

Wpływ dodatku ignimbrytu i innych pucolan na ograniczanie ekspansji betonu wywołanej reakcją alkaliów z krzemionką

Ignimbrite powder and some other pozzolanas additions to avoid concrete expansion caused by the alkali-silica reaction

Słowa kluczowe: reakcja alkaliów z krzemionką, przyspieszona metoda zaprawowa, proszek ignimbrytowy, pucolany naturalne

Keywords: Alkali-silica reaction, accelerated mortar bar method, ignimbrite powder, natural pozzolanas

1. Wprowadzenie

Reakcja alkaliów z krzemionką zachodzi pomiędzy rozpuszczalnymi alkaliami zawartymi w cemencie portlandzkim i pewnymi kruszywami zawierającymi minerały bogate w krzemionkę (opal, rogowiec, chalcedon, trydymit, krystobalit) (1). Produktem tej reakcji jest żel krzemianu sodowo-potasowego, który pęcznieje chłonąc wodę. Proces ten prowadzi do powstawania naprężeń wewnętrznych w betonie, jego ekspansji i spękań. Spękania mogą występować w obrębie kruszywa, jak również w matrycy cementowej. W rezultacie powstaje żel, który może wypełniać spękania, pory zaczynu cementowego lub tworzyć otoczki wokół ziaren kruszywa (2-4).

Stosowanie cementu hutniczego lub zamiana cementu portlandzkiego w składzie betonu różnymi dodatkami mineralnymi są znanymi metodami zapobiegania negatywnym skutkom reakcji alkaliów z krzemionką (5, 6). Znaczenie naturalnych pucolan w ograniczaniu ekspansji zostało omówione przez Lea w jego znakomitej książce „The chemistry of cement and concrete” (7). Istnieją trzy główne hipotezy wyjaśniające wpływ pucolan: ograniczenie przepuszczalności (8-10), wiązanie alkaliów na drodze reakcji pucolanowej (11, 12) oraz zapewnienie równomiernego rozmieszczenia $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w matrycy cementowej (13, 14).

Zamiana części cementu naturalnymi pucolanami, takimi jak perlit (PE), pumeks (PU) czy zeolity (ZE) prowadzi do poprawy niektórych właściwości betonu, np. urabialności, przepuszczalności oraz wytrzymałości, po dłuższych okresach. Ponadto, w przypadku niektórych rodzajów agresji chemicznej pucolany poprawiają trwałość betonu, np. oddziaływania siarczanów czy reakcji alkaliów z krzemionką (15-20). W tym przypadku jak dotąd nie badano ignimbrytu, który również jest naturalną pucolaną. Ignimbryt był badany, jako historyczny materiał architektoniczny stosowany w budowlach zabytkowych. Ponadto, oceniano jego właściwości

1. Introduction

The alkali-silica reaction (ASR) is the reaction of soluble alkalis contained in Portland cement and some silica rich minerals (opal, chert, chalcedony, trimit, cristobalite in aggregate) (1). Gel occurring in sodium-potassium silicate is formed which absorbs water with swelling. It causes expansion, stress and cracking of concrete. These cracks can pass through the aggregate and cement matrix and a characteristic gel is formed which can fill the cracks or form rims around the aggregate or in pores in the cement paste (2-4).

It is known that the use of the blastfurnace cement or replacement of Portland cement in the concrete by different mineral additions can prevent the negative effect of ASR (5, 6). The importance of natural pozzolanas in decreasing expansion was already discussed by Lea in his excellent book “The chemistry of cement and concrete” (7). There are three main hypotheses explaining the effect of pozzolanas: reduction of permeability (8-10), bonding of alkalis in the the pozzolanic reaction (11, 12) and assuring the homogenous distribution of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in cement matrix (13, 14).

Replacing part of cement by some natural pozzolanas, such as perlite (PE), pumice (PU) and zeolite (ZE) powders can improve some properties of concrete, such as workability, impermeability, and later age strength. At the same time, the pozzolanas increase concrete durability in the case of some chemical attacks, for example by sulphates as well as by the alkali-silica reaction (15-20). The use of ignimbrite (IG), which is also a natural pozzolana, has not been examined in this respect till now. Ignimbrite was studied as a historic architectonic material used in historical monuments. Moreover, physical and mechanical properties of ignimbrite were also examined (21-24). Instead of cement the use of IG powder in fractions under 0.25 mm was studied (25). The effect of IG on ASR expansion has not been studied so far.

fizyczne (21-24). Prowadzono także badania dotyczące stosowania frakcji mniejszej od 0,25 mm proszku ignimbrytowego zamiast cementu (25). Natomiast do tej pory nie określono wpływu ignimbrytu na reakcję alkaliów z krzemionką.

W niniejszej pracy zbadano wpływ częściowej zamiany cementu 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 i 45% dodatkiem ignimbrytu na ekspansję wywołaną reakcją alkalia-krzemionka. Belki z zapraw przygotowano, a następnie pomiary ekspansji prowadzono zgodnie z normą ASTM C1260, którą przyjęto jako podstawową. W pracy porównano efektywność czterech różnych naturalnych pucolan (IG, PE, PU, ZE) w zmniejszeniu ekspansji wywołanej reakcją alkaliów z krzemionką.

2. Materiały i metody

2.1. Materiały

W pracy, jako reaktywne kruszywo zastosowano kruszywo perlitowe, pozyskane z kopalni w Cubuk (prowincja Ankara, Turcja) (26). Zaprawy przygotowywano stosując cement portlandzki (OPC), typu I według normy ASTM. Proszki ignimbrytu (IG), perlitu (PE, pumeksu (PU) i zeolitu (ZE), którymi zastępowano cement w zaprawach, otrzymano poprzez kruszenie ich skał i przesiewanie na sicie o boku oczka 75 µm. Skład chemiczny cementu i pucolan przedstawiono w tabelicy 1.

2.2. Metody

Przygotowanie, przechowywanie, pomiary i obliczenia zmian długości belek z zapraw wywołanych reakcją alkaliów z krzemionką prowadzono zgodnie z normą ASTM C1260 (27). Przygotowano cementy zawierające 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 i 40% dodatku naturalnych pucolan (IG, PE, PU, ZE). Dla każdego cementu wykonano po 3 belki z zaprawy, w sumie 108 belek. Pomiary zmian długości belek prowadzono po 3, 7, 10, 14, 21 i 28 dniach. Utrzymywano stosunek wody do spoiwa około 0,47. Jednakże wartość ta nie była stała, ponieważ w celu zapewnienia właściwego zagęszczenia zapraw z dużą zawartością pucolan, została ona zwiększona.

Zaprawy formowano w dwóch równych warstwach, które zagęszczano przez minutę na wstrząsarce (60 wstrząsów). Formy przez 24 godziny przechowywano w temperaturze $23 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej 90%. Po tym czasie belki rozformowano, a następnie zaprawy umieszczono w pojemnikach z wodą w temperaturze $80 \pm 2,0^{\circ}\text{C}$ na okres kolejnych 24 godzin, po których dokonano pierwszych pomiarów długości belek. Następnie belki zapraw przechowywano przez 28 dni w 1N roztworze NaOH w temperaturze 80°C . Pomiary długości belek oraz wzorca wykonywano po 3, 7, 10, 14, 21 i 28 dniach. Zmiany długości obliczano zgodnie z normą ASTM C1260.

3. Wyniki i dyskusja

Ocenę zmian długości belek prowadzono w odniesieniu do wartości granicznych po 14 i 28 dniach, zawartych w normie ASTM C1260 (tab. 2).

In this study, the effect of cement 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40% replacement by IG on ASR swelling was examined. The length change of mortar bars, prepared according to the ASTM C 1260, was applied as a basic method. The effectiveness of four different natural pozzolanas (IG, PE, PU and ZE) for ASR expansion control were compared in this study.

2. Material and methods

2.1. Material

In this study perlite aggregate, which was collected from the quarry in Cubuk (Ankara/Turkey) location, was used as a reactive aggregate (26). The mortars were produced from ordinary Portland cement (OPC), compatible to ASTM type I. Ignimbrite (IG), perlite (PE), pumice (PU) and zeolite (ZE) powders, which replaced cement in mortars, were obtained from their rocks by grinding and sieving on a 75 µm sieve. Chemical compositions of cement and pozzolanas are shown in Table 1.

2.2. Methods

The preparation, cure, measurement and calculation of mortar bars for the determination of ASR length change were performed according to ASTM C 1260 (27). In the production of samples, natural pozzolanas (IG, PE, PU and ZE) in the quantity 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40%, were replacing cement. For each mixture 3 mortar bars, and in total, 108 mortar bars were produced. The 3, 7, 10, 14, 21, and 28-day length change of mortar bars were measured. In the mixtures the water to binder ratio was maintained at about 0.47. This value, however, was not constant, because in order to have the necessary workability of the mixtures with high content of pozzolanas, it should be increased.

Mortars were cast in moulds in two equal layers, and each was consolidated on the jointing table for a minute (60 shakes). Moulds were cured for 24 hours at $23 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ in the curing room in air of 90% relative humidity. Then the mortar bars were immersed in a tank with pure water at $80 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ for 24 hours and after this period they were demoulded and the first length measurements were performed. Then the bars were cured in 1 N NaOH solution,

Table 1 / Tablica 1

SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU I PUCOLAN, % MASY

CHEMICAL COMPOSITION OF CEMENT AND POZZOLANAS, % BY MASS

Component	OPC	IG	PE	PU	ZE
SiO ₂	20.35	64.05	71.36	59.0	64.59
Al ₂ O ₃	5.98	15.33	13.72	16.6	11.09
Fe ₂ O ₃	3.06	4.90	3.31	4.8	1.40
CaO	63.35	2.00	1.58	4.6	3.59
MgO	1.89	0.53	0.21	1.8	2.94
Na ₂ O	0.58	0.16	1.14	5.2	0.00
K ₂ O	0.88	4.81	8.23	5.4	3.45
LOI*	0.50	7.8	2.5	0.5	12.94

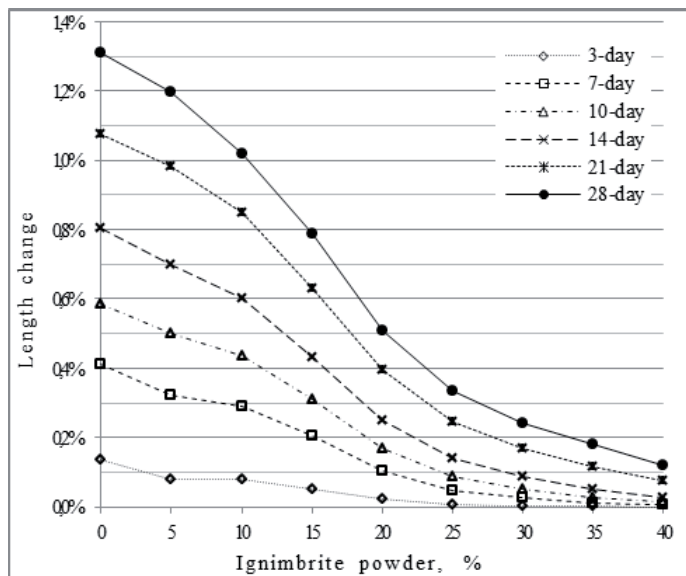
* Loss on ignition

Tablica 2 / Table 2

WARTOŚCI GRANICZNE WEDŁUG NORMY ASTM C1260

ASTM C 1260 LIMIT VALUES

Zmiana długości Length change, %	< 0.1	0.1-0.2	>0.2
reakcja alkalia-krzemionka w odniesieniu do zmian długości po 14 dniach alkali-silica reaction according to length change at the end of 14 days	nieszkodliwa harmless	prawdopodobnie szkodliwa (wynik należy potwierdzić po 28 dniach) likely to be harmful (should be re-read at the end of 28 days)	potencjalnie szkodliwa potentially harmful



Rys. 1. Wpływ ignimbrytu na zmiany długości belek z zaprawy

Fig. 1. The effect of ignimbrite on the length change of mortar bars

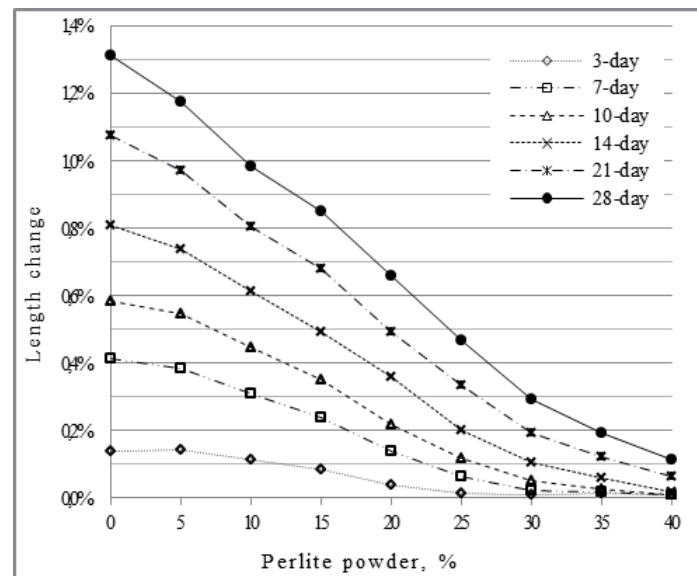
Krzywe na rysunku 1 pokazują, że ekspansja belek z zapraw maleje wraz ze wzrastającą zawartością ignimbrytu (IG) w cemencie. Największe wydłużenie odnotowano dla cementu bez dodatków. Nieszkodliwą ekspansję, zgodnie z tabelicą 2, wykazały zaprawy zawierające 35 i 40% ignimbrytu.

Ekspansja zapraw w przypadku dodatku perlitu (PE) malała podobnie jak dla dodatku ignimbrytu (rys. 2). Oznacza to, że poziom ekspansji zapraw poniżej wartości granicznej został osiągnięty przy dodatku wynoszącym 35 i 40% perlitu.

Jak wynika z krzywych przedstawionych na rysunku 3 dodatek pumeksu (PU) był bardziej efektywny. Ekspansja poniżej szkodliwej wartości granicznej została osiągnięta już przy 30% dodatku.

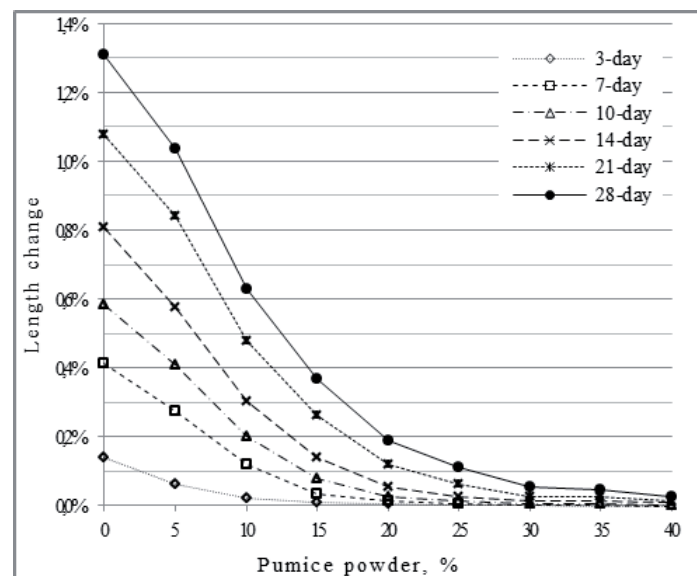
Na rysunku 4 przedstawiono zmiany długości zapraw z dodatkiem zeolitu (ZE). Do zapewnienia nieszkodliwej ekspansji (zgodnie z tabelicą 2) wystarczający jest 25% dodatek zeolitu. Wynik ten jest zbliżony z danymi literaturowymi (18-20), według których wymagane jest minimum 20% zeolitu do ograniczenia ekspansji wywołanej reakcją alkalia-krzemionka. W innym przypadku zaprawy mogą ulec wydłużeniu.

Wyniki niniejszej pracy wykazały, że ekspansja wszystkich zapraw zmniejszała się wraz ze wzrastającym dodatkiem naturalnych pucolan. Z uwagi na dość dużą ekspansję zapraw z cementu wzorco-



Rys. 2. Wpływ perlitu na zmiany długości belek z zaprawy

Fig. 2. The effect of perlite powder on the length change of mortar bars



Rys. 3. Wpływ pumeksu na zmiany długości belek z zaprawy

Fig. 3. The effect of pumice powder on the length change of mortar bars

at 80°C. Mortar bars were immersed in this solution for 28 days. After 3, 7, 10, 14, 21 and 28 days the length of mortar bars were measured with a comparator and the length change was calculated according to ASTM C 1260.

Tablica 3 / Table 3

EFEKTYWNOŚĆ PUCOLAN W ZMNIEJSZANIU EKSPANSJI WYWOŁANEJ REAKCJĄ KRUSZYWA Z ALKALIAMAMI

THE POZZOLANA EFFECTIVENESS IN CONTROLLING THE ASR EXPANSION

Stopień efektywności Effectiveness degree	Dodatek/Addition, %	0	5	10	15	20	25	30	35	40
4	IG	-	-	-	-	-	-	-	v	v
3	PE	-	-	-	-	-	-	-	v	v
2	PU*	-	-	-	-	-	-	v	v	v
1	ZE*	-	-	-	-	-	v	v	v	v

*Poniżej 0,1% / Under 0.1%

wego z kruszywem perlitowym (po 28 dniach około 13 razy większa niż wymagania normy ASTM C1260) pucolany były efektywne przy dużym dodatku (20% lub więcej w zależności od rodzaju pucolany). Bektaş i in. (18) również potwierdzili, że do ograniczenia reakcji alkalia-krzemionka w przypadku kruszyw wykazujących dużą ekspansję wymagany jest większy dodatek pucolan.

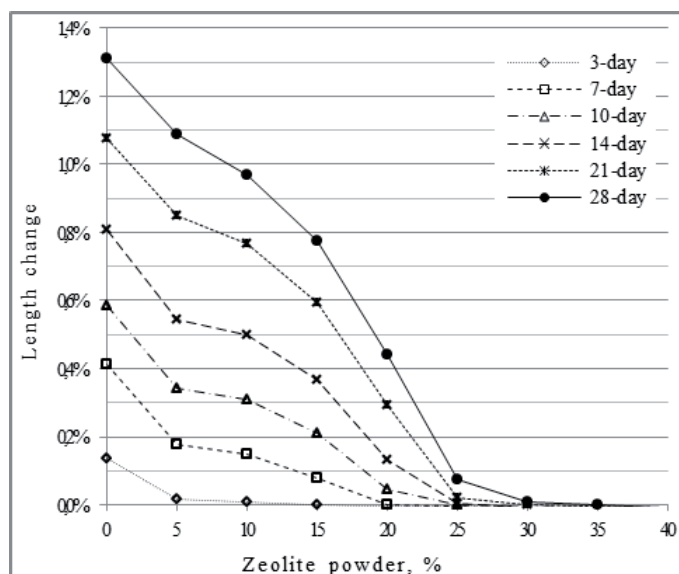
W tablicy 3 przedstawiono efektywność badanych pucolan w odniesieniu do wymagań normy ASTM C1260 [zdolne do ograniczenia (√) lub niezdolne do ograniczenia (-)]. Skuteczność pucolan waha się od 1 (najbardziej efektywna) do 4 (najmniej efektywna). Według badań najskuteczniejszą pucolaną był zeolit, następnie pumeks, a na końcu perlit i ignimbryt.

4. Wnioski

Ignimbryt, zastosowany po raz pierwszy w celu ograniczenia ekspansji wywołanej reakcją alkalia-krzemionka, jest skuteczny tylko przy dużym dodatku (35% lub więcej). W przypadku pumeksu, 30% dodatku jest wystarczające do zapewnienia nieszkodliwej ekspansji. Natomiast zeolit jest najbardziej efektywny. Wymagania nieszkodliwej ekspansji są spełnione dla 25% dodatku zeolitu.

Literatura / References

1. L. J. Malvar, G. D. Cline, D. F. Burke, R. Rollings, T. W. Sherman, J. L. Greene, Alkali-silica reaction mitigation: State of the art and recommendations, 99, pp. 480-489, ACI Materials Journal 2002.
2. A. M. Neville, Properties of concrete. Longman Scientific & Technical, pp. 155-166, England 1981.
3. J. A. Farny, S. H. Kosmatka, Diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete. translated in Turkish by M. Kalmış, N. Güngör, S. Eribol, pp. 1-26, American Concrete Pavement Association (ACPA) 1998.
4. V. S. Ramachandran, Concrete admixture handbook. Science and Technology, Second Edition, USA 1995.
5. D. W. Hobs, Mag. Concr. Res., **34**, 82 (1982).
6. M. E. Gaze, P. J. Nixon, Mag. Concr. Res., **35**, 107 (1983).
7. F. M. Lea, "The Chemistry of Cement and Concrete", wyd. 3, Chemical Publ. Comp., New York 1971.
8. P. K. Mehta, D. Manmohan, 7th ICCR Paris, t. III, s. VII-1, Paris 1980.
9. R. F. Feldman, 8th ICCR Rio de Janeiro, t. I, s. 336, Rio de Janeiro 1986.
10. R. F. M. Bakker, Proc. 5th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 252, Cape Town 1981.
11. D. M. Roy, 8th ICCR Rio de Janeiro, t. I, s. 362, Rio de Janeiro 1986.



Rys. 4. Wpływ zeolitu na zmiany długości beleczek z zaprawy

Fig. 4. The effect of zeolite addition on the length change of mortar bars

3. Results and discussion

The length changes were evaluated according to 14 and 28 days threshold values given in ASTM C 1260 (Table 2).

The curves in Fig. 1 show that length changes of mortar bars decreased as IG content replacing cement was increasing. The highest length change was found in the cement non-replaced series. The harmless length change of the bars content, according to Table 2, was achieved for 35 and 40% of IG content.

In the case of PE application the length change of bars was decreasing similarly to the IG addition (Fig. 2). It means that the length change higher than the threshold value was eliminated for 35 and 40% of PE addition.

As it is evident from the curves shown in Fig. 2, the addition of PU was more effective and the length change under the noxious value was obtained already for 30% addition.

In Fig. 4 the length change of mortar bars with ZE addition is presented. 25% addition is sufficient to assure the harmless value, according to Table 2. This result is similar to the ones reported in other papers (18-20), which maintain that at least 20% of ZE

12. S. Diamond, *Cem. Concr. Res.*, **11**, 383 (1981).
13. M. Kawamura, K. Takemoto, S. Hasaba, *Proc. 6th Int. Conf. on Alkalies in Concrete*, s. 167, Kopenhaga 1983.
14. G. J. Verbeck, C. Gramlich, *ASTM Proc.*, **55**, 1110 (1955).
15. S. Taban, O. Şimşek, The effect of zeolitic tuff addition ratio and sea water on physical and mechanical properties on cement. *The Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **24**, 1, pp. 145-153 (2009).
16. F. Naiqian, J. Hongwei, C. Enyi, Study on the suppression effect of natural zeolite on length change of concrete due to alkali-aggregate reaction. *Mag. Concr. Res.*, **50**, 1, pp. 17-24 (1998).
17. H. S. Gökçe, S. Taban, O. Şimşek, Determination of alkali-silica reaction effects of zeolitic tuff addition on the different aggregates. *The Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **25**, 4, pp. 803-809 (2010).
18. F. Bektaş, L. Turanlı, P. J. M. Monteiro, Use of perlite powder to suppress the alkali-silica reaction. *Cem. Concr. Res.*, **35**, 10, pp. 2014-2017 (2005).
19. I. Janotka, L. Krajči, Utilization of natural zeolite in Portland cement of increased sulphate resistance, 221, pp. 223-229, *ACI Special Publications* 2003.
20. H. S. Gökçe, S. Cemalgil, Evaluation of industrial waste and natural reserves in order to take alkali-silica reaction under control. *International Sustainable Buildings Symposium (ISBS)*, 1, pp. 30-34, Ankara, Turkey 2010.
21. E. Alonso, L. Martinez, The role of environmental sulfur on degradation of ignimbrites of the Cathedral in Morelia, Mexico. *Building and Environment*, **38**, 6, pp. 861-867 (2003).
22. C. Çelebi, *Ahlat living culture*, Republic of Turkey Ministry of Culture Publications 2711, Ankara, Turkey 2001.
23. O. Şimşek, M. Erdal, Investigation of some mechanical and physical properties of the Ahlat stone (Ignimbrite). *Gazi University Journal of Science*, **17**, 4, pp. 71-78 (2004).
24. M. Korkaç, The effect of geomechanical properties of ignimbrites on their usage as building stone: Nevşehir Stone. *Journal of Geological Engineering*, **31**, 1, pp. 49-60 (2007).
25. M. Erdal, O. Şimşek, "Investigation of usability of ahlat stone (ignimbrite) waste as stone powder in concrete", *International Sustainable Building Symposium (ISBS)*, 1, pp. 203-206, Ankara, Turkey 2010.
26. H. S. Gökçe, O. Şimşek, Research of pesimum reactive aggregate ratio of the perlite aggregate with different methods. *The Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **25**, 4, pp. 839-846 (2010).
27. ASTM C 1260. Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). *American Society for Testing and Materials* 2007.
28. F. Xiaoxin, Testing the activity of aggregates and studies on the measures for suppressing the length change due to alkali-aggregate reaction. *Tsinghua University, PhD. Thesis*, Beijing, China 2002.
29. T. Fujiwara, E. Saton, J. Dong, Adaptability of zeolite as an admixture for preventing alkali-aggregate reaction, 49, pp. 674-679, *JCA Proceedings of Cement and Concrete* 1995.
30. N. Quanlin, F. Naiqian, Effect of modified zeolite on the length change of alkali silica reaction. *Cement and Concrete Research* **35**, pp. 1784-1788 (2005).

is necessary to control the ASR length changes, otherwise the mortars can expand.

The results of this study showed that the length change of all mortar bars decreased as the content of all natural pozzolanas was increasing. Because the length change of Portland cement mortar bars with the perlite aggregate was quite high (after 28 days about 13 times higher than ASTM C 1260 requirement), the pozzolanas were effective at a high addition (20% or more according to the kind of pozzolana). Bektaş et al (18) also were reporting that more pozzolana was needed to control ASR in the case of the reactive aggregate which causes high length change.

In Table 3 the effectiveness of the examined natural pozzolanas according to ASTM C 1260 requirement, is shown [can control (✓) or cannot control (-)] and pozzolanas are ranged from 1 (the most effective) to 4 (the least effective). According to the experimental results the most effective pozzolana was zeolite, pumice was the second and perlite with ignimbrite the third.

4. Conclusions

IG used for the first time to decrease the ASR expansion of concrete is effective only as the high addition (35% and more). In the case of PU 30% is sufficient to assure the harmless length change, but zeolite is the most effective and the harmless requirement is fulfilled for 25% addition replacing cement.