

POLİKARBOKSİLAT ESASLI SU AZALTICI KATKI-ÇİMENTO UYUMU

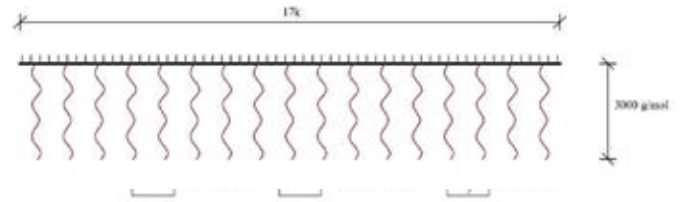
Kambiz Ramyar¹, Ali Mardani², Veysel Kobya³

Özet

Polikarboksilat-eter esaslı su azaltıcı katkıları (PCE), çimentolu sistemlerin işlenebilirliği üzerinde önemli etkiye sahiptir. Özellikle PCE'lerin kimyasal yapıları, ana ve yan zincir özellikleri üzerinde yapılan modifikasyonlar, PCE'lerin elektrostatik itki ve sterik engelleme etkisinin gelişmesini sağlayarak çimentolu sistemlerin üstün performans göstermesine yol açabilmektedir. Bu bildiride, PCE'lerin özelliklerinin çimentolu sistemlerin reolojisi başta olmak üzere çeşitli özellikleri üzerine etkisi, literatürde yapılmış çalışmalardan yararlanılarak ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Böylece, PCE-çimento uyumuna dair bütüncül bir kaynak oluşturmak hedeflenmiştir. Ayrıca, PCE'nin söz konusu özelliklerine etki eden pH, adsorpsiyon biçimi ve çimento bileşenleri durumundan da bahsedilmiştir. PCE'lerde ana zincir ile yan zincirler arasındaki geometrik denge, optimum molekül yapılarının tasarlanmasında önemli yeri olduğu vurgulanmıştır.

1. GİRİŞ

Polikarboksilat-eter esaslı su azaltıcı katkıları (PCE), çimentolu sistemlerde işlenebilirliği artırmak, su/bağlayıcı (s/b) oranını azaltarak dayanım ve dayanıklılığı geliştirmek ve bağlayıcı tüketiminde tasarruf sağlamak gibi amaçlarla kullanılmaktadır. PCE'ler, ana zincirinde karboksilik, sülfonik ve fosfat gibi anyonik gruplar ve polietilen gruplarına sahip tarak benzeri yan zincirlerin hidroksil veya metil ile sonlanan polimerlerdir [1-2] (Şekil 1).



Şekil 1. Tarak benzeri polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı (PCE) temsili çizimi [3].

2. PCE'lerin kimyasal özelliklerinin belirlenmesi

PCE'lerin ağırlıklıca ortalama molekül ağırlığı (M_w), sayıca ortalama molekül ağırlığı (M_n) ve polidispersite indeksi (PDI: M_w/M_n), gibi kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için Jel geçirgenlik kromatografi (GPC) analizi yapılmaktadır [4-5].

Sayısal ortalama moleküler ağırlık (M_n), bir polimerin moleküler ağırlığındaki dağılımın bir ölçüsüdür ve her bir polimerin molekülünün ağırlığı ile bu moleküllerin yoğunluğunu dikkate alınarak belirlenmektedir. Bu, özellikle polimerler gibi büyük moleküllerin fiziksel özelliklerini anlamak için önemlidir. Sayısal ortalama moleküler ağırlık, tüm moleküllerin ağırlığı toplamının, toplam molekül sayısına bölünmesi ile hesaplanır.

Ağırlık ortalama moleküler ağırlık (M_w) ise, her bir molekülün ağırlığının molekülün kütlesi ile çarpımının toplamının tüm moleküllerin toplam kütlesine bölünmesi ile hesaplanır. Bu hesaplama,

Polycarboxylate-Based Water Reducing Admixture-Cement Compatibility

Polycarboxylate-ether-based water-reducing admixtures (PCE) have a significant effect on the workability of cementitious systems. Particularly, modifications made to the chemical structures, main and side chain properties of PCEs can lead to superior performance of cementitious systems by improving the electrostatic repulsion and steric hindrance effect of PCEs. In this paper, the effects of the properties of PCEs on various properties, especially the rheology of cementitious systems, are explained in detail by using studies in the literature. Thus, it is aimed to create a holistic resource on PCE-cement compatibility. In addition, the parameters that affect the PCE properties such as the pH, adsorption form, and cement components are also mentioned. It was emphasized that the geometric balance between the main chain and side chains in PCEs has an important role in designing optimum molecular structures.

