

Süper Emici Polimer Katkılı Harçların Isıl İşlem ile Hava Küründe Mekanik Özellikleri

Mechanical Properties of Super Absorbent Polymer Added Mortars in Heat Treatment and Air Curing

¹Hasan DİLBAS, ²Furkan BİRDAL

¹Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Van
²Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Kırşehir

Doi: 10.51764/smutgd.1217163

Geliş Tarihi : 10.12.2022

ÖZET

Kabul Tarihi : 26.03.2023

Günümüzde süper emici polimerlerin kullanım alanları gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bu polimerlerin beton karışımı içerisindeki davranışları ve betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Bununla birlikte, süper emici polimerlerin harç ve çimento pastası fazları üzerindeki etkileri de önemli bir araştırma konusudur. Bu makale kapsamında, süper emici polimer katkılı harçların farklı kür şartları altındaki mekanik davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde, 18 adet süper emici polimer katkılı ve 3 adet katkısız harç fazında 15x15x15 cm boyutlu küp numuneler üretilmiştir. Süper emici polimer katkılı harçlarda, polimer katkı oranı literatürden optimum %0,3 olarak belirlenmiştir. Deney numuneleri süper emici polimer katkılı, ısıl işlem uygulanmadan 3-5-10 gün hava küründe ve 1 gün ısıl işlem uygulaması ardından 2-4-9 gün hava kürü koşullarına göre sınıflandırılmıştır. Her bir deney numunesi için aksiyel basınç dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlardan, numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Bu eğrilerin karşılaştırılması neticesinde, süper emici polimer katkılı harçların mekanik performansında (aksiyel basınç dayanımı, elastisite modülü ve enerji tüketme kapasitesi) en efektif ısıl işlem ve hava kürü kombinasyonu belirlenmiştir. Çalışmamız ile, süper emici polimer katkılı beton, bu betondan üretilmiş yapı taşıyıcı sistem elemanı (kolon, kiriş, perde, döşeme, vb.) davranışları ve süper emici polimer katkılı betonun teorik olarak modellenmesi bilimsel araştırmalarına katkı sunulması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Süper emici polimer, kür koşulları, ısıl işlem, süper emici polimer katkılı beton.

ABSTRACT

The areas of use of superabsorbent polymers are rapidly expanding. The behavior of these polymers in the concrete mix and their effect on the mechanical properties of the concrete are investigated. However, the effects of superabsorbent polymers on mortar and cement paste phases are also an important research topic. In this article, the mechanical behavior of superabsorbent polymer-added mortars under different curing conditions has been experimentally investigated. In the experiments, 15x15x15 cm cubic 18 samples with super absorbent polymer and 3 samples as reference were produced. In the superabsorbent polymer-added mortars, the polymer additive ratio was determined as 0.3% in the literature. The test samples were classified according to the conditions of air curing for 3-5-10 days without heat treatment, with superabsorbent polymer additives and 2-4-9 days after 1 day of heat treatment. An axial compressive strength test was performed for each test sample. Stress-strain curves of the samples were obtained from the experimental results. As a result of the comparison of these curves, the most effective combination of heat treatment and air curing was determined in the mechanical performance (axial compressive strength, modulus of elasticity and energy consumption capacity) of the superabsorbent polymer added mortars. With our study, it is aimed to contribute to the scientific research of superabsorbent polymer added concrete, the behavior of the structural load bearing system element (column, beam, shear wall, slab, etc.) produced from this concrete, and the theoretical modeling of superabsorbent polymer added concrete.

Keywords: Super absorbent polymer, curing conditions, heat treatment, super absorbent polymer concrete.

