

## Właściwości materiałów budowlanych zastosowanych w historycznej konstrukcji murowanej meczetu Hacı Hasan Feyzi

## Properties of the bearing construction materials used in a historical masonry structure of Hacı Hasan Feyzi mosque

**Solak Adem<sup>1</sup>**

Department of Architecture, Faculty of Engineering and Architecture Mehmet Akif Ersoy University, Burdur, Turkey

e-mail: e-mail: [asolak@mehmetakif.edu.tr](mailto:asolak@mehmetakif.edu.tr)

### Streszczenie

Nieuniknione jest określenie zachowania się zabytkowych konstrukcji w przypadku trzęsienia ziemi i podjęcie niezbędnych środków ostrożności w celu ochrony historycznych konstrukcji murowanych, znajdujących się w aktywnej strefie trzęsienia ziemi. Pierwszym etapem oceny wytrzymałości historycznych budynków murowanych na trzęsienia ziemi, jest szczegółowa informacja o takich budynkach. Dlatego też ta praca ma na celu zbadanie właściwości materiałowych historycznego budynku na podstawie badania substancji nierozpuszczalnych w kwasie, oceny pH i przewodnictwa elektrycznego. Ponadto zastosowano rentgenowską spektrometrię fluorescencyjną [XRF] i dyfrakcję rentgenowską [XRD] oraz analizę termiczną [TG/DTG], a także petrograficzną, w celu oznaczenia składu fazowego. Oznaczono także gęstość, masową absorpcję wody, objętościową absorpcję wody, gęstość właściwą, porowatość oraz zbadano wytrzymałość pod obciążeniem jednoosiowym. Ustalono, że występujące większe wtrącenia są kwarcytem, który jest skałą metamorficzną o dużej wytrzymałości na ściskanie, składającą się z minerałów bogatych w krzemionkę. Badane zaprawy murarskie nie wykazują właściwości hydraulicznych, kruszywo nie ma właściwości pucolanowych, a materiałem wiążącym stosowanym w zaprawach, jest stosunkowo czyste wapno.

**Słowa kluczowe:** budownictwo historyczne, kamień budowlany, materiał wiążący, zaprawy wapienne, wytrzymałość

### Summary

It is inevitable to determine the earthquake performance of historical structures and to take the necessary precautions to protect historical masonry structures, located in an active earthquake zone. The first stage of evaluating the earthquake performance of historical masonry buildings is a detailed information about such buildings. Therefore, this study aims to investigate material properties of a historical building by means of acid loss, pH, electrical conductivity, X-ray fluorescence spectrometry [XRF], thermal analysis [TG/DTG], petrographic analysis, X-ray diffraction [XRD], density, mass water absorption, volume water absorption, specific mass, porosity and uniaxial loading tests. It has been determined that stones are quartzite, which is a metamorphic rock with high compressive strength, composed of quartz minerals. Examined masonry mortar does not show hydraulic properties, the aggregates are not pozzolanic aggregates and the binder material used in mortars is pure lime.

**Keywords:** historical building, building stone, binding material, lime mortars, strength

### 1. Wprowadzenie

Historyczne budynki, materiały i technologie budowlane, są cennym świadectwem historii i historii wzornictwa. Ponadto, bogata architektura, którą kraje tworzyły i rozwinęły w czasie, stanowi bezpośrednią dokumentację doświadczeń inżynierskich. Analiza

### 1. Introduction

Historical buildings, building materials and construction technologies, are important documents of the history and design history. In addition, the rich architecture that countries have created and developed over time, is a concrete document of engineering expe-

struktury i składu chemicznego takich form architektonicznych związanych z działalnością ludzką, jest ważna także w przypadku odbudowy i konserwacji obiektów historycznych oraz wzbogacania nowych projektów. Dlatego też, niniejsze opracowanie koncentruje się na właściwościach mechanicznych, fizycznych i chemicznych historycznego budynku, jakim jest meczet Hacı Hasan Feyzi, przed renowacją. Szczegóły dotyczące budynku są podane w następujących punktach.

Budynki posiadające dawne elementy konstrukcyjne tracą z biegiem czasu swoje właściwości funkcjonalne, w wyniku działań spowodowanych przez człowieka i wpływu środowiska. W remontach i pracach konserwatorskich budynków, maksymalne korzyści powinna przynieść świadoma metoda, zastosowana w naprawach. Przy restauracji historycznych budynków oryginalne materiały budowlane muszą być zachowane w stanie nienaruszonym. W przypadku konieczności zastosowania nowego materiału, należy wybrać takie materiały, które są kompatybilne z pierwotnym materiałem budowlanym, pod względem właściwości fizycznych, chemicznych, mechanicznych i estetycznych. Aby wybrać nowe materiały, które są zgodne z tymi właściwościami pierwotnych materiałów, należy najpierw określić właściwości tych oryginalnych materiałów (1-6).

W tych badaniach, celem było określenie właściwości materiałowych zapraw zastosowanych w ścianach, pobranych z historycznego budynku meczetu Hacı Hasan Feyzi, w dystrykcie Pamukkale w prowincji Denizli.

### **1.1. Historyczny meczet Hacı Hasan Feyzi**

Historyczna konstrukcja meczetu Hacı Hasan Feyzi, została zarejestrowana jako starożytne, nieruchome dobro kultury w dniu 07.12.1980 r. Znajduje się on w Kuşpınar, dzielnicy miasta Denizli w dystrykcie Pamukkale. Budynek jest zabytkowym budynkiem z okresu osmańskiego, wybudowanym w 1884 roku – rys. 1.

W celu określenia właściwości materiałowych i strukturalnych tego historycznego budynku, uzyskano niezbędne zezwolenia prawne od Dyrekcji Kultury Prowincji Denizli, umożliwiające przeprowadzenia badań na miejscu.

### **1.2. Charakterystyka historycznego budynku meczetu Hacı Hasan Feyzi**

Meczet znajduje się w północno-wschodnim rogu dużego parku. Na północ od budynku jest fontanna, wykonana z nowych materiałów. Na południu i zachodzie znajdują się groby, które zostały całkowicie odnowione.

Jak widać na szkicu planu meczetu, składa się on z miejsca modlitwy [A], grobowca [B] i ostatniego miejsca zgromadzeń [C, C1, D, D1 i E], w północnej części. Część modlitewna meczetu ma plan kwadratu, a prostokątna część grobowa znajduje się w zachodniej części, tej sekcji. Ostatnie sekcje miejsca zgromadzeń, znajdujące się na północy od miejsca modlitwy i grobowca, zaczynające się od frontu miejsca modlitwy, zostały nazwane jako miejsca C, D i E, zgodnie z kolejnością ich budowy. Meczet

It is important to analyse the structure and chemistry of such constructions for the experience of human being, for restoring and conservation of historical buildings and for enriching new designs. Therefore, this study concentrates on characterization of mechanical, physical and chemical properties of a historical building so called Hacı Hasan Feyzi mosque, prior to restoration. Details of the building are given in the following paragraphs.

Buildings with ancient characteristics lose their functional properties in the course of time, due to activities caused by human and natural events. In the restoration and conservation applications of buildings, maximum benefit should be provided by a conscious intervention method. Original construction materials must be preserved in situ by the interventions to be made in historical buildings. When it is necessary to use new material, which are compatible with the original construction material in terms of physical, chemical, mechanical, and aesthetic properties, must be chosen. In order to choose new materials that are compatible with such properties, first the properties of the original construction materials must be defined (1-6).

In this study, it was aimed to determine the material properties of the wall mortars, taken from the historical Hacı Hasan Feyzi Mosque building in Pamukkale district, the central district of Denizli in Turkey.

### **1.1. Historical Hacı Hasan Feyzi Mosque**

Historical Hacı Hasan Feyzi Mosque structure, which was registered as an immovable cultural asset on 07.12.1980, is located in the Kuşpınar neighborhood of Pamukkale district, which is the central district of Denizli. The building is an Ottoman Period historical building built in 1884 [Fig. 1].

In order to determine the material and structural features of the historical building, the necessary legal permissions were obtained from the Denizli Provincial Directorate of Culture and on-site investigations were carried out.

### **1.2. Features of the historical Hacı Hasan Feyzi Mosque building**

The mosque is located in the northeast corner of a large park. There is also a fountain made of new material to the north of the



Rys. 1. Widok meczetu Hacı Hasan Feyzi przed usunięciem tynku

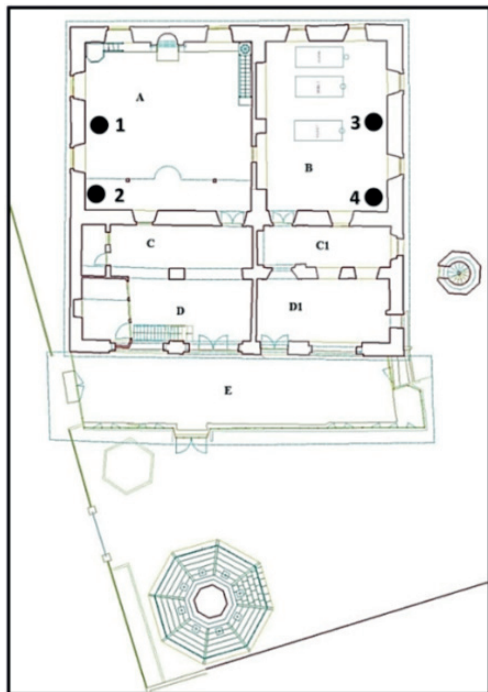
Fig. 1. View of Hacı Hasan Feyzi Mosque before scraping

jest przykryty drewnianym, czterospadowym dachem, pokrytym dachówką. W północno-zachodnim narożniku budynku znajduje się żelbetowy minaret oddzielony od meczetu, a na północy nowa fontanna – rys. 2. Przestrzeń E stanowi wejście do meczetu, który został dobudowany do budowli później, jest pokryta przeszkleniem z żelaznymi połączeniami i ma plan prostokąta. W południowej części terenu E znajdują się dwie bramy, zapewniające dostęp do miejsc D i D1.

Dolna część zewnętrznej poziomej ściany z cegły na południowej, wschodniej i zachodniej stronie budynku, należy do pierwszej fazy budowy w 1884 roku – rys. 3 i 4. Z drugiej strony, z cegieł i z betonu belki drugiego piętra, na północnych końcach ściany wschodniej i zachodniej, wykazują, że te części mogły być zbudowane później, w latach 1950-1970.

### 1.3. Pobieranie próbek z historycznego budynku meczetu Hacı Hasan Feyzi

Głównym elementem nośnym w historycznym meczecie Hacı Hasan Feyzi jest kamień murowany i zaprawa murarska. W celu określenia technologii kamienia i zaprawy stosowanych w budynku, pobrano oryginalne próbki kamienia i zaprawy murarskiej z części miejsca modlitwy [A] i grobowca [B] budynku – rys. 2. Ze względu na to, że prace związane z usuwaniem tynku zostały zakończone w badanym budynku, nie można było pobrać próbek tynku. Przy pobieraniu próbek preferowane były w miarę możliwości nietknięte części budynku, więc wybrano miejsce modlitwy i grobowiec, które w miarę możliwości zachowały autentyczność budynku. Przy po-



Rys. 2. Plan budynku i miejsca poboru próbek

●- Miejsca pobierania próbek, A - Miejsce modlitwy, B - Grób, C-C1-D-D1-E - Miejsce ostatniego zgromadzenia

Fig. 2. Plan of the building and sampling locations

● - Sampling locations, A - Prayer place, B - Tomb, C-C1-D-D1-E - Last congregation place

building. On the south and west, there are graves that have been completely renovated.

As can be seen in the mosque plan sketch, it consists of Prayer Place [A], Tomb [B] and the last congregation place [C, C1, D, D1, and E], in the north. The Prayer Place part of the mosque has a square plan, and the rectangular planned Tomb section is located in the west of this section. The last congregation sections located in the north of the Prayer Place and the Tomb, starting at the front of the Prayer Place, were named as places C, D and E, according to the order of their construction. The mosque is covered with a tiled wooden hipped roof. There is a reinforced concrete minaret, separate from the mosque in the northwest corner of the building and a new fountain in the north - Fig. 2. The E space, which provides the entrance to the mosque, which was added to the structure later, is covered with iron joinery glazing and has a rectangular plan. There are two gates providing access to the D and D1 spaces in the south of the E site.

It is understood that lower part of the outer horizontal brick of the south, east and west sides of the building, belongs to the first building phase in 1884 - Figs. 3 and 4. On the other hand, the brick and second floor concrete beam materials of the northern ends of the eastern and western walls, shows that these parts may have been built later, between 1950-1970.

### 1.3. Sampling from the historical Hacı Hasan Feyzi Mosque building

There are masonry stone and masonry mortar as the main bearing element in the historical Hacı Hasan Feyzi Mosque. In order to determine the stone and mortar technology used in the building, original stone and masonry mortar samples were taken from the Prayer Place [A] and Tomb [B] parts of the building - Fig. 2. Since the scraping work was completed in the studied building, no plaster sample could be taken. In collecting the samples, untouched parts of the building were preferred as much as possible, and the places of Prayer Place and Tomb, which preserved the authenticity of the building as much as possible, were selected. While taking stone and mortar samples, care was taken to ensure that it was exposed to the least environmental effects and the principle of not harming the original materials, was taken as a basis.

The places where the original stone and knitting mortar samples belonging to the Historical Hacı Hasan Feyzi Mosque were taken, are marked on the plan in Fig. 2. Samples were removed from the location in sufficient quantities for experiments and in as large pieces as possible, and the samples were immediately placed in sealed plastic bags and labeled and coded, before the laboratory studies started (7,8).

The samples taken were coded as HHFPS1, HHFPS2, HHFTS3, HHFTS4, HHFPM1, HHFPM2, HHFTM3, HHFTM4. The meanings of the abbreviations made in this coding as follows: The first three letters indicate the name of the historical mosque [HHF = Hacı Hasan Feyzi], the fourth letter the place name [P: Prayer Place, T:





Rys. 3. Różnice w fakturze i dylatacjach ścian wschodnich budynku

Fig. 3. Building eastern wall texture differences and dilatations

bieraniu próbek kamienia i zaprawy zwracano uwagę na to, aby były one narażone na jak najmniejsze oddziaływanie środowiska, a za podstawę przyjęto zasadę, aby nie uszkodzić oryginalnych materiałów.

Miejsca, w których pobrano oryginalne próbki kamienia i zaprawy murarskiej z historycznego meczetu Hacı Hasan Feyzi, zaznaczone są na planie na rys. 2. Próbkę zostały pobrane w ilości wystarczającej do doświadczeń i w możliwie dużych kawałkach. Przed rozpoczęciem badań laboratoryjnych zostały natychmiast umieszczone w szczelnie zamkniętych plastikowych workach, oznakowane i zakodowane (7, 8).

Pobrane próbki zostały zakodowane jako HHFPS1, HHFPS2, HHFTS3, HHFTS4, HHFPM1, HHFPM2, HHFTM3, HHFTM4. Znaczenie zastosowanych skrótów jest następujące: pierwsze trzy litery oznaczają nazwę historycznego meczetu HHF = Hacı Hasan Feyzi. Czwarta litera dotyczy nazwy miejsca – P: miejsce modlitwy, T: grobowiec, piąta litera oznacza nazwę materiału – S = kamień, M = zaprawa, a szósta cyfra to numer próbki.

## 2. Badania doświadczalne na oryginalnych próbkach

### 2.1. Określenie właściwości chemicznych

Analizy chemiczne są metodami badawczymi, które powinny być stosowane w niektórych przypadkach razem z analizami mineralogicznymi, w celu pełnego określenia składu oryginalnych próbek.

#### 2.1.1. Części rozpuszczalne w kwasie i analiza sitowa

Oznaczenie części rozpuszczalnych w kwasie w historycznych zaprawach jest przeprowadzane w celu określenia stosunku wapna będącego spoiwem i drobnego kruszywa, bogatego w krzemionkę. Wapno, które reaguje z 10% rozcieńczonym HCl użytym do analizy, jest rozpuszczane w wodzie i filtrowane przez bibułę filtracyjną, a kruszywo krzemionkowe, które nie reaguje z kwasem, pozostaje na bibule filtracyjnej (9). Na koniec doświadczenia oblicza się stosunek wapna do kruszywa w zaprawie, na podstawie pomiaru



Rys. 4. Różnice w fakturze i dylatacjach ściany zachodniej budynku

Fig. 4. Building western wall texture differences and dilatations

Tomb], the fifth letter the material name [S = Stone, M = Mortar], and the sixth digit the sample number.

## 2. Experimental Studies on Original Samples

### 2.1. Determination of Chemical Properties

Chemical analyses are the test methods that should be applied together with mineralogical analyses, to determine the composition of the original samples.

#### 2.1.1. Loss in acid and sieve analysis

Acid loss analysis in historical mortars is made to determine the ratio of lime used as binder and fine aggregate based on silica. Lime, which reacts with 10% diluted HCl used for analysis, is dissolved in water, and filtered through the filter paper, and the silica-based aggregate, which is not affected by acid, remains on the filter paper (9). At the end of the experiment, the lime / aggregate ratio in the mortar is calculated, according to the mass measurement made on the material remaining on the filter paper. It has been observed in the literature that acid loss analysis was performed at different sample masses [10-70 g] and at different mixing times [1-20 hours] (10, 11).

In this study, in order to determine the binder/aggregate ratio of the mortar samples, at least 50 grams of powder samples were taken from the mortar samples. Powder samples placed in the beaker were mixed with 10% diluted HCl for 60 minutes, after waiting for 1 hour, the loss rate in acid was determined, by filtering through the filter paper.

In order to determine the particle size distribution of the aggregates contained in the examined mortars, a sieve analysis was performed on the remaining part on 40 µm filter paper, after acid loss analysis. By recording the masses of the oven-dried aggregates, they were sieved through sieves with square holes with 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125, 0.063 mm mesh size and the percentage of

masy materiału, pozostałego na bibule filtracyjnej. W literaturze stwierdzono, że analiza straty w środowisku kwasowym była przeprowadzana przy różnej masie próbki (10-70 g) i w różnym czasie [1-20 godzin] (10, 11).

W tym badaniu, w celu określenia stosunku spoiwa do kruszywa w próbkach zaprawy, z próbek zaprawy pobrano co najmniej 50 gramów próbek, w proszku. Próbki w proszku mieszano w zlewce z 10% rozcieńczonym HCl, przez 60 minut. Po odczekaniu 1 godziny określano udział części rozpuszczalnych w kwasie, przesączając przez bibulę filtracyjną.

W celu określenia składu ziarnowego kruszywa zawartego w badanych zaprawach, po rozpuszczeniu w kwasie, wykonano analizę sitową części materiału pozostałej na bibule filtracyjnej 40  $\mu\text{m}$ . Po zapisaniu masy wysuszonego w suszarce kruszywa, przesiewano je przez sита z kwadratowymi otworami, o wymiarach oczek 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125, 0,063 mm i obliczano procent materiału, przechodzącego przez te sита (12). Dane uzyskane ze składu ziarnowego kruszywa są podane w tablicy 1, w procentach masy.

### 2.1.2. pH, przewodność elektryczna, ilość soli rozpuszczalnych w wodzie, pułcolana

Badając wartości pH ustalono, czy zaprawy mają słabe właściwości zasadowe. Ilość soli rozpuszczalnych w wodzie, zawartych w próbkach zapraw i stopień zasolenia zapraw, ustalono przez pomiar przewodności elektrycznej (13,14). W celu oznaczenia całkowitej zawartości soli w próbkach; mieszano 10 gramów pobranej próbki z 50 ml wody a następnie odwirowywano przez 1 godzinę i filtrowano, a następnie dodano do niej standardowy heksametafosforan sodu. Całkowita zawartość soli w przygotowanych do analizy próbkach została zarejestrowana za pomocą konduktometru SensION 1 marki HACH i cyfrowego zestawu do pomiaru przewodności – rys. 5., Wyniki otrzymano w procentach masowych, przy zastosowaniu odpowiednich równań (15 - 17).

Są dwie metody do określenia, czy kruszywa w zaprawach stosowanych w budynkach historycznych są pułcolanowe czy nie. W pierwszej usuwa się węglany, krzemiany i gliniany, za pomocą oddziaływania kwasów i zasad, pozostała część to krystaliczne stadia pułcolanowe, są one łatwo wykrywalne za pomocą XRD. Drugą metodą jest badanie aktywności pułcolanowej. Pierwsza metoda została zastosowana w tym badaniu.

### 2.1.3. Określenie składu chemicznego za pomocą analizy XRF

Analiza XRF jest często stosowana do określania składu pierwiastkowego materiałów. Dzięki technice XRF pomiary dokonywane są w krótkim czasie, przy małych kosztach, bez uszkodzenia materiału, w sposób szybki, precyzyjny i niezawodny. Dlatego jest ona szeroko stosowana w badaniach naukowych i technologicznych (18, 19). Badane próbki zaprawy zostały przygotowane w formie próbek proszkowych –  $d < 90 \mu\text{m}$ , na Politechnice Istambulskiej - Pracownia Badawcza Geochemii, a analizy XRF przeprowadzono za pomocą urządzenia marki BRUKER, model S8 Tiger. Wyniki

material passing through the sieve was calculated (12). The data obtained from the size distributions of the aggregates are given in the table as %.

### 2.1.2. pH, electrical conductivity, amount of water-soluble salts, pozzolana

By examining the pH values, it was determined whether the mortars had weak base properties. The amount of water-soluble salts contained in the mortar samples and the salinity degree of the mortars were found, by electrical conductivity measurement (13,14). For the determination of total salt measurement in samples; 10 grams of sample taken in 50 ml of water was centrifuged for 1 hour and filtered, and standard sodium hexametaphosphate was added to it. The total salt contents of the samples prepared for analysis were recorded with the HACH SensION 1 pH conductivity meter and digital conductivity measurement set (Fig. 5), the results were obtained as a percentage by weight, using the relevant equations (15,16,17).



Rys. 5. pH-metr i cyfrowy zestaw do pomiaru przewodnictwa

Fig. 5. pH meter and digital conductivity measurement set

There are two methods for determining whether the aggregates in the mortars, used in historical buildings are pozzolan or not. In the first one, carbonates, silicates and aluminates are removed with acid and base attacks, the remaining part is the crystal stages of pozzolan, these are easily detected by XRD. The second method is the pozzolanic activity test. The first method was used in this study.

### 2.1.3. Determination of Chemical Composition by XRF Analysis

XRF analysis is frequently used to determine the elemental composition of materials. With the XRF technique, measurements are made in a short time at low cost without damaging the material in a fast, sensitive and reliable way. Therefore, it is widely used in scientific and technological research (18,19). The examined mortar samples were prepared in the form of powder samples [ $d < 90 \mu\text{m}$ ] in the Istanbul Technical University [ITU] -Geochemistry Research Laboratory and XRF analysis were performed using the BRUKER S8 Tiger model device. Analysis results are given as the elemental components of the samples, in terms of oxide and their percentage by mass.



analizy podawane są jako składniki pierwiastkowe próbek, w prze-  
liczeniu na tlenki i ich udział procentowy w masie.

#### **2.1.4. Właściwości hydrauliczne zapraw murarskich na podstawie analizy termogravimetrycznej**

W celu określenia właściwości hydraulicznych badanych, historycz-  
nych zapraw budowlanych, przeprowadzono analizę termogravi-  
metryczną, za pomocą urządzenia Perkin Elmer Diamond TG/DTG,  
na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Pamukkale.

Termogravimetria jest ogólnie stosowana do określenia utra-  
ty masy [TG] i szybkości utraty masy [DTG], które następują  
w materiałach, w funkcji temperatury. Analizy przeprowadzono  
przy szybkości ogrzewania 20°C/min i w przedziale temperatur  
40-800°C, z użyciem ceramicznych pojemników, na próbki w śró-  
dowisku azotu. W trakcie analizy i po jej zakończeniu, za pomocą  
oprogramowania uzyskuje się dane i wykres spadku masy [TG],  
w zależności od temperatury lub czasu. Dodatkowo dane doty-  
czące szybkości zmiany masy w formie wykresu, są dostarczane  
jako pochodna zmiany masy [DTG] (20).

W wyniku analizy, w tym chemicznej utraty wody w hydratách  
krzemianów i glinianów wapnia, w zakresach 200-600°C i 600-  
900°C, określono w procentach utratę masy, w wyniku utraty  
dwutlenku węgla pochodzącego z węglanu wapnia (21, 22). Wła-  
ściwości hydrauliczne zapraw są oceniane na podstawie stosunku  
procentowego utraconego dwutlenku węgla i wody [CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O].  
Jeśli stosunek ten wynosi od 1 do 10, przyjmuje się, że zaprawy  
wykazują właściwości hydrauliczne, a jeśli przekracza 10, to nie  
wykazują właściwości hydraulicznych (22 - 26).

### **2.2. Określenie składu mineralogicznego**

Badania mineralogiczno-petrograficzne próbek, przeprowadzono  
za pomocą mikroskopii optycznej i XRD.

#### **2.2.1. Analiza petrograficzna**

Analiza petrograficzna jest metodą, która pomaga określić teksturę  
i skład mineralny próbek kamienia i zaprawy. Cienkie przekroje  
próbek kamienia budowlanego i zaprawy, zostały przygotowane  
w Laboratorium Cienkich Przekrojów Katedry Inżynierii Geologicz-  
nej PAU. Najpierw próbki zostały wysuszone i oczyszczone z pyłów.  
Wysuszone próbki impregnowano polimerem epoksydowym, w wa-  
runkach próżni i pocięto na cienkie plasterki, a następnie przykle-  
jono do szkiełek, za pomocą polimeru epoksydowego. Następnie  
próbka była polerowana, w urządzeniu do cienkich preparatów.

Badania cienkich przekrojów przeprowadzono w Laboratorium  
Mineralogii Optycznej Wydziału Inżynierii Geologicznej PAU, pod  
mikroskopem polaryzacyjnym „Leica DM750P” – rys. 6. W wyniku  
analizy petrograficznej określono skład mineralogiczny badanych  
próbek i uzyskano ważne wnioski dotyczące użytych surowców  
(27).

#### **2.1.4. Hydraulic properties of mortars by thermographic analysis**

In order to determine the hydraulic properties of the examined histo-  
rical building mortars, thermogravimetric analysis was performed,  
with a completely computer-controlled Perkin Elmer Diamond TG  
/ DTG brand device, in the Mechanical Engineering Department  
of Pamukkale University.

Thermogravimetry [TG] is generally used to determine the mass  
loss and mass loss rate [DTG] that occur in materials, as a function  
of temperature. Analysis were carried out using 20°C/min heat-  
ing rate and 40-800°C temperature interval, with ceramic sample  
containers in nitrogen environment. During and after the analysis,  
the data and graph of mass loss due to temperature or time are  
obtained using software. In addition, mass change rate data and  
graph, are provided as the derivative of mass change [DTG] (20).

As a result of the analysis, the chemically bounded water in calcium  
silicate / aluminate hydrates evolved in the range of 200-600°C was  
determined. Mass loss in the range 600-900°C, may be associated  
with carbon dioxide originating from calcite thermal decomposition,  
and was determined in percent (21,22). The hydraulic properties  
of mortars were evaluated by the ratio of lost carbon dioxide and  
water percentages (CO<sub>2</sub> / H<sub>2</sub>O). If this ratio is between 1 and 10,  
it is accepted that the mortars show hydraulic properties, and if  
they are above 10, they do not show hydraulic properties (22-26).

### **2.2. Determination of mineralogical properties**

Mineralogical-petrographic studies on the examined samples were  
carried out, by using optical microscopy and XRD examination  
techniques.

#### **2.2.1. Petrographic analysis**

Petrographic analysis is a method that helps to determine the tex-  
ture and minerals of stone and mortar samples. Thin sections of  
the building stone and mortar samples were prepared in the Thin  
Section Laboratory of the Department of Geological Engineering  
of PAU. First, the dusts on some sample in mass form to represent  
the petrographic properties of the material to be examined, were  
cleaned and dried. The dried specimens were impregnated with  
epoxy polymer under vacuum and cut into thin slices in the head  
cutting device and adhered to the slides with epoxy polymer. Then it  
was polished in the thin section device, after the necessary cutting  
and thinning processes.

Thin section examinations were carried out in the Optical Minera-  
logy Laboratory of the PAU Geological Engineering Department,  
under the “Leica DM750P” branded polarized microscope [Fig. 6].  
As a result of the petrographic analysis, the mineralogical compo-  
sition of the examined samples were determined and important  
findings were obtained regarding the raw materials used (27).

### 2.2.2. Analiza XRD

Analiza za pomocą rentgenografii, została przeprowadzona w celu zbadania w próbkach zaprawy składników o mniejszych rozmiarach, których nie można było oznaczyć pod mikroskopem optycznym. Analizy XRD, przeprowadzono w Pracowni Badań Geochemicznych Politechniki Stambulskiej, przy użyciu aparatu BRUKER D8 Advance z detektorem LyneEye. Skład mineralogiczny przygotowanych próbek proszkowych [ $d < 90 \mu\text{m}$ ] określono jakościowo. Analizy XRD pozwoliły na oznaczenie minerałów krystalicznych, na podstawie otrzymanych dyfraktogramów (28).

### 2.3. Badanie właściwości fizycznych i mechanicznych

Właściwości fizyczne i mechaniczne dostarczają ważnych informacji w badaniach próbek budowlanych i zapraw.

W celu określenia właściwości fizycznych próbek kamienia i zaprawy, wykonano badania absorpcji wody i piknometryczne oznaczenie gęstości właściwej, przy użyciu metody normowej według TS 699 oraz określono masowe i objętościowe współczynniki absorpcji wody [Sk, Sh], gęstość pozorną [ $\Delta$ ], gęstość rzeczywistą [ $\delta$ ], a także porowatość [P] próbek (29).

W celu określenia właściwości mechanicznych badanych materiałów oryginalnych z kamienia i zaprawy zbadano wytrzymałość pod obciążeniem jednoosiowym, za pomocą prasy hydraulicznej marki Tonitechnic, przedstawionej na rys. 7 i 8. Określono wytrzymałość na ściskanie [ $\sigma$ ] próbek z kamienia i zaprawy (30, 31).

## 3. Wyniki doświadczeń i dyskusja

### 3.1. Wyniki analizy chemicznej

#### 3.1.1. Wyniki analizy strat w środowisku kwasowym

Pozostałości próbek zaprawy, które nie reagowały z kwasem i pozostały na bibule filtracyjnej, wysuszono w piecu i stwierdzono, że stosunek spoiwa do kruszywa wynosi od 1/1 do 2/3, w stosunku do stosunku strat w kwasie – tablica 1.

Uygun (32) w swoich badaniach zapraw i tynków stosowanych w meczetach Kaya Bey, İbrahim Bey i Halhallı w Balıkesir uzyskał stosunek wapna do kruszywa w zakresie odpowiednio 1/3, 1/4, 1/5. W swoich badaniach nad zaprawami z okresu bizantyjskiego, należącymi do pozostałości budowli, ustalili, że stosunek wapna do kruszywa w zaprawach mieścił się w zakresie 1/4-1/5, a stosunek wapna do kruszywa w próbkach zaprawy z okresu osmańskiego, obranych z meczetu Divriği Ulu mieścił się w zakresie 1/5-1/7. Widać, że wartości te są niższe niż wyniki badanych próbek zapraw (32, 33).

Analizowano również różne badania podane w literaturze. W swoich badaniach Dayı (34) ustalili, że nierozpuszczalne w kwasie proporcje B/A historycznej konstrukcji łaźni Sungurpaşa, oryginalnych zapraw murarskich wahają się między 1/1 a 1/3, a Öngen w próbce z zamku Aydos, ustalili, że proporcje straty w kwasie wahają się



Rys. 6. Mikroskop stosowany w analizie cienkich próbek

Fig. 6. Polarized microscope used in thin section analysis

### 2.2.2. XRD analysis

X-Ray Diffraction [XRD] analysis, were carried out in order to detect smaller-sized components that could not be determined during optical microscopy studies in mortar samples. XRD analysis, was performed at the Istanbul Technical University Geochemistry Research Laboratory using the BRUKER D8 Advance model and the device with the LyneEye detector and the minerals contained in the prepared powder samples [ $d < 90 \mu\text{m}$ ], were qualitatively determined. During the evaluation phase of XRD analysis, minerals in crystalline form were identified, by using the resulting diffraction patterns (28).

### 2.3. Determination of physical and mechanical properties

Physical and mechanical properties provide important information for characterization and conservation studies of building blocks and mortars.

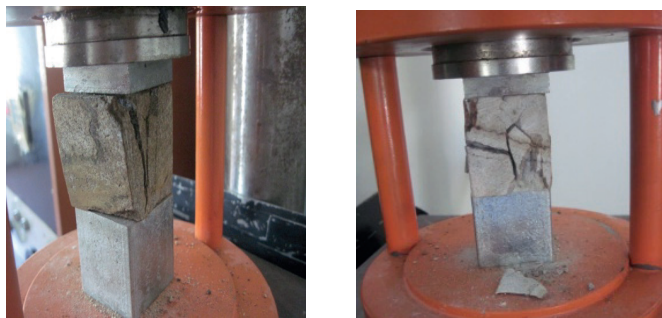
In order to determine the physical properties of stone and mortar samples, water absorption and pycnometer tests were performed, using the TS 699 standard test, the mass and volume water absorption rates [Sk, Sh], apparent density [ $\Delta$ ], true density [ $\delta$ ], porosity [P] values of the samples were determined (29).

In order to determine the mechanical properties of the examined stone and mortar original materials, the uniaxial loading test was performed with the Tonitechnic brand mechanical test device, given in Figs 7 and 8. At the end of the test, the compressive strength [ $\sigma$ ] of the stone and mortar samples was determined (30,31).



Rys. 7. Prasa hydrauliczna użyta do badania próbek zapraw

Fig. 7. Hydraulic press used for mortar samples testing



Rys. 8. Badanie próbek kamieni

Fig. 8. Examination of stone samples

między 1/2 a 1/1. Widać, że są one podobne do wyników z niniejszych badań (34, 35).

Zgodnie z wynikami analizy sitowej, w celu określenia składu ziarnowego kruszywa pozostałego na papierze filtracyjnym po analizie strat w środowisku kwasowym, maksymalna wielkość ziarna kruszywa wynosi 8,0 mm, a kruszywo drobne [d <4 mm] stanowi największą część, około 82% masowo [tablica 1]. Widać, że stosunek cząstek pyłów i ilów w kruszywie – frakcja poniżej 0,063 mm, wynosi około 33%. Tak duży udział pyłów i ilów w kruszywie negatywnie wpływa na przyczepność, zwiększa zapotrzebowanie na wodę i powoduje niską wytrzymałość. Wartości te są podobne do wartości podawanych w literaturze (32, 36-41).

### 3.1.2. Wyniki przewodności elektrycznej, całkowitej ilości soli rozpuszczalnych w wodzie, pH, badań pucołanowości

Określono wartości pH i przewodność elektryczną próbek zaprawy oraz całkowitą ilość soli rozpuszczalnej w wodzie. Wartości pH próbek mieszczą się w przedziale 7,7-7,9, co świadczy o słabo zasadowych warunkach środowiska. Wskazuje to na znaczną karbonatyzację próbek.

Średnia przewodność elektryczna tych samych próbek zaprawy w temperaturze 25°C została zmierzona jako 0,378 mmho/cm, i jest oczywiste, że ta wartość jest bardzo niska. Na podstawie wartości EC25 stwierdzono, że całkowita ilość soli rozpuszczalnej w wodzie, zawartej w zaprawach, jest bardzo niska, średnio 0,12%. W związku z tym badane zaprawy mają bardzo niską zawartość soli.

Produkty hydratacji w postaci faz C-S-H i C-A-H powstające w reakcji wapna z kruszywem nie zostały zaobserwowane w obrazach

Tablica 1 / Table 1

STOSUNEK CZĘŚCI ROZPUSZCZALNYCH DO CZĘŚCI NIEROZPUSZCZALNYCH ORAZ UZIARNIENIE KRUSZYWA W BADANYCH ZAPRAWACH  
ACID LOSS-BINDER / AGGREGATE RATIOS, AGGREGATE GRAIN SIZE DISTRIBUTION I INVESTIGATED MORTARS

Sample / Próbką	Acid loss Ratio Stosunek części rozpuszczalnych do części nierozpuszczalnych, %	B/A ratio Stosunek B/A, -	Percentage passing through the sieve / Przepad, %						
			8.0 mm	4.0 mm	2.0 mm	1.0 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.063 mm
HHFPM1	50	1/1	100	84	75	65	55	53	35
HHFPM2	47	1/1	100	80	72	60	50	45	30
HHFPM3	40	2/3	100	82	74	62	54	50	33
HHFPM4	42	2/3	100	85	75	66	58	48	31

## 3. Experimental Results and Discussion

### 3.1. Chemical Analysis Results

#### 3.1.1. Acid Loss Analysis Results

The parts of the mortar samples that did not react with acid and remained on the filter paper, were dried in the oven and the binder / aggregate ratio was found to be between 1/1 and 2/3, from the loss ratio in the acid [Table 1].

Considering the studies in the literature, Uygun (32) has obtained the lime / aggregate ratio in the range of 1/3, 1/4, 1/4, respectively, in his study on the mortars and plasters used in Kaya Bey, İbrahim Bey and Halhallı Mosques in Balıkesir. In his study on the Byzantine period mortars belonging to the building remains, he determined that the lime / aggregate ratio in the mortars was in the range of 1/4-1/5, and the lime / aggregate ratio in the Ottoman period mortar samples taken from the Divriği Ulu Mosque, was between 1/5-1/7. It is seen that these values are lower than the results of mortar samples examined (32,33).

Different studies in the literature have also been examined. In his study, Dayı (34) determined that the acid-insoluble B / A ratios of the historical Sungurpaşa bath structure original masonry mortars range between 1/1 and 1/3, and Öngen (35), in the Aydos Castle sample, determined that the acid loss rates vary between 1/2 and 1/1. It is seen that there are similar results with the present study (34,35).

According to the sieve analysis results to determine the particle size distribution of the aggregates, remaining on the filter paper after acid loss analysis, the maximum aggregate particle size is 8.0 mm and fine aggregates [d <4 mm], constitute the largest part of all aggregates, around 82% by mass [Table 1]. It is seen that the clay and silt ratio of the aggregates below 0.063 mm is around 33%. Having such an excess of clay-silt ratio of aggregate negatively affects adherence, increases water requirement and causes low strength. These values are similar to the values in the literature (32,36-41).

#### 3.1.2. Results of electrical conductivity, total salt soluble in water, pH, pozzolana

The pH values and electrical conductivity of the mortar samples and the total amount of salt soluble in water, were determined.



dyfrakcji XRD (rys. 15 i 16). Wynik ten wskazuje, że kruszywa stosowane w zaprawach, nie wykazują właściwości pucolanowych.

### 3.1.3. Wyniki analizy chemicznej

Metodą XRF oznaczono zawartość składników tlenkowych substancji w zaprawach budowlanych i określono ich właściwości chemiczne, a wyniki analizy podano w tablicy 2.

Próbki zawierają dużo CaO i SiO<sub>2</sub> oraz mniejsze ilości Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, K<sub>2</sub>O i Na<sub>2</sub>O. Ponadto zaobserwowano pierwiastki śladowe Co - 0,0013%, Cu - 0,004%, Ni - 0,015%, S - 0,04%, Sr - 0,04%. Stwierdzenie w wyniku analizy bardzo wysokiego poziomu CaO i niskiego poziomu MgO w składzie zaprawy jest ważną wskazówką, że użyte wapno zostało uzyskane przy użyciu czystych kamieni wapiennych, a nie dolomitowych. Fakt, że zawartość Na<sub>2</sub>O jest bardzo niska, a Cl zerowa, wskazuje na to, że badane zaprawy nie zawierają soli.

### 3.1.4. Wyniki analizy termogravimetrycznej

Hydrauliczne zaprawy wapienne uzyskuje się przez zastosowanie wapna hydraulicznego, lub przez zmieszanie czystego wapna z kruszywem pucolanowym. Hydrauliczne zaprawy wapienne zyskują na wytrzymałości dzięki tworzeniu się hydratów wapniowo-krzemianowych [faza C-S-H] i uwodnionych glinianów wapnia [C-A-H], w wyniku reakcji reaktywnych krzemionki i tlenku glinu z wodorotlenkiem wapnia (42). Informacje o właściwościach hydraulicznych zapraw uzyskano za pomocą analizy termogravimetrycznej.

W tych analizach określono i podano w tablicy 3 straty masy wynikające z oddzielenia wody związanej chemicznie, w produktach reakcji, a mianowicie C-S-H i C-A-H w temperaturze 200-600°C oraz procentowe straty masy, obserwowane w wyniku uwalniania się gazowego dwutlenku węgla, podczas rozkładu węglanu wapnia, powyżej 600°C. Dodatkowo, jako przykład, na rys. 9 przedstawiono krzywe TG i DTG, otrzymane w wyniku analizy termogravimetrycznej.

Tablica 2 / Table 2

#### SKŁAD CHEMICZNY ZAPRAW

#### CHEMICAL COMPOSITION OF MORTARS

Component / Składnik, %	HHFPM1	HHFPM2	HHFTM3	HHFTM4
SiO <sub>2</sub>	11.22	10.99	13.24	12.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.55	2.68	2.66	2.46
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.88	1.81	2.00	2.02
MgO	2.29	2.36	3.04	3.09
CaO	48.65	49.33	47.03	48.00
Na <sub>2</sub> O	0.15	0.15	0.15	0.16
K <sub>2</sub> O	0.42	0.36	0.43	0.44
TiO <sub>2</sub>	0.20	0.19	0.20	0.22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.07	0.05	0.05
MnO	0.03	0.02	0.03	0.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.03	0.04	0.04
LOI	32.34	32.01	30.92	31.25

The pH values of the samples are between 7.7 and 7.9 reflecting the weak basic environment conditions. It indicates the significant carbonation of the samples.

The average electrical conductivity of the same mortar samples at 25°C was measured as 0.378 mmho/cm, and it is obvious that this value is very low. Using the EC25 value, the total amount of water soluble salt contained in the mortars was found to be very low, on average 0.12%. As a result, the examined mortars have very low salt contents.

C-S-H and C-A-H products formed in the reaction of lime and aggregates, were not observed in XRD diffraction patterns [Figs 15 and 16]. This result indicates that the aggregates used in mortars do not show pozzolanic properties.

### 3.1.3. Chemical analysis

With the XRF method, the % oxide components of the substances in the building mortars were determined and their chemical properties were defined and the analysis results are given in Table 2. According to XRF results, samples contain high levels of CaO and SiO<sub>2</sub> and lower rates of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, K<sub>2</sub>O and Na<sub>2</sub>O. In addition, trace elements Co [0.0013%], Cu [0.004%], Ni [0.015%], S [0.04%], Sr [0.04%], were observed. The determination of very high CaO and low levels of MgO in the mortar composition as a result of the analysis, is an important indication that the lime used was obtained by using pure limestone-based stones, rather than dolomitic stones. The fact that Na<sub>2</sub>O is very low and Cl is zero, indicates that the examined mortars are salt-free.

### 3.1.4. Termogravimetric analysis

Hydraulic lime mortars are obtained by using hydraulic lime, or by mixing pure lime and pozzolanic aggregates. Hydraulic lime mortars gain strength with the formation of calcium-silicate-hydrate - C-S-H phase and hydrated calcium aluminates [C-A-H], as a result of the reaction of active silica and alumina with lime in water (42). Information about the hydraulic properties of the mortars was obtained by TGA analysis.

In these analyses, the mass loss resulting from the evacuation of chemically bounded water in hydraulic reaction products such as C-S-H phase and C-A-H at 200-600°C and the percentage values of the mass loss, observed as a result of the release of carbon dioxide due to decomposition of calcium carbonate above 600°C, were determined and given in Table 3. In addition, as an example the mass loss [TG] and mass loss rate [DTG] curves obtained as a result of the thermogravimetric analysis of the HHFPM1 sample are given in Fig. 9. It is seen that the sample is stable up to approximately 550°C and thermal degradation starts over 550°C.

Sample / Próbką	TG/DTG		
	Chemically bound water Woda związana chemicznie, %	Loss of CO <sub>2</sub> / Ubytek CO <sub>2</sub> , %	Hydraulic property / Właściwości hydrauliczne, CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O, -
HHFPM1	1.51	30.03	19.9
HFPM2	1.91	34.21	17.9
HHFTM3	1.50	32.02	21.4
HHFTM4	2.02	37.13	18.4

trycznej próbki HHFPM1. Widać, że próbka jest trwała do około 550°C, a po 550°C zaczyna się degradacja termiczna.

W związku z tym ustalono, że zaprawy nie były hydrauliczne, ponieważ stosunek CO<sub>2</sub> / H<sub>2</sub>O wynosił ponad 10, we wszystkich badanych próbkach zapraw – tablica 3. Wartości te wydają się być zgodne z wynikami dla typowych próbek zaprawy wapiennej, w badaniu Moropoulou i in. (43).

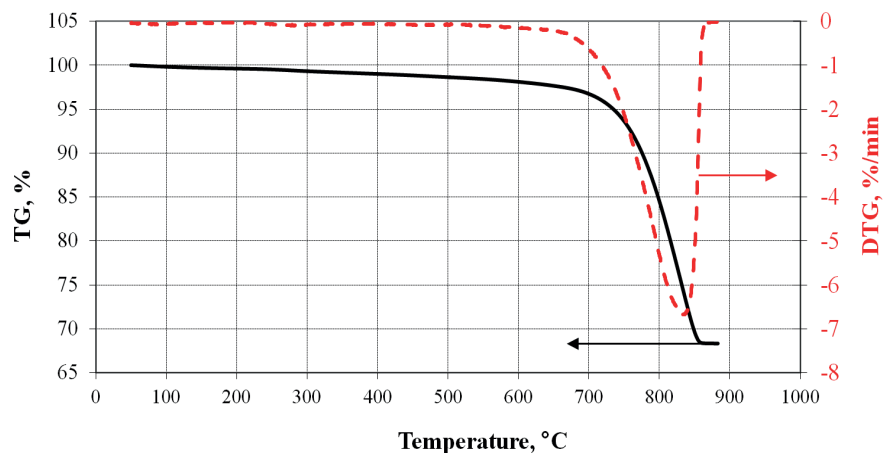
### 3.2. Mineralogiczny skład bloczków budowlanych i zapraw murarskich

#### 3.2.1. Wyniki analizy petrograficznej

W analizie petrograficznej próbek kamienia, z miejsca modlitwy i grobowca meczetu Hacı Hasan Feyzi, wyraźnie zaznacza się kwarcyt, który jest skałą metamorficzną, składającą się w 95% z kwarcu. Nieregularne ziarna kwarcu zazębiają się. Ponadto ustalono, że ziarna kwarcu mają teksturę nieregularną. Jako przykład, obrazy analizy petrograficznej próbki kamienia HHFTS3, są pokazane na rys. 10.

W próbkach zaprawy z miejsca modlitwy w meczecie Hacı Hasan Feyzi – HHFPM1-HHFPM2, w analizie petrograficznej przygotowanego preparatu widoczne były fragmenty skał metamorficznych, głównie kwarcytu, marmuru i łupków mikowych – muskowitu. Jako minerały stwierdzono ziarna kwarcu, kalcytu – marmur i wapień oraz minerały związane z granitem. Znalaziono grudki wapna, które wyglądają jak błoto, zawierające mikropęknięcia jako spoiwo. Sporadycznie obserwowano puste przestrzenie na styku spoiwa i kruszywa [rys. 11].

W analizie petrograficznej preparatów próbek zapraw HHFTM3 i HHFTM4 z grobowca meczetu Hacı Hasan Feyzi stwierdzono, że składa się ona z fragmentów skał metamorficznych, zawierających kwarcyt, marmur i łupki mikowe. Ponadto rozmiary ziaren są mniejsze niż w przypadku miejsca modlitwy. Jako minerały oznaczono ziarna kwarcu, zaokrąglone ziarna kalcytu oraz minerały: biotyty i muskowit, albit i nieliczne fragmenty dolomitu. Jako spoiwo jednoznacznie zidentyfikowano aglomeraty wapienne. Podobnie jak w miejscu modlitwy, pomimo, że połączenia kruszywa ze spoiwem



Rys. 9. Krzywe TG i DTG zaprawy HHFPM1

Fig. 9. TG and DTG curves of the HHFPM1 sample

Accordingly it was determined that the mortars were not hydraulic since the CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O ratio was over 10 in all the mortar samples examined [Table 3]. These values seem to be compatible with the values of typical lime mortar samples reported by Moropoulou et al. (43).

### 3.2. Mineralogical properties of building blocks and mortars

#### 3.2.1. Petrographic analysis results

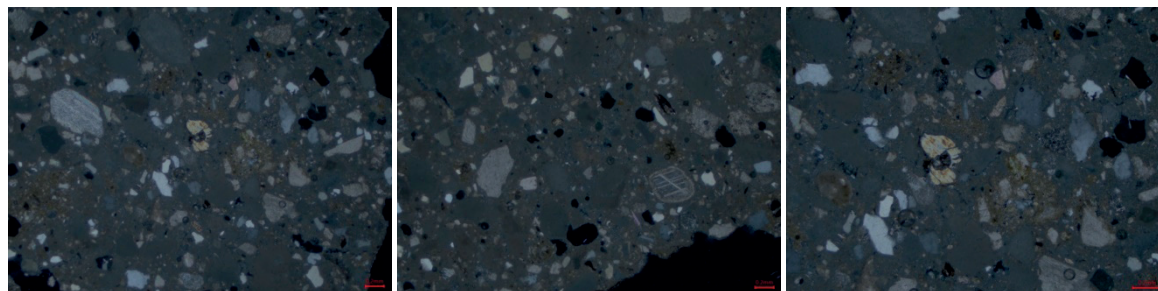
In the thin section petrographic analysis of the stone samples of Hacı Hasan Feyzi Mosque Prayer Place and Tomb it has been clearly observed that it is quartzite, which is a metamorphic rock, composed mainly of quartz [close to 95%]. The boundaries of the quartz grains are intertwined. Moreover, it has been determined that the quartz grains have granoblastic texture. As an example, petrographic analysis images of the HHFTS3 stone sample are given in Fig. 10.

Hacı Hasan Feyzi Mosque Prayer Place mortar samples [HHFPM1 and HHFPM2] petrographic analysis in thin section, revealed metamorphic rock fragments, mainly quartzite, marble and mica schist [muscovite] fragments. Angular-grained quartz, round-grained calcite [marble and limestone] and granite minerals were observed as minerals. Lime lumps that look like mud containing micro-cracks,



Rys. 10. Zdjęcia mikroskopowe analizy petrograficznej kamieni z próbki HHFTS3

Fig. 10. Petrographic analysis images of the HHFTS3 stone sample



Rys. 11. Analiza petrograficzna zaprawy HHFPM1

Fig. 11. Petrographic analysis images of the HHFPM1 mortar sample



Rys. 12. Analiza petrograficzna zaprawy HHFTM3

Fig. 12. Petrographic analysis images of the HHFTM3 mortar sample

są generalnie dobre, stwierdzono, że miejscami występują w nich puste przestrzenie – rys. 12.

### 3.2.2. Wyniki analizy rentgenowskiej

Ze względu na to, że w analizie petrograficznej preparatów próbek kamiennych wyraźnie stwierdzono, że blokiem budowlanym zastosowanym w budynku jest kwarcyt, który jest skałą metamorficzną, analiza XRD próbek kamiennych nie była potrzebna.

Za pomocą analizy rentgenograficznej zbadano zarówno drobne części, jak i frakcje zbite, próbek zaprawy. Na rys. 15 i 16 przedstawiono przykładowe rentgenogramy, odpowiednio cienkiej części próbki HHFTM3 i frakcji zbitej próbki HHFPM1.

W analizie XRD cienkich próbek zaprawy, poniżej 63 mikrometrów, znaleziono przeważnie kalcyt, a w mniejszej ilości kwarc, dolomit, mikię, albit i minerały ilaste.

W analizie XRD frakcji zbitych, powyżej 63 mikrometrów, w próbkach zaprawy oznaczono dominujące minerały: kalcyt i kwarc oraz mniejsze ilości miki, albitu, dolomitu i minerałów ilastych.

as binders have been identified. Occasionally voids were observed at the interface between the binder and the aggregate [Fig. 11].

In thin section petrographic analysis of mortar samples HHFTM3 and HHFTM4 of Hacı Hasan Feyzi Mosque Tomb; It has been observed that it consists of metamorphic rock fragments, containing quartzite, marble and mica schist. It has been observed that the grain sizes are smaller than at the Prayer Place. Angular-grained quartz, round-grained marble and mica [biotite and muscovite], albite and few dolomite fragments were identified as minerals. Platy lime agglomerates were clearly identified as binders. As in the Prayer Place, it has been determined that they contain voids, although the interfaces between aggregate and binder were generally good [Fig. 12].

### 3.2.2. X-Ray diffraction analysis results

Since it was clearly observed during petrographic examinations, that the building block used in the mosque was quartzite, XRD analysis of the stone samples was not needed.



Fazy C-S-H i C-A-H, powstające w reakcji wapna z kruszywem, nie zostały stwierdzone na dyfraktogramach.

Wapień zawiera głównie dolomit, który składa się z węglanu wapnia i magnezu  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Jeżeli zawartość procentowa dolomitu w wapieniu jest mniejsza niż 10%, to jest on nazywany wapieniem naturalnym (44). Procentowa zawartość dolomitu została określona na około 5%, w próbkach badanych rentgenograficznie – rys. 13 i 14.

Stwierdzono, że kalcyt jest dominującym minerałem, refleksy dolomitu są bardzo małe, a refleksy C-S-H i C-A-H nie są widoczne na rentgenogramie. Te wyniki wykazują, że jako spoiwo w zaprawach zastosowano samo wapno.

Ustalono, że wyniki analizy XRD są zgodne z wynikiem analizy petrograficznej, że dominującymi minerałami są kalcyt i kwarc. Kalcyt stanowi informację, że jako spoiwo stosowane było wapno, natomiast kwarc pozwala stwierdzić, że kruszywa w zaprawach zawierały z reguły minerały bogate w krzemionkę.

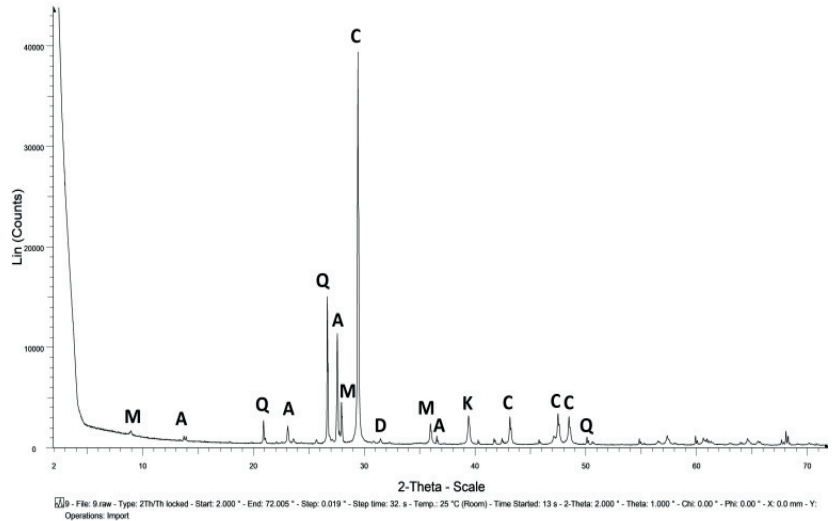
### 3.3. Wyniki analizy fizycznej i mechanicznej

Analizując właściwości fizyczne próbek kamienia otrzymano następujące dane: 2,61-2,67  $\text{gr/cm}^3$  dla gęstości pozornej, 2,65-2,70  $\text{gr/cm}^3$  dla gęstości, 1,69-1,80% dla absorpcji wody objętościowo, 4,02-4,60% dla absorpcji wody objętościowo oraz porowatość w zakresie 1,1-1,8%. Wytrzymałość na ściszenie próbek materiały skalnego mieści się w zakresie 215-240 MPa – Tablicy 4.

Analiza petrograficzna wykazała, że próbki kamieni są skałą metamorficzną – kwarcytem. Jeśli ziarna kwarcu są ze sobą całkowicie połączone, daje to skałę dużą wytrzymałość. Ponadto, ich odporność na ścieranie jest duża, a porowatość bardzo mała. Wyniki zawarte w tablicy 4 pokrywają się z właściwościami skały kwarcytowej (45, 46).

Analizując właściwości fizyczne próbek zaprawy – Tabela 4, ustalono następujące dane: gęstość objętościowa 1,6-1,8  $\text{g/cm}^3$ , gęstość właściwa 2,6-2,8  $\text{g/cm}^3$ , absorpcja wody – masowo: 12-13%, absorpcja wody objętościowo: 21-23%, porowatość około 31-35%. Wartości te są zgodne z wcześniejszymi badaniami, znajdującymi się w literaturze (33, 36, 40, 41).

Wytrzymałość na ściszenie próbek zaprawy mieści się w zakresie 1,1-1,4 MPa – Tabela 4. Stwierdzono, że wytrzymałość na ściszenie jest mniejsza od niektórych danych, zawartych w literaturze (47, 48). Głównymi powodami małej wytrzymałości na ściszenie próbek zaprawy jest brak właściwości pucolanowych kruszywa użytego w zaprawach, w związku z czym spoiwem jest tylko wapno. Ponadto, jak pokazała analiza sitowa, w kruszywie występuje duży

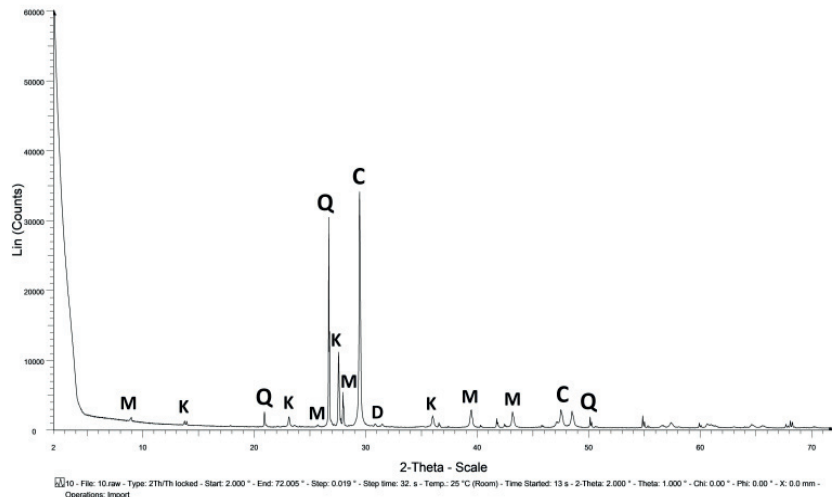


Rys. 13. Dyfraktogram próbki HHFTM3

C: Kalcyt, P: Kwarc, O: Albit, M: Mika, K: Glina, D: Dolomit

Fig. 13. XRD graph of HHFTM3 sample

C: Calcite, Q: Quartz, A: Albite, M: Mica, K: Clay, D: Dolomite



Rys. 14. Dyfraktogram próbki HHFPM1

C: Kalcyt, P: Kwarc, O: Albit, M: Mika, K: Glina, D: Dolomit

Fig. 14. XRD graph of HHFPM1 sample

C: Calcite, Q: Quartz, A: Albite, M: Mica, K: Clay, D: Dolomite

Both the fine parts and aggregates of the mortar samples were examined. In Figs. 15 and 16. the XRD pattern of the thin part of the HHFTM3 sample and the aggregate of the HHFPM1 sample are given as an example, respectively.

In the XRD analysis of the thin parts below 63 micrometers of the mortar samples, the predominantly calcite and the lesser amounts of quartz, dolomite, mica, albite and clay minerals were determined.

In the XRD analysis of the aggregates above 63 micrometers of the mortar samples. the predominantly calcite and quartz minerals, and the lesser amounts of mica, albite, dolomite and clay minerals, were determined.

Tablica 4 / Table 4

PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE I MECHANICZNE KAMIENI I ZAPRAWY  
BASIC PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF STONE AND MORTAR

Sample / Próbką	$\sigma$ , MPa	$\delta$ , g/cm <sup>3</sup>	Sk, %	Sh, %	P, %	$\Delta$ , g/cm <sup>3</sup>
HHFPS1	215	2.70	1.73	4.38	1.8	2.65
HHFPS2	225	2.65	1.69	4.02	1.5	2.61
HHFTS3	240	2.68	1.79	4.45	1.5	2.64
HHFTS4	235	2.70	1.80	4.60	1.1	2.67
HHFPM1	1.1	2.78	12.59	22.83	35	1.81
HHFPM2	1.4	2.67	12.68	21.15	31	1.75
HHFTM3	1.1	2.62	13.01	22.91	34	1.83
HHFTM4	1.3	2.70	12.49	22.45	33	1.77

udział drobnych frakcji pylastych i ilastych, co spowodowało małą wytrzymałość zapraw na ściskanie.

#### 4. Wnioski

Wyniki uzyskane w tych badaniach, które zostały przeprowadzone w celu określenia właściwości materiałów budowlanych, zastosowanych w historycznym budynku meczetu Hacı Hasan Feyzi, można podsumować następująco.

W analizie petrograficznej wykonanej na preparatach mikroskopowych próbek skalnych, które są głównymi materiałami budowlanymi przenoszącymi obciążenia, użytymi w miejscu modlitwy i w części grobowej, ustalono, że kamienie te to kwarcyt, który jest skałą metamorficzną składającą się w około 95% z kwarcu, i stwierdzono, że ziarna kwarcu są dobrze połączone ze sobą i nadają skale dużą wytrzymałość. Podczas badania właściwości mechanicznych próbek kamienia stwierdzono, że ich wytrzymałość na ściskanie wynosiła średnio 225 MPa. Właściwości fizyczne próbek kamienia wynoszą średnio: gęstość objętościowa 2,6 g/cm<sup>3</sup>, gęstość właściwa 2,7 g/cm<sup>3</sup>, masowa absorpcja wody 1,75%, objętościowa absorpcja wody 4,36%, porowatość 1,47%.

Z analiz chemicznych przeprowadzonych na próbkach zapraw, zastosowanymi w miejscu modlitwy i części grobowej, zgodnie z wynikami analizy zawartości części nierozpuszczalnych w kwasie stwierdzono, że stosunek spoiwa do kruszywa w zaprawach wynosi od 1/1 do 2/3. Zgodnie z wynikami analizy sitowej po analizie strat w kwasie, maksymalna wielkość ziarna kruszywa wynosi 8,0 mm, 18% masy wszystkich kruszyw to kruszywo grube – żwir, 82% to kruszywo drobne, a udział składników głównych wynosi: 49% piasek, 33% il i pył.

Stwierdzono, że zmierzone wartości pH próbek zaprawy wynosiły około 7,8 i to w podstawowych warunkach środowiskowych i ustalono, że było to spowodowane zawartym w próbkach spoiwem wapiennym.

Całkowitą ilość soli rozpuszczonych w wodzie stwierdzono na podstawie pomiaru przewodności elektrycznej, na bardzo niskim poziomie 0,12% i ustalono, że badane zaprawy były wolne od soli.

C-S-H and C-A-H products formed in the reaction between lime and aggregates were not observed in XRD diffraction patterns.

Limestone contains mostly dolomite. Dolomite is a type of mineral that contains calcium and magnesium carbonate [CaMg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]. If the percentage of dolomite in limestone is below 10%, it is called natural limestone (44). The percentage of dolomite was determined to be around 5% in the samples examined by the XRD method [Figs. 13 and 14].

The fact that the calcite mineral is dominant, the dolomite peaks are very small and the C-S-H and C-A-H peaks are not present in the pattern, indicate that pure lime was used as a binder in the mortars.

The results of the XRD analysis results are compatible with the result that the calcite and quartz minerals are dominant, obtained from petrographic analysis. The calcite mineral shows that lime was used as a binder, while the quartz mineral indicates that the aggregates in the mortars generally contain silicon mineral.

#### 3.3. Physical and mechanical analysis results

The physical properties of stone samples were as follows: apparent density: 2.61-2.67 g/cm<sup>3</sup>, density: 2.65-2.70 g/cm<sup>3</sup>, water absorption by mass: 1.69-1.80%, water absorption by volume: 4.02-4.60%, porosity was determined to be in the range of 1.1-1.8%. Compressive strength of stone samples was determined to be in the range of 215-240 MPa [Table 4].

In petrographic analysis. it was clearly observed that the stone samples were the metamorphic rock - quartzite. If the quartz grains are fully cemented with each other. it gives the rock a high strength. In addition. their resistance to abrasion is high and their porosity is very low. The values in Table 4 coincide with the properties of the quartzite rock (45,46).

The physical properties of the mortar samples are presented in Table 4. It was found that apparent density was within the range of 1.6-1.8 g/cm<sup>3</sup>, density within the range 2.6-2.8 g/cm<sup>3</sup>, water absorption by mass: 12-13%, water absorption by volume: 21-23%, porosity: 31-35%. These values agree with previous studies in the literature (33,36,40,41).

Compressive strength of mortars was in the range of 1.1-1.4 MPa [Table 4]. It has been determined that the compressive strength is lower than some studies in the literature (47,48). The main reasons for the low compressive strength of the mortar samples are that the aggregates used in the mortars do not have pozzolanic properties and the lime is pure lime. In addition. as a result of the sieve analysis. the excessive clay-silt ratio of the aggregates caused the low compressive strength of the mortars.

Udział składników tlenkowych materiałów w zaprawach budowlanych, zbadane rentgenograficznie, wykazały duży udział CaO i SiO<sub>2</sub>. Stwierdzono bardzo dużą zawartość CaO i małą MgO w składzie zaprawy, co pozwoliło wnioskować, że zastosowane wapno otrzymano z wapienia, a nie z dolomitu i dlatego zastosowane zaprawy budowlane były zaprawami wapiennymi. Ponadto, bardzo mała zawartość Na<sub>2</sub>O, a stosunek Cl nie jest w ogóle widoczny, wskazuje, że materiał jest wolny od NaCl. Wynik ten pokrywa się z pomiarem przewodności elektrycznej.

Na podstawie analizy termogravimetrycznej, przeprowadzonej w celu określenia właściwości hydraulicznych zapraw, stwierdzono, że zaprawy nie wykazują właściwości hydraulicznych, a analizy okazały się zgodne z typowymi analizami próbek zapraw wapiennych.

Na podstawie wyników badań rentgenograficznych i analizy petrograficznej, przeprowadzonych na próbkach zapraw stwierdzono, że badane zaprawy składały się głównie z kalcytu i kwarcu oraz niewielkiej ilości miki, dolomitu i minerałów ilastych. Przy czym tylko kalcyt był oznaczony, jako dominujący w analizie petrograficznej. Kalcyt jest dominującą fazą, refleksy dolomitu są bardzo małe, a refleksy od C-S-H i C-A-H nie są widoczne na rentgenogramach. Wykazuje to, że w zaprawach jako spoiwo zastosowano wapno.

Na styku spoiwa z kruszywem występują pory. Ponadto fazy C-S-H i C-A-H, powstające w reakcji wapna z kruszywem, nie zostały stwierdzone na rentgenogramach, co wykazuje, że kruszywa stosowane w zaprawach, nie wykazują właściwości pucolanowych.

Podczas badania właściwości fizycznych zapraw stwierdzono, że uzyskane wyniki są zgodne z wartościami podawanymi w literaturze, dla podobnych zapraw historycznych. Jednakże wytrzymałość na ścislenie próbek zaprawy była mała. Głównym tego powodem jest brak właściwości pucolanowych kruszywa, stosowanego w zaprawach, a wapno jest jedynym składnikiem spoiwa. Ponadto uważa się, że kruszywa o zbyt dużym udziale cząstek ilastych i pyłowych, wynikających z analizy sitowej, powodują małą wytrzymałość zapraw na ścislenie.

W rezultacie ustalono, że w historycznej strukturze meczetu Hacı Hasan Feyzi, znajdującego się w centrum Denizli i zbudowanego w XIX wieku, jako materiał nośny zastosowano kamienie kwarcytowe oraz zaprawę wapienną, o wyżej wymienionych właściwościach. Stwierdzono, że rodzaj materiału i właściwości określone w świetle tych badań, są danymi krytycznymi w analizach zachowania w czasie trzęsienia ziemi, a także wniosą wkład do literatury dotyczącej właściwości materiałowych budynków historycznych.

## Podziękowania

Chciałbym podziękować Pracowni Badań Geochemicznych ITU za analizę XRF i XRD, członkom wydziału PAU Dr. Nazım Usta i Barış Semiz za analizy TG / DTG i analizę petrograficzną.

## 4. Conclusions

The results obtained in this study, which was conducted to determine the properties of the bearing building materials used in the historical Hacı Hasan Feyzi Mosque building, are summarized below.

In the thin section petrographic analysis performed on the stone samples, which are the main bearing building materials used in the Prayer Place and Tomb parts, it was determined that the stone was quartzite, which is a metamorphic rock, composed of approximately 95% quartz. It was observed that the quartz grains were fully cemented with each other and gave high strength to the rock. Compressive strength was found to be 225 MPa, on average. The physical properties of stone samples were on average; apparent density: 2.6 g/cm<sup>3</sup>, specific density 2.7 g/cm<sup>3</sup>, mass water absorption 1.75%, volume water absorption 4.36%, porosity 1.47%.

The chemical analyses performed on the mortar samples used in the Prayer Place and Tomb parts, revealed from the acid loss analysis results that the binder/aggregate ratio of the mortars was between 1/1 and 2/3. According to the sieve analysis results after the acid loss analysis, the maximum aggregate particle size was 8.0 mm. 18% by mass of all aggregates was coarse aggregate [gravel]. 82% was fine aggregate [49% sand, 33% clay and silt].

It was observed that the measured pH values of the mortar samples were around 7.8 and under basic environmental conditions and it was determined that this was due to the lime binder, contained in the samples.

The total amount of salt dissolved in water was found to be very low 0.12% by electrical conductivity measurement, and it was determined that the examined mortars were of salt-free grade.

The chemical composition of the building mortars were investigated by the XRF method and the high percentage of CaO and SiO<sub>2</sub> were determined. Since the content of CaO was high, while it was low for MgO, it was concluded that the lime used was obtained from limestone-based stones, not from dolomitic stones. Therefore the building mortars used were lime mortars. In addition, the fact that the Na<sub>2</sub>O is very low and the Cl is absent at all, indicates that the material is salt-free. This result coincides with the electrical conductivity measurement.

According to the results of the thermogravimetric analysis, performed to determine the hydraulic properties of the mortars, it was determined that the mortars did not exhibit hydraulic properties, and the analysis values were found to be compatible with the values of typical lime mortar samples.

According to the results of XRD and petrographic analysis carried out on the mortar samples, it was observed that the examined mortars were mainly composed of calcite and quartz and a small proportion of mica, dolomite and clay minerals, while only calcite was determined predominantly in the thin parts of the mortars. The fact that the calcite mineral is dominant, the dolomite peaks are



## Literatura / References

1. K.R. Demircan, G. Kaplan, A.I. Unay, Determination of The Physical and Mechanical Properties of the Materials Used in The Northern City Walls of Historical Sinop Castle. *Mater. Sci. Eng.* **471**, 1-10 (2019). doi:10.1088/1757-899X/471/8/082039
2. Venice. International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites. 1964. <http://www.icomos.org.tr>. (March. 2014)
3. A. Güleç, A. Ersen, Characterization of Ancient Mortars: Evaluation of Simple and Sophisticated Methods. *J. Archit. Conserv.* **1**, 56-67 (1998).
4. H. Böke, S. Akkurt, B. İpekoğlu, Properties of mortars and plasters used in historical buildings. *Struct. J.* **69**, 90-95 (2004).
5. B. Sayı, Determination of Material Properties of Historical Masonry Buildings and Application Recommendations. *Dicle Univ. J. Eng.* **7(3)** 387-398 (2016).
6. A.E. Candeias, P. Nogueira, J. Mirao, A.S. Silva, R. Veiga, M.G. Casal, I. Ribeiro, A.I. Seruya, Characterization of ancient mortars: Present methodology and future perspectives. Chairmen of the European Research Councils. Chemistry Committee. Evora University. National Laboratory of Civil Engineering (LNEC).[www.conservarcal.lnec.pt](http://www.conservarcal.lnec.pt). 2004.
7. P. Ellis, The analyses of mortar: the past 20 years. *Historic Churches*. (2002) [www.buildingconservation.com](http://www.buildingconservation.com).
8. E.S. Goins, Standard practice for determining the components of historic cementitious materials. University of Delaware, USA (2002).
9. I.P. Pekmezci, Characterization of Mortars Used in Some Historical Buildings in Cukurova Region (Cilicia) and Recommendations for Repair Mortars. ITU Institute of Science, PhD Thesis (2012).
10. A. Güleç Investigation of Some Historical Monument Mortars and Plasters. PhD Thesis. Istanbul Technical University Institute of Science, Istanbul (1992).
11. E. Gürdal, G.K. Altaç, S.A. Özgünler, Investigation of the properties of the khorasan mortars used in the early Byzantine religious buildings in Istanbul. *Restoration-Conservation-Archeology and Art History Yearbook*. T.C. Prime Ministry General Directorate of Foundations. Istanbul I. Regional Directorate **2**, 63-72 (2011).
12. TS EN 933-1:2012(EN). Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method.
13. H. Dursun, M.Y. Dizdar, Ş. Kırıştioğlu, İ. Özcan, Y. Hamurkar, Soil and Land Classification Standards Technical Instruction and Related Legislation. Ministry of Agriculture and Rural Affairs General Directorate of Agricultural Production and Development Publication. Ankara (2008).
14. J.M. Teutonico, A Laboratory Manual for Architectural Conservators. ICCROM. Rome. 1988.
15. C.A. Black, D.D. Evans, L.E. Ensminger, J.L. White, F.E. Clark, Methods of Soil Analysis No. 9 in the Series Agronomy. American Society of Agronomy. Inc.. Madison, Wisconsin, USA (1965).
16. N.C. Brady, R.R. Weil, Elements of the Nature and Properties of Soils. 2<sup>nd</sup> ed. Pearson and Prentice Hall. New Jersey, (2004).
17. R.E. Means, J.V. Parcher, Physical Properties of Soils. Charles E. Merrill Publishing Co.. Columbus, Ohio, USA (1963).
18. E.P. Bertin, Principle and Practice of X-Ray Spectrometric Analysis. Second Edition Fourth Printing. Plenum Press, New York, London (1984).
19. H. Willard, J. Dean, L. Merrit Jr., F.A. Settle. Jr., Instrumental Methods of Analysis. Sixth Edition. Van Nostrand Co, New York (1981).
20. B. Aydoğan. N. Nazım Usta, Investigation of the Effects of Barite Addition to Rigid Polyurethane Foam Materials on Thermal Conductivity and Thermal Degradation Behavior. *J. Adv. Techn. Sci.* **7(1)**, (2018).

very small and the C-S-H and C-A-H phases peaks are not present in the XRD pattern, show that pure lime was used as a binder in the mortars. Pores were observed at the interface between the binder and the aggregate. The lack of C-S-H and C-A-H products formed in the reaction between lime and aggregates found by XRD indicates that the aggregates used in mortars do not show pozzolanic properties.

It was found that the physical properties of investigated historical mortars correspond well with data for other mortars of that kind, reported in the literature. However, the compressive strength of the mortar samples was found to be low. The main reason for this is that the aggregates used in mortars do not have pozzolanic properties and lime was the only binder. Furthermore, the aggregates contain large amount of fine particles and clay fraction, which causes a low compressive strength of the mortars.

As a result. It has been determined that in the historical structure of the Hacı Hasan Feyzi Mosque. located in the center of Denizli and built in the 19<sup>th</sup> century. quartzite stones with the above-mentioned properties were used as the carrier material and pure lime mortars. It has been concluded that the material type and properties determined in the light of these study are critical data in the pre-restoration and earthquake performance analyses and will also contribute to the material characterization literature of historical buildings.

## Acknowledgments

I would like to thank ITU Geochemistry Research Laboratory for XRF and XRD analysis, and PAU faculty members Dr. Nazım Usta and Barış Semiz for TG / DTG and Petrographic analysis.

21. G. Biscontin, M.P. Birelli, E. Zendri, Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars. *J. Cultural Herit.* **3**(1), 31–37 (2002).
22. A. Bakolas, G. Biscontin, A. Moropoulou, E. Zendri, Characterization of structural byzantine mortars by thermogravimetric analysis. *Thermochim. Acta.* **321**(1-2), 151–160 (1998).
23. A. Moropoulou, A. Bakolas, K. Bisbikou, Investigation of the technology of historic mortars. *J. Cultural Herit.* **1**(1), 45–58 (2000).
24. A.S. Silva, J.M. Ricardo, M. Salta, P. Adriano, J. Mirao, A.E. Candeias, S. Macias, Characterization of Roman mortars for the historical town of Mertola. Eduardo Torroja Institute (CSIC). Madrid. Spain. [www.conservar-cal.inec.pt](http://www.conservar-cal.inec.pt) (2004).
25. A. Güleç, A. Ersen, Characterization of Ancient Mortars: Evaluation of Simple and Sophisticated Methods. *J. Archit. Conserv.* **1**, 56-67 (1998).
26. RILEM. 2005. Investigative methods for the characterisation of historic mortars. in *Materials and Structures* 38. Part 1 and Part 2. s.761-769. 771-780.
27. B. Middendorf, J.J. Hughes, K. Callebaut, G. Baronio, I. Papayianni, Investigative methods for the characterisation of historic mortars—Part 1: Mineralogical characterisation. *Mater. Struct.* **38**(8), 761-769 (2005).
28. A. Demirer, D. Alaygut, Magmatic Rocks. TPAO Research Center Group Presidency Education Publications **26**, Ankara (1993).
29. TS 699. Methods of Testing for Natural Building Stones. Turkish Standards Institute. Ankara. 1987.
30. TS EN 1926. Natural stone test methods - Determination of uniaxial compressive strength. Turkish Standards Institute. Ankara. 2007.
31. TS EN 1015-11/A1. Methods of Test for Mortar for Masonry- Part 11: Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar. Turkish Standards Institute. Ankara. 2007.
32. Y. Uygun Investigation of Material Properties of Historical Kaya Bey, İbrahim Bey and Halhallı Mosques in Balıkesir. Master Thesis. Balıkesir University Institute of Science and Technology, Balıkesir (2019).
33. S. Ulukaya, Production of New Materials Suitable for Historical Lime Mortar Properties and Determination of Material Parameters for Numerical Analysis. PhD Thesis. **Yıldız Technical University**, Institute of Science (2016).
34. M. Dayı, Investigation of Khorasan Mortar Used in Historical Buildings and Production of Alternative Khorasan Mortar. PhD Thesis. Gazi University Institute of Science and Technology, Ankara Turkey (2017).
35. S. Öngen, N. Aysal, M. Baykayır, M.O. Şahin, Aydos Castle Building Blocks. Mortar and Plaster Petrography and Resource Areas. *Restor. Conserv. J.* **8**, 30-36 (2012).
36. C. Oguz, F. Turker, N.U. Kockal, Construction Materials Used in the Historical Roman Era Bath in Myra. *Sci. World. J.* **2014**, 536105 (2014). <http://dx.doi.org/10.1155/2014/536105>
37. G. Kahraman, Investigation of Early Byzantine Khorasan Mortars İtü Master's Thesis (2008).
38. A.A. Akyol, N. Derakhshan Houreh, Archaeometric Analyses of Antalya Müsellim Mosque. *Academ. Art Des. Sci. J.* **5**(11) (2020).
39. M. Bayazit, D. Yıldız, Archaeometric Characterization of Plaster and Mortar Samples of Fatih Paşa Mosque (Diyarbakır). *DÜMF J. Eng.* **10**(2) 709-720 (2019).
40. A. Ersen, A. Güleç, Analysis of Historical Mortars with Simple and Advanced Analysis Methods. *J. Restor. Conserv. Stud.* **3**, 65-73 (2009).
41. A. Gözde, Investigation of Mortars Used in Mosaic House (Tripolis-Denizli) Space Walls Using Archaeometric Methods. PAU Archeology Institute Master's Thesis, (2019).
42. F.M. Lea, Investigations on Pozzolanas. *Building Research. Technical Paper* **27**, 1-63 (1940).
43. A. Moropoulou, A. Bakolas, S. Anagnostopoulou, Composite Materials in Ancient Structures. *Cem. Concr. Comp.* **27**, 295-300 (2005).
44. D. Akbulut Ekşi, A proposal for the selection of the mortars to be used in the repair of historical buildings. Doctoral Thesis. Y.T.Ü. Institute of Science, Istanbul (2006).
45. D.V. Deere, R.L. Miller, Engineering Classification and Index Properties of Intact Rock. Department of Civil Engineering. University of Illinois, Urbana (1966).
46. ASTM C 616. 1989. "Standard Specification for Quartz-Based Dimension Stone". Annual Book of ASTM Standards.
47. Ö. Çizer, K.V. Balen, D.V. Gemert, Competition between hydration and carbonation in hydraulic lime and lime-pozzolana mortars. *Adv. Mater. Res.* **133**, 241-247 (2010).
48. H. Kozlu, Characterization of Historical Mortars and Features of Restoration Mortars In Kayseri District. PhD thesis. ITU Institute of Science and Technology (2010).