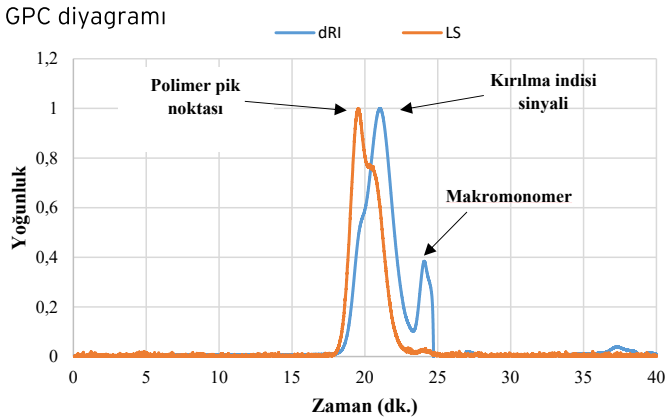
1) kambiz.ramyar@ege.edu.tr, Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bornova/İzmir; 2) alimardani@uludag.edu.tr; 3) v.koyba@gmail.com; Bursa Uludağ Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Nilüfer/Bursa

(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen BETON 2023 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

Anahtar Kelime: Polikarboksilat-eter esaslı su azaltıcı katkı, çimento- katkı uyumu, elektrostatik itki, sterik etki,

büyük moleküllerin (örneğin, polimerlerin) molekül ağırlığının farklılıklarının dağılımını daha doğru bir şekilde yansıtır.

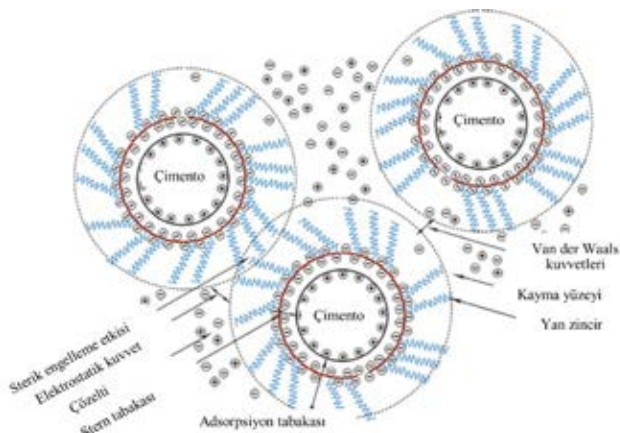
GPC diyagramlarındaki ana pik değerler, polimer fraksiyonunu (katkı içerisindeki polimeri) göstermektedir. Bu diyagramlar kullanılarak katkılara ait Mw, Mn ve PDI değerleri belirlenmektedir. Ayrıca bu diyagramlarda, artakalan (residual) makromonomer, çözücü madde ve yan ürünler için sinyaller görülebilmektedir. Polikarboksilat esaslı bir su azaltıcı katkıının lazer ışık saçılımı (LS, laser light Scattering) ve kırılma indisi (RI, refractive index) yoğunluklarına sahip jel geçirgenlik kromatografi (GPC) diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. PCE'ye ait GPC Diyagramı

3. PCE'lerin etki mekanizması

Anyonik monomerler, elektrostatik etkileşim ile çimento tanelerinin yüzeyine tutunarak aynı yüke sahip olmasını sağlar. Böylece çimento tanelerinin topaklaşması engellenir. Sterik itki kuvveti sağlayan non-iyonik polietilen glikol (PEG) yan zincirleri, fiziksel olarak çimento tanelerini uzaklaştırarak akıcılığı olumlu yönde etkiler [1-2, 6]. PCE'nin etki mekanizması Şekil 3'te temsili olarak çizilmiştir.



Şekil 3. PCE'nin etki mekanizması [7].

Şekil 3'te PCE'nin negatif yüklü karboksilat grubunun elektrostatik etki ile çimento tanesine (Ca^{+2} iyonları aracılığı ile) adsorpsiyonu gösterilmiştir. Ayrıca PEG yan zincirler ile sağlanan sterik etki ve adsorpsiyon tabakası da söz konusu şekilde çizilmiştir.

4. PCE-çimento uyumu

PCE'ler, çimentolu sistemlerde beklenen pozitif etkilerin yanında istenmeyen negatif etkilere de yol açabilmektedir. Söz konusu olumsuz etkiler çimento-katkı uyumsuzluğundan kaynaklanmaktadır. PCE ve çimento arasındaki uyumsuzluk, düşük başlangıç kıvamı, kuma ve ayrışma, hızlı çökme kaybı, ani priz ve priz gecikmesi gibi çimentolu karışımların performansını olumsuz etkileyecek durumlara yol açmaktadır [8-9].

PCE-çimento uyumunu etkileyen çimento kaynaklı en önemli faktörler; başta C_3A içeriği olmak üzere kimyasal ve mineralojik kompozisyon, incelik, puzolan varlığı, alçı türü, agrega kil içeriği ve sülfat içeriği sayılabilir [10-12].

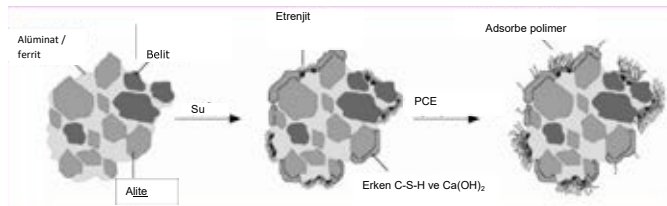
PCE-çimento uyumunu etkileyen PCE kaynaklı en önemli faktörler ise; PCE'nin pH derecesi, moleküler ağırlığı, anyonik monomer tipi (karboksilat, fosfat ya da sülfonat esaslı vb.), ana zincir uzunluğu, yan zincir uzunluğu ve yan zincir yoğunluğu şeklinde sıralanabilmektedir.