¹Hasan DİLBAS, Orcid: 0000-0002-3780-8818, hasandilbas@yyu.edu.tr

²Furkan BİRDAL, Orcid: 0000-0002-2243-418X, f.birdal@ahievran.edu.tr

1. GİRİŞ

Polimerler, betonun farklı özelliklerini iyileştirmek için kullanılan en önemli malzemelerdendir. İşlenebilirlik geliştirici (örneğin, polikarboksillik eter esaslı akışkanlaştırıcı (Bravo, de Brito, Evangelista, & Pacheco, 2017)), yangın dayanımı artııcı (örneğin, polipropilen (Shihada, 2011)) ve daha birçok özelliklere (örneğin, bkz. Ref. (Y. Liu, Wang, Cao, & Sun, 2021)) sahip çeşitleri bulunmaktadır. Süper emici polimerler (SAP) farklı alanlarda farklı amaçlar için sıklıkla başvurulan endüstriyel malzemelerden birisidir ve inşaat sektöründe çimentonun bağlayıcı olarak kullanıldığı karışımlarda SAP içten kürlenme ile çimentonun hidrasyonunun uzun dönemde gelişimini sağladığı bilinmektedir (Igarashi, 2006; Zhang, Lu, Li, Ang, & Zhang, 2021). Harç karışımında süper emici polimerlerin kullanılması, harcın fiziksel-mekanik-kalıcılık özelliklerine yönelik birçok parametreyi değiştirebilmektedir. Süper emici polimerler (SAP) çok iyi su emme (100-400 g/g) ve suyu geri bırakma kapasitesine sahip hidrojel özellikte bir malzemedir (Wong, 2018) (Jensen, 2013). Süper emici polimerler harç karışım suyunun harç içerisindeki kontrolünü sağlayarak çimentonun zamana bağlı hidrasyonu açısından oldukça etkilidir. Literatürde SAP katkısının harç ve beton özelliklerine etkisi güncel bir araştırma konusudur (Shen et al., 2022). Bununla birlikte, SAP katkılı harç ve bu harçlardan oluşan betonların mühendislik uygulamalarında kullanılabilmesi için mekanik ve durabilite özellikleri açısından ilave çalışmalar ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, SAP katkılı harç veya betonların tasarımına ve kullanımına yönelik bir şartname bulunmamaktadır (Mechtcherine et al., 2021a). Literatürde bu alanda SAP katkılı betonların detaylı incelendiği bir araştırma raporu bulunmaktadır (RILEM Araştırma Raporu) (Mechtcherine & Reinhardt, 2012a). Diğer yönden, çimento esaslı yapı malzemelerinin kür koşullarına karşı duyarlı olduğu yapılan çalışmalarda rapor edilmektedir (Erdoğan, 2007). Kürlenme genel olarak hava ve su kürü şeklinde uygulanmaktadır. Hava kürü çimentonun hidrasyonu için gereken su buharlaştığından dayanım açısından olumsuz olarak değerlendirilmektedir. Harç ve beton karışımların nihai (28 günlük) dayanıma erişmeleri için en az 7 gün su kürü uygulanması gerekmektedir. Süper emici polimer katkısı ile hava kürünün bu olumsuz etkisinin minimize edilebileceği düşünülmektedir (Du, 2018; Erdoğan, 2007; B. Liu, Luo, & Xie, 2018; Mehta & Monteiro, 2006; Sajedi & Razak, 2011). Ayrıca, ortam sıcaklığının hidrasyon üzerine olan etkisi de çimentonun sertleşme hızı ve hidrasyon kinetiği üzerinde etkili olduğu da görülmektedir (Pang et al., 2021). Ancak literatürde, çimentonun hidrasyonunun hızlanmasında 60°C üzeri sıcaklığın oransal olarak çok etkili olmadığı belirtilmektedir (Pang et al., 2021). Özetle, çimento esaslı yapı malzemelerinin kür tipine, kür koşullarına ve ortam sıcaklığına bağlı olarak özelliklerinin değişkenlik gösterebildiği ve bu sebeple uygun ortam şartlarının sağlanması gerekliliği anlaşılmaktadır. Bu noktada, çimento esaslı yapı malzemelerinin yukarıda belirtilen etkenlere karşı farklı duyarlılık dereceleri sergilediği de göz önüne alınarak, SAP katkılı harçların farklı kür şartları ve kür tipleri altındaki davranışlarının literatürde az çalışıldığı görülmektedir. Bu alandaki literatüre katkı sağlamak için, çalışmamızda optimum oranda (bu oran %0,3'tür (Mechtcherine et al., 2021b, 2021a)) SAP içeren harç küp numuneleri laboratuvar ortamında üretilmiş, hava kürü ve ısı kürü + hava kürüne maruz bırakılan numuneler üzerinde 3., 5. ve 10. günlerde mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucu, numunelerin aksel basınç dayanımı, elastisite modülü ve tokluk değerleri belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Deneysel çalışmalarda kullanılan 15 cm boyutlu küp numunelerin karışımında, ince agrega olarak silis esaslı dere kumu kullanılmıştır (Tablo 1). Karışımlarda bağlayıcı olarak genel amaçlı kullanıma yönelik olarak üretilen CEM I 42,5R tipi çimento dikkate alınmıştır (Tablo 2). Karışım suyu olarak, içilebilir çeşme suyu kullanılmıştır. Su/çimento oranı literatürde yapılan benzer çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiş (Jensen, 2013) ve 0,47'dir. Kendi ağırlığının 60-100 katı (1/10-1/150 g/ml) su emme kapasitesine sahip SAP harç karışımı son aşamasında karışımlara dahil edilmiştir. Bu sayede, ıslak karışım üzerine eklenmesi ile karışımın işlenebilirliği optimum seviyede tutulabilmiştir. Sabit işlenebilirlik için karışımlara ayrıca akışkanlaştırıcı (polikarboksillik eter) da eklenmiştir. Karışımlarda, SAP ve süper akışkanlaştırıcı çimentonun ağırlıkça yüzdesi olarak dikkate alınmıştır. Karışımlar S2 çökme sınıfında üretilmişlerdir.

Tablo 1. Agrega özellikleri

	Boyutu (mm)	Yoğunluğu (g/cm ³)	Su emme değeri (%)
Dere kumu	0-4	2,62	1,21

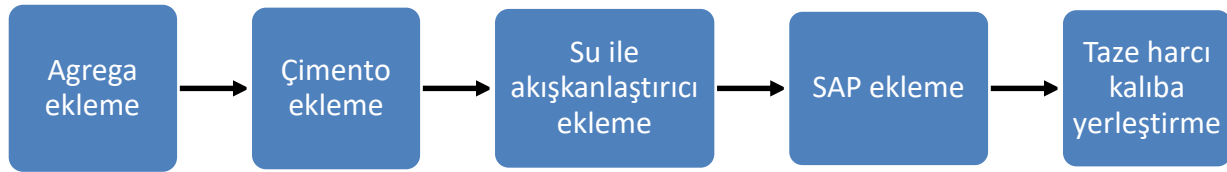
Tablo 2. Çimentonun özellikleri

İçerik	Nicelik
SiO ₂ (%)	19,19
Al ₂ O ₃ (%)	5,25
Fe ₂ O ₃ (%)	3,21
CaO (%)	61,52
MgO (%)	2,79
SO ₃ (%)	2,70
K ₂ O (%)	0,82
Na ₂ O (%)	0,35
Isıtma kaybı (%)	3,37
Blain inceliği (cm ² /g)	3871
Yoğunluk (g/cm ³)	3,09

Kullanılan malzemeler ile üretilen harçların karışım detayı Tablo 3'te verilmektedir. Ayrıca, karışımları oluştururken kullanılan adımlar Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 3. Karışım içerikleri

Karışım içeriği	Kontrol	M1	M2
Çimento, kg/m ³	360		
Su, kg/m ³	170		
Dere kumu, kg/m ³	1843,2		
Kimyasal katkı, %	0.80	1,00	1,05
Süper emici polimer, kg/m ³	-	%0,3	%0,3

**Şekil 1.** Karışım adımları

Üretilen numuneler, basınç testinin uygulandığı güne ve kür koşullarına bağlı olarak sınıflandırılmıştır. SAP katkılı deney numunelerine, ısıtma işlemi uygulanmadan 3-5-10 gün hava küründe ve 1 gün ısıtma işlemi uygulaması ardından 2-4-9 gün hava kürü (20°C ve %50 bağıl nem) uygulanmıştır. Böylelikle, numuneler farklı isimlendirilmişler ve detaylar Tablo 4'te verilmiştir. Çalışmada harçlarda, SAP'ın mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkilerini elimine etmek üzere ve numunelerden beklenen dayanım değerinin kısa sürede elde edilebilmesini sağlamak maksatlı olarak bazı deney numunelerine 24 saat 50°C ısıtma işlemi uygulanmıştır. Isıtma işlemindeki sıcaklığın 50°C seçilmesinde, hem literatür çalışmaları (Pang et al., 2021) hem de bu sıcaklığın yapı uygulamalarında ulaşılabilir olması etkili olmuştur. Numunelerin karışım içeriklerinin oluşturulmasında ve kür şartlarının dayanıma etkisinin gözlemlenmesinde, bu çalışmanın motivasyonu olarak 50 MPa basınç dayanımı elde edilebilmesi belirlenmiştir.

Tablo 4. Kür detayları

Notasyon	Numune sayısı	Isıtma işlemi	SAP, %	Kürleme	Test günü
Kontrol	3	-	-	Su	28
M1-3g-h0	3	-	0.3	Hava	3
M2-3g-h1	3	50°C 24s	0.3	Isıtma+hava	3
M1-5g-h0	3	-	0.3	Hava	5
M2-5g-h1	3	50°C 24s	0.3	Isıtma+hava	5
M1-10g-h0	3	-	0.3	Hava	10
M2-10g-h1	3	50°C 24s	0.3	Isıtma+hava	10

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar neticesinde, kontrol numunesinin basınç dayanımı 55,4 MPa, elastisite modülü 36200 MPa bulunmuştur. Malzeme gevrek davranış sergilediği için, gerilme-şekil değiştirme eğrisinde sadece lineer kısım oluşmuştur. Gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki lineer kısım dikkate alınarak tokluk değeri aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır (Denk. 1).

$$Tokluk = \frac{\sigma \cdot \varepsilon}{2} = \frac{\sigma \cdot \frac{\sigma}{E}}{2} = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (1)$$

SAP katkılı ısıtma işlem uygulanmamış harçların 3, 5 ve 10 günlük basınç ve elastisite modülü değerleri sırasıyla 47,7 MPa-19783 MPa, 46,8 MPa-18918 MPa ve 52,5 MPa-22251 MPa olarak bulunmuştur. Bu harçların tokluk değerleri ise 0,058-0,058-0,062 şeklinde elde edilmiştir. Sonuçlar 10 günlük SAP katkılı harcın dayanım olarak kontrol numunesinin %95'ine ulaştığını ancak elastisite modülünde %38 azalma olduğunu göstermiştir. Suya doymun hale gelen süper emici polimerler, ortama suyu verdikten sonra harç içerisinde agrega kadar dayanıklı olmayan bir bileşen oluşturmaktadır. Dolayısıyla, 28 gün suda bekletilmiş harca göre, SAP katkılı harcın elastisite modülü düşük çıkmaktadır. Bu etkinin oluşmasında, emdiği suyu harç karışımına zamanla veren polimerlerin bir müddet sonra harç içerisinde agregaya oranla daha düşük rijitlik ve dayanımlı boşluklu yapıları oluşturması şeklinde yorumlanmıştır. Isıtma işlem uygulandığında, 10 günlük SAP katkılı harç basınç dayanımının kontrol numunesinin %98'ine ulaştığı ancak elastisite modülünde azalmanın devam ettiği görülmüştür. Ancak tokluk değerinin SAP içeren ısıtma işlemli 10 günlük harçlarda kontrol numunesine göre %76 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, SAP katkılı ısıtma işlemli harçlarda yaklaşık aynı basınç dayanımlı ve daha yüksek enerji tüketme kapasitesine sahip bir malzeme elde edilebilmiştir. Ancak, burada SAP katkılı numunelerin tamamı hava küründe bekletilmiş standart su kürü uygulanmamıştır. Ayrıca, harç içerisinde süper emici polimerlerin çimentonun hidratasyonu için gereken suyu tam olarak karışıma vermeden ısıtma işlem uygulamanın harç dayanımı açısından olumsuz bir sonuç ortaya çıkardığı görülmüştür. Burada, hava küründe bekleme süresinin ısıtma işlem uygulanmadan sonra en az 5 gün olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. 10 günlük harç sonuçlarında ise, ısıtma işlem uygulanması harç dayanımında çok az bir artışa sebep olmuştur. Bununla birlikte, ısıtma işlem elastisite modülünü düşürmüştür. Bu durum, SAP katkılı harçlarda ısıtma işlem uygulamasının çok büyük bir olumlu etkiye sahip olmadığını göstermiştir (Tablo 5).

Tablo 5. Deney sonuçları

Numune serileri	Yaş, gün	SAP, %	Basınç dayanımı, MPa	Elastisite modülü, MPa	Tokluk
Kontrol	28	0	55,4	36200	0,042
M1-3g-h0	3	0,3	47,7	19783	0,058
M2-3g-h1	3	0,3	38,8	16917	0,044
M1-5g-h0	5	0,3	46,8	18918	0,058
M2-5g-h1	5	0,3	45,9	15738	0,067
M1-10g-h0	10	0,3	52,5	22251	0,062
M2-10g-h1	10	0,3	54,4	20088	0,074

Literatürde bu alanda en önemli kaynak olarak yer alan RILEM Raporu'nda (225-SAP) (Mechtcherine & Reinhardt, 2012b) yapılan çalışmalarda 0,30 su/bağlayıcı oranında ve %0,7 SAP katkısında dayanımda kontrol harç numunesine göre düşük basınç dayanımı sonuçları elde edildiği görülmüştür. Ancak yapmış olduğumuz çalışmada, su/bağlayıcı oranı 0,50 yapılarak ve SAP katkısı %0,3 olarak değiştirilerek kontrol numunesine göre daha olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, elastisite modülü değerleri SAP katkılı harçlarda kontrol numunesine göre daha düşüktür. Bu sebeple, SAP katkılı harçlardan beton üretiminde elastisite modülünü artırıcı önlemlerin alınması gerekmektedir (mineral katkı kullanımı, su/bağlayıcı oranı azaltımı, daha yüksek dayanımlı agrega kullanımı, vb. (Erdoğan, 2007; Mehta & Monteiro, 2006)).

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, SAP katkılı harçların hava küründe ve ısıtma işlem etkisi altında mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak;

- CEM I 42,5R tipi çimento kullanılarak su/çimento oranı 0,50 olan %0,3 SAP katkılı harçların 10 gün hava küründe basınç dayanımının 28 günlük suda bekletilmiş kontrol harç numunesi basınç dayanımına ulaşabildiği,
- Harç içerisinde süper emici polimer katkıları sayesinde 28 gün standart su kürü uygulamasının gerekli olmadığı ve hava kürünün harç dayanımı için yeterli olabileceği,
- SAP katkılı harçların kontrol numunelerine göre daha tokluk değeri yüksek bir davranış sergilediği,
- SAP katkılı harçların elastisite modülünün kontrol numunesi değerlerine göre daha düşük olduğu,
- SAP katkılı harçlara ısıtma işlem uygulamasının çok büyük bir etki meydana getirmediği hatta 3 ve 5 günlük hava küründe dayanım azalmasına sebep olduğu,
- SAP katkılı beton üretiminde harçlarda belirlenen elastisite modülü azalımı dikkate alınarak karışım tasarımında önlemler alınması gerektiği,

belirlenmiştir. İlerleyen çalışmalarımızda, SAP katkılı beton ve bu betondan üretilmiş yapısal elemanların davranışları incelenecektir.

5. ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

6. ARAŞTIRMACILARIN KATKI ORANI BEYANI ÖZETİ

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamışlardır.

7. KAYNAKLAR

- Bravo, M., de Brito, J., Evangelista, L., & Pacheco, J. (2017). Superplasticizer's efficiency on the mechanical properties of recycled aggregates concrete: Influence of recycled aggregates composition and incorporation ratio. *Construction and Building Materials*, 153, 129–138. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.103>
- Du, S. (2018). Effect of curing conditions on properties of cement asphalt emulsion mixture. *Construction and Building Materials*, 164, 84–93. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.179>
- Erdoğan, T. (2007). *Beton (in Turkish)* (2nd ed.). Ankara Turkey: METU Press.
- Igarashi, S. (2006). Experimental study on prevention of autogenous deformation by internal curing using super-absorbent polymer particles. In *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation* (pp. 77–86). RILEM Publications. Retrieved from <https://doi.org/10.1617/2351580052.009>
- Jensen, O. M. (2013). Use of Superabsorbent Polymers in Concrete. *Concrete International*, January 2013, 48–52.
- Liu, B., Luo, G., & Xie, Y. (2018). Effect of curing conditions on the permeability of concrete with high volume mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 167, 359–371. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.190>
- Liu, Y., Wang, L., Cao, K., & Sun, L. (2021). Review on the Durability of Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1–13. Retrieved from <https://doi.org/10.1155/2021/6652077>
- Mechtcherine, V., & Reinhardt, H.-W. (Eds.). (2012a). *Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction*. Dordrecht: Springer Netherlands. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2733-5>
- Mechtcherine, V., & Reinhardt, H.-W. (Eds.). (2012b). *Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction*. Dordrecht: Springer Netherlands. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2733-5>
- Mechtcherine, V., Wyrzykowski, M., Schröfl, C., Snoeck, D., Lura, P., de Belie, N., ... Igarashi, S.-I. (2021a). Application of super absorbent polymers (SAP) in concrete construction—update of RILEM state-of-the-art report. *Materials and Structures*, 54(2), 80. Retrieved from

<https://doi.org/10.1617/s11527-021-01668-z>

- Mechtcherine, V., Wyrzykowski, M., Schröfl, C., Snoeck, D., Lura, P., de Belie, N., ... Igarashi, S.-I. (2021b). Application of super absorbent polymers (SAP) in concrete construction—update of RILEM state-of-the-art report. *Materials and Structures*, 54(2), 80. Retrieved from <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01668-z>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties and Materails* (Third Edit). New York: The McGraw-Hill. Retrieved from <https://doi.org/10.1036/0071462889>
- Pang, X., Sun, L., Sun, F., Zhang, G., Guo, S., & Bu, Y. (2021). Cement hydration kinetics study in the temperature range from 15 °C to 95 °C. *Cement and Concrete Research*, 148, 106552. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106552>
- Sajedi, F., & Razak, H. A. (2011). Effects of curing regimes and cement fineness on the compressive strength of ordinary Portland cement mortars. *Construction and Building Materials*, 25(4), 2036–2045. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.043>
- Shen, D., Li, C., Kang, J., Liu, K., Liu, C., & Li, M. (2022). Influence of Loading Ages on the Early Age Tensile Creep of High-Strength Concrete Modified with Superabsorbent Polymers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(5). Retrieved from [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004207](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004207)
- Shihada, S. (2011). EFFECT OF POLYPROPYLENE FIBERS ON CONCRETE FIRE RESISTANCE / POLIPROPIRENO PLUOŠTOJ TAKA BETONO ATSPARUMUI UGNIAI. *Journal of Civil Engineering and Management*, 17(2), 259–264. Retrieved from <https://doi.org/10.3846/13923730.2011.574454>
- Wong, H. S. (2018). Concrete with superabsorbent polymer. In *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures* (pp. 467–499). Elsevier. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102181-1.00017-4>
- Zhang, S., Lu, Z., Li, Y., Ang, Y., & Zhang, K. (2021). A Method for Internal Curing Water Calculation of Concrete with Super Absorbent Polymer. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1–14. Retrieved from <https://doi.org/10.1155/2021/6645976>