.

The main effects plot and S/N proportion graphs of the thermal conductivity are given in Fig. 10.

The order of importance of the main factors in the thermal conductivity experiment was determined as: cement, perlite, lime and dolomite, respectively. For the desired result of this experiment, the first level of cement content [250 g], the third level of the lime content [75 g], the first level of the dolomite content [50 g] and the third level of the perlite content [150 g], should be selected.

The results of all experiments are given in Table 2. The results were analysed in Minitab 16. The main effects for means and S/N proportions were evaluated.

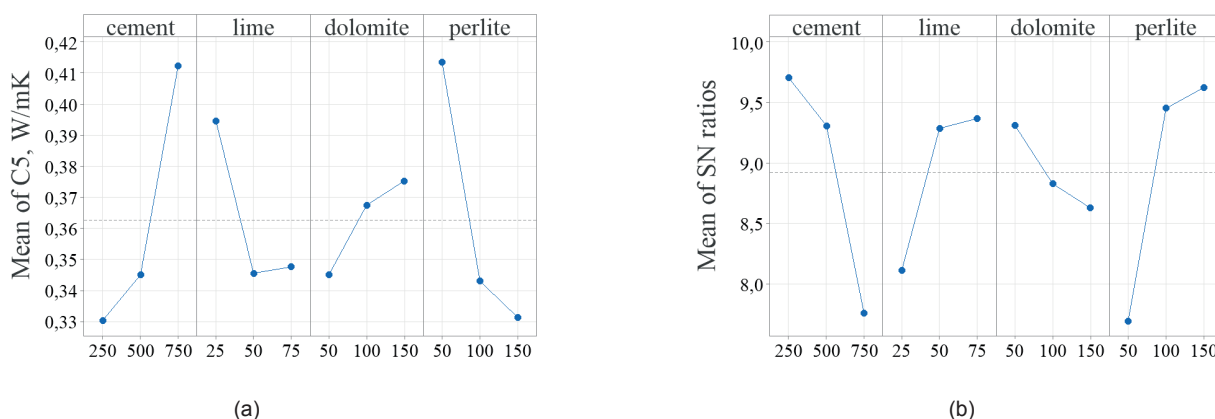
Based on each experiment, the best levels and the best series can be varied; therefore, it is not easy to make the decision about the optimal series. The results for each experiment are as given in Table 3.

3. Results

In this study, after making the Taguchi design, multiple criteria were evaluated by the AHP-SAW approach, to find out the optimal series of insulation plaster mortar series.

3.1. Analytic Hierarchy Process

The concept of Analytic Hierarchy Process [AHP] was developed by Thomas Saaty in 1980 (19). AHP is one of the multicriteria



Rys. 10. Wartości uzyskane w badaniu przewodnictwa cieplnego (a) oraz stosunek S/N (b)

Fig. 10. Main effects plot (a) and S/N graph (b) of thermal conductivity

Tablica 2 / Table 2

WYNIKI DOŚWIADCZEŃ

RESULTS OF THE EXPERIMENTS

Series Seria	C1, km/s	C2, MPa	C3, MPa	C4,	C5, W/mK
1	1.59	2.79	0.237	2.31	0.395
2	1.60	2.59	0.263	3.59	0.299
3	1.56	2.89	0.163	4.76	0.297
4	1.76	2.84	0.168	2.53	0.351
5	2.29	6.76	0.269	1.42	0.392
6	1.96	4.60	0.263	1.29	0.293
7	2.38	11.48	0.205	0.80	0.437
8	2.19	6.64	0.224	1.35	0.346
9	2.31	8.66	0.152	0.90	0.453

Tablica 3 / Table 3

NAJLEPSZE POZIOMY W OPARCIU O KAŻDE Z KRYTERIÓW WYJŚCIOWYCH

THE BEST LEVELS BASED ON EACH OUTPUT CRITERIA

Tests / Badanie	S/N	The best levels Najlepsze poziomy
Ultrasonic pulse velocity / Szybkość przejścia fali ultradźwiękowej	Greatest Best / Największa najlepsza	C3-L2-D3-P1
Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie	Greatest Best / Największa najlepsza	C3-L2-D3-P1
Bond strength / Przyczepność	Greatest Best / Największa najlepsza	C2-L2-D1-P2
Capillary water absorption / Nasiąkliwość kapilarna	Smallest Best / Najmniejsza najlepsza	C3-L1-D1-P1
Thermal conductivity / Przewodnictwo ciepłe	Smallest Best / Najmniejsza najlepsza	C1-L3-D1-P3

i wagi są podane w tablicy 6. Widać, że kryterium przewodności cieplnej ma największe znaczenie przy wyborze optymalnego problemu serii tynków izolacyjnych.

Po uzyskaniu wag kryteriów metodą AHP, wykorzystano metodę SAW do obliczenia punktacji serii, w celu ich oceny.

3.2. Metoda SAW [Simple Additive Weighting]

Metoda prostego ważenia addytywnego [SAW] jest prostą metodą punktową, która jest powszechnie stosowana w wielokryterialnych problemach decyzyjnych. Średnia ważona jest obliczana tą

Tablica 4 / Table 4

PAIR-WISE COMPARISON SCALE OF AHP

SKALA PORÓWNAWCZA PAR AHP

Numerical rating Ocena liczbowa	Judgments of preferences / Ocena preferencji
9	Extremely preferred / Ekstremalnie preferowany
8	Very strongly to extremely preferred / Bardzo mocno do ekstremalnie preferowanego
7	Very strongly preferred / Bardzo mocno preferowany
6	Strongly to very strongly preferred / Mocno do bardzo mocno preferowany
5	Strongly preferred / Mocno preferowany
4	Moderately to strongly preferred / Umiarkowanie do mocno preferowany
3	Moderately preferred / Umiarkowanie preferowany
2	Equally to moderately preferred / Jednakowo do umiarkowanie preferowany
1	Equally preferred / Jednakowo preferowany

decision making approaches that compares alternatives for each criterion and defines average importance of alternatives. The AHP approach has been studied in different fields such as education, government administration, economy, and health. (20).

The steps of the AHP approach are given as follows:

1. Construct the hierarchy of the problem with the goal, the alternatives and the criteria.
2. Determine the priorities among the elements of the hierarchy by judgments based on Saaty's rating scale. The scale is given in Table 4. (19) and the pair wise comparison of the problem is given in Table 5.
3. Synthesize the judgments and calculate the weights.
4. Calculate the consistency.
5. Rank the criteria.

The output criteria given in Table 2 have different importance weights in the problem. Therefore, AHP was used to determine the importance of ultrasonic pulse velocity [C1], compressive strength [C2], bond strength [C3], capillary water absorption [C4] and thermal conductivity [C5].

The consistency ratio was calculated as 0.02 and the comparison matrix was found as safety. The calculations of the eigen vector and the weights are given in Table 6. It can be seen that the thermal conductivity has the highest importance in the selection of the optimal insulation plaster mortar series insulation problem.

Tablica 5 / Table 5

PAIR-WISE COMPARISON OF CRITERIA

PORÓWNANIE KRYTERIÓW PARAMI

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1.000	0.500	0.333	1.000	0.200
C2	2.000	1.000	2.000	3.000	1.000
C3	3.000	0.500	1.000	3.000	0.500
C4	1.000	0.333	0.333	1.000	0.200
C5	5.000	1.000	2.000	5.000	1.000

Tablica 6 / Table 6

WAGI POSZCZEGÓLNYCH KRYTERIÓW

WEIGHTS OF THE CRITERIA

	C1	C2	C3	C4	C5	Weights Wagi
C1	0.083	0.150	0.059	0.077	0.069	0.088
C2	0.167	0.300	0.353	0.231	0.345	0.279
C3	0.250	0.150	0.176	0.231	0.172	0.196
C4	0.083	0.100	0.059	0.077	0.069	0.078
C5	0.417	0.300	0.353	0.385	0.345	0.360

metodą. Dla każdej alternatywy uzyskuje się wynik, korzystając z równania [5].

$$s_i = \sum_{q=1}^5 w_q v_{iq} \quad i = 1,2,\dots,9 \quad q = 1,2,\dots,5 \quad [5]$$

Tablica 7 / Table 7

OCENY LICZBOWE SERII

SCORES OF THE SERIES

SERIES	Factors				Experiments					Scores by SAW Ocena SAW
	Cement	Lime / Wapno	Dolomite / Dolomit	Perlite / Perlit	Weights by AHP					
					0.088	0.279	0.196	0.078	0.360	
				Ultrasonic pulse velocity Szybkość fali ultradźwiękowej, km/s	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie, MPa	Bond strength Przyczepność, MPa	Capillarity water absorption Nasiąkliwość kapilarna, kg/(m ² ·min ^{1/2})	Thermal conductivity Przewodność cieplna, W/mK		
1	250	25	50	50	1.59	2.79	0.237	2.31	0.395	0.5918
2	250	50	100	100	1.60	2.59	0.263	3.59	0.299	0.6834
3	250	75	150	150	1.56	2.89	0.163	4.76	0.297	0.6140
4	500	25	100	150	1.76	2.84	0.168	2.53	0.351	0.5813
5	500	50	150	50	2.29	6.76	0.269	1.42	0.392	0.7574
6	500	75	50	100	1.96	4.60	0.263	1.29	0.293	0.7834
7	750	25	150	100	2.38	11.48	0.205	0.80	0.437	0.8343
8	750	50	50	150	2.19	6.64	0.224	1.35	0.346	0.7556
9	750	75	100	50	2.31	8.66	0.152	0.90	0.453	0.7084
The best value					2.38	11.48	0.269	0.80	0.293	0.8343

After obtaining the weights of the criteria using the AHP approach, the SAW method was used to calculate the scores of the series to evaluate them.

3.2. Simple Additive Weighting Method

The Simple Additive Weighting [SAW] method is a simple scoring method which is commonly used in multi-criteria decision-making problems. The weighted average is calculated in the method. A score is obtained for each alternative using Eq. [5].

$$s_i = \sum_{q=1}^5 w_q v_{iq} \quad i = 1,2,\dots,9 \quad q = 1,2,\dots,5 \quad [5]$$

s_i is the score of the series i , w_q is the weight of the criterion q obtained by the AHP approach and v_{iq} is the value of series i according to criterion q . The scores of the plaster mortar series were determined by the SAW method. The output weights of the criteria were obtained by the AHP approach and used in the SAW method. The data was normalized and then the calculations were performed. The calculated scores are given in Table 7.

After determining the scores of the insulation plaster mortar series by AHP-SAW results, the best series was determined by selecting the high score. Weights multiplied by normalized values gave the total result for each series. Considering the observation values of all series and all experiments, it was obtained that the optimal series based on the multi-criteria of ultrasonic pulse velocity, compressive strength, bond strength, capillarity water absorption and thermal conductivity is the 7th series. As a result of the proposed integrated approach, cement content should be 750 g, lime con-

s_i jest wynikiem serii i , w_q jest wagą kryterium q uzyskaną w podejściu AHP i v_{iq} jest wartością serii i według kryterium q . Wyniki serii zapraw tynkarskich określono metodą SAW. Wagi wyjściowe kryteriów zostały uzyskane metodą AHP i wykorzystane w metodzie SAW. Dane zostały znormalizowane, a następnie dokonano obliczeń. Obliczone wyniki podano w tablicy 7.

Po określeniu punktacji serii zapraw tynkarskich do izolacji za pomocą wyników AHP-SAW, określono najlepszą serię, wybierając wysoką punktację. Wagi pomnożone przez wartości znormalizowane dały wynik całkowity, dla każdej serii. Biorąc pod uwagę wartości obserwacji wszystkich serii i wszystkich doświadczeń, stwierdzono, że optymalną serią w oparciu o ocenę wielokryterialną szybkości przejścia fali ultradźwiękowej, wytrzymałości na ściskanie, przyczepności, nasiąkliwości kapilarnej i przewodności cieplnej, jest seria 7. W wyniku zaproponowanego zintegrowanego podejścia, skład zaprawy uznanej za najlepszą jest następujący: cement 750 g, wapno 25 g, dolomit 150 g oraz perlit 100 g.

4. Wnioski i sugestie

W niniejszym badaniu celem było znalezienie najlepszej serii na podstawie doświadczeń, które zostały zdefiniowane jako kryteria wyjściowe, dla zaprawy izolacyjnej. Doświadczenia przeprowadzono według ustalonych czynników i poziomów, metodą Taguchi. Przeprowadzono różne badania i ta sytuacja sprawiła, że problem stał się bardziej złożony, ponieważ stał się wielokryterialnym problemem decyzyjnym. Na podstawie każdego z kryteriów wyjściowych może istnieć najlepsze rozwiązanie, ale należy rozważyć wszystkie kryteria wyjściowe razem, aby uzyskać najlepszą serię zapraw izolacyjnych. Niniejsze badanie próbowało nakreślić drogę do osiągnięcia tego celu. Dlatego do oceny serii zapraw tynkarskich izolacyjnych po ustaleniu wyników doświadczalnych zastosowano podejście AHP-SAW. W celu ustalenia wag kryteriów wyjściowych zastosowano metodę AHP, ze względu na różny efekt istotności poszczególnych właściwości, dla całego problemu.

W innych badaniach można również zastosować odmienne podejście wielokryterialne, przy określaniu wag kryteriów wyjściowych i obliczaniu punktacji serii, takie jak ANP, TOPSIS, lub inne. Poziomy czynników mogą być również zróżnicowane w zależności od doświadczeń i celu problemu definiowanego przez decydentów.

W niniejszej pracy zaproponowano systematyczną metodę określenia optymalnego składu zapraw tynkarskich do izolacji, dla zdefiniowanego, wielokryterialnego problemu decyzyjnego. Z drugiej strony, taki schemat może być również wykorzystany w innych problemach związanych z wyborem materiałów lub w innych dziedzinach, w przyszłych badaniach.

Literatura / References

K. Onoue, H. Tamai, H. Suseno, Shock-absorbing capability of lightweight concrete utilizing volcanic pumice aggregate. *Constr. Build. Mater.* **83**, 261-274 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.019>

tent should be 25 g, dolomite content should be 150 g and perlite content should be 100 g.

4. Conclusions

In this study, the objective was to find the best series according to the experiments that were defined as output criteria for the insulation mortar. Experiments were carried out according to the factors and levels with Taguchi method. Different experiments were made and this situation made the problem more complex because the problem became a multi-criteria decision-making problem. Based on each output criterion, there could be a best solution, but the entire output criterion should be considered together to obtain an efficient insulation mortar series. This study tried to find a way to achieve this aim. Therefore, the AHP-SAW approach was used to evaluate the insulation plaster mortar series, after determining the experimental results. The AHP approach was used to determine the weights of the output criteria, due to the different importance effect on the problem.

In other studies, another multi-criteria approach can be also used in determining the weights of the output criteria and in calculating the scores of the series such as ANP, TOPSIS or another. Factor levels can also be varied according to the experiences and the aim of the problem by decision makers.

This study proposed a systematic way to determine the optimal series of insulation plaster mortars, for the defined multi-criteria decision-making problem. On the other hand, the proposed integrated approach can also be used in different material selection problems or different fields in future studies.

2. H. Tanyıldızı, M. Şahin, Application of Taguchi method for optimization of concrete strengthened with polymer after high temperature. *Constr. Build. Mater.* **79**, 97-103 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.039>
3. M.N. Hadi, N.A. Farhan, M.N. Sheikh, Design of geopolymers concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method. *Constr. Build. Mater.* **140**, 424-431 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.131>
4. A. Mehta, R. Siddique, B.P. Singh, S. Aggoun, G. Lagód, D. Barnat-Hunek, Influence of various parameters on strength and absorption properties of fly ash based geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Constr. Build. Mater.* **150**, 817-824 (2017).
5. T. Lerher, Design of Experiments for Identifying the Throughput Performance of Shuttle-Based Storage and Retrieval Systems. *Proc. Eng.* **187**, 324-334 (2017).
6. S.A. Jahan, T. Wu, Y. Zhang, J. Zhang, A. Tovar, H. Elmounayri, Thermo-mechanical Design Optimization of Conformal Cooling Channels using Design of Experiments Approach. *Proc. Manufact.* **10**, 898-911 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.078>
7. R. B. Iffa, N. Bouaziz, L. Kairouani, Optimization of Absorption Refrigeration Systems by Design of Experiments Method. *Energy Proc.* **139**, 280-287 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.209>
8. L. Fangyao, Y. Shi, L. Najjar, Application of Design of Experiment Method for Sports Results Prediction. *Proc. Computer Sci.* **122**, 720-726 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.429>
9. A.H. Sevinç, M.Y. Durgun, M. Eken, A Taguchi approach for investigating the engineering properties of concretes incorporating barite, colemanite, basaltic pumice and ground blast furnace slag. *Constr. Build. Mater.* **135**, 343-351(2017).
10. R. Bala, S. Sharma, Formulation Optimization and Evaluation of Fast Dissolving Film of Aprepitant by Using Design of Experiment. *Bull. Faculty of Pharmacy, Cairo University.* **56**(2), 159-168 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.bfopcu.2018.04.002>
11. M.H. Suhartono, N. Suhermi, D.D. Prastyo, Design of Experiment to Optimize the Architecture of Deep Learning for Nonlinear Time Series Forecasting. *Proc. Computer Sci.* **144**, 269-276 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.528>
12. A. M. Munawar, D.W. Schubert, S.M. Khan, M.A.U. Rehman, N. Gull, A. Islam, A. Sabir, M. Shafiq, B. Haider, M. Azam, S.U. Khan, M.M. Voigt, Investigation of functional, physical, mechanical and thermal properties of TiO₂ embedded polyester hybrid composites: A design of experiment (DoE) study'. *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.* **28**(3), 266-274 (2018).
13. H. Eskandari-Naddaf, M. Azimi-Pour, Performance evaluation of dry-pressed concrete curbs with variable cement grades by using Taguchi method. *Ain Shams Eng. J.* **9**(4), 1357-1364 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.09.004>
14. G. Başar, F. Kahraman, H. Kuş, Bronz Esaslı Kompozit Sürtünme Malzemelerin Üç Nokta Eğme Mukavemetinin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu. *El-Cezeri J. Sci. Eng.* **5**(2), 626-634 (2018). <https://doi.org/10.31202/ecjse.391936>
15. M. Srivastava, S. Rathee, S. Maheshwari, A.N. Siddiquee, Optimisation of friction stir processing parameters to fabricate AA6063/SiC surface composites using Taguchi technique, *IJMPT* **58**, 1, 16-31 (2019).
16. G. Samtaş, S. Korucu, Temperlenmiş Alüminyum 5754 alaşımının frezelenmesinde kesme parametrelerinin Taguchi Metodu kullanılarak optimizasyonu, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi.* **7**, 45-60 (2019). <https://doi.org/10.29130/dubited.423795>
17. M. Uysal, V. Akyuncu, H. Tanyıldızı, M. Sumer, H. Yildirim, Optimization of durability properties of concrete containing fly ash using Taguchi's approach and Anova analysis. *J. Constr.* **17** (3), 364-382 (2019). <https://doi.org/10.7764/RDLC.17.3.364>
18. U. Mohd, G. Pandulu, R. Jayaseelan, Strength evaluation of eco-friendly concrete using Taguchi method. *Mater. Today Proc.* **22** (3), 937-947 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.136>
19. T. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York, 1980.
20. K.R.E., Huizingh, H.C.J. Vrolijk, *Decision Support for Information Systems Management: Applying Analytic Hierarchy Process*, Research Report 95B26, University of Groningen, Research Institute SOM (Systems, Organizations and Management) (1994).
21. TS EN 1015-11, Methods of test for mortar for masonry- Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, Turkish Standardization Institute Ankara (in Turkish), 2013.
22. TS EN 1015-12, Methods of test of mortar for masonry- Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates, Turkish Standardization Institute Ankara (in Turkish), 2016.
23. TS EN 1015-18 Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar, Turkish Standardization Institute Ankara (in Turkish), 2004.
24. TS EN 1015-2, Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortar, Turkish Standardization Institute Ankara (in Turkish), 2000.