4.1. Çimento Kaynaklı Parametreler:

Daha ince tane dağılımına sahip çimentolarda aynı kıvamı elde etmek için gerekli su ihtiyacı daha fazladır. Diğer taraftan, çimentonun inceliği arttıkça yüzey alanı artacağından, ortamda yeterli miktarda PCE bulunması hâlinde; PCE daha ince taneli çimento, iri taneli çimentolara kıyasla daha fazla adsorbe olur ve akıcılık artabilir [9]. Genel olarak, yüksek inceliğe sahip olan çimento, daha hızlı hidrasyona girerek betonun erken dayanımını artırır.

C_3A , çimentodaki en reaktif fazdır. Genellikle çimento ağırlığının %5-10'u gibi küçük miktarlarda bulunmasına rağmen çimentolu karışımların hem reolojik özelliklerini hem de erken yaşlarda mekanik performansını etkiler [8-9, 13-14]. Ortamda herhangi bir sülfat kaynağı olmadığı durumda, C_3A ile suyun temas etmesinden sonraki birkaç dakika içinde "ani priz" olarak adlandırılan etkiyle beton işlenemez hâle gelir. Bu kontrolsüz sertleşmeyi önlemek için klinkere, öğütme sırasında alçı (kalsiyum sülfat) eklenir. Kalsiyum sülfatın C_3A ile oluşturduğu etrenjit, C_3A üzerinde bariyer oluşturarak, su ile reaksiyona girmemiş C_3A 'nın temasını engeller. Böylece, reaksiyon hızının düşmesi ile daha uzun süre işlenebilirlik avantajı sağlanır [15]. Alçının gereğinden fazla kullanılması ise, çimentonun yoğunluğunun azalması, su ihtiyacının artması, priz süresinin gecikmesi ve zararlı genleşme gibi çeşitli sorunlara neden olur.

Çimentodaki alüminat fazının hidratasyonu, silikatın hidratasyonuna göre çok hızlı olduğundan, erken yaşta alüminat fazı baskındır. Çimentonun suyla temas etmesinden sonra, çimento hamurundan çözülen iyonlar farklı yüklü yüzeyler oluşturur. Silikatlar (C_3S ve $C-S-H$) negatif yüklü, alüminatlar ise (C_3A ve etrenjit) pozitif yüklüdür. Pozitif ve negatif yükler arasındaki elektrostatik çekim nedeniyle, negatif yüklü PCE, pozitif yüklü alüminat fazının yüzeyine tutunur [16] (Şekil 4). Bu durum PCE ihtiyacını artırır.



Şekil 4. Hidrate çimento tanesine eşit şekilde adsorbe olmayan PCE molekülleri [16].

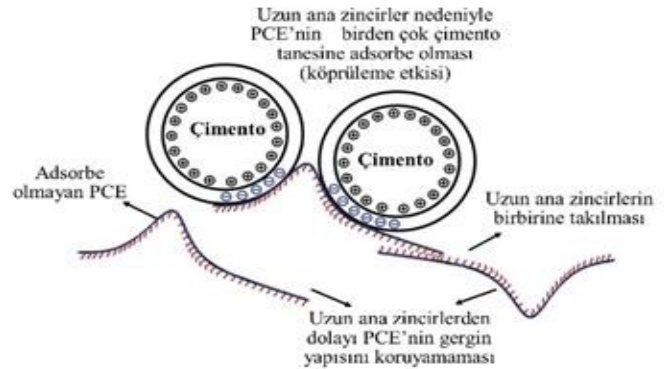
4.2. PCE Kaynaklı Parametreler:

PCE'nin ana zinciri genellikle akrilik, metakrilik, maleik asitler, vinil, alil vb. maddelerden oluşmaktadır. Bir katkının ana zincirini oluşturan monomer tipi, katkının çimentolu sistemler üzerindeki performansını etkilemektedir [1, 3].

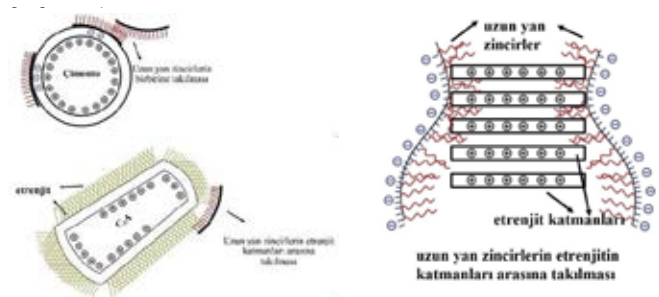
PCE'nin ana zincir uzunluğu, adsorpsiyon davranışını ve anyonik grup miktarını dolayısıyla PCE'nin performansını etkilemektedir [17]. Ana zincirin belirli bir uzunluğa kadar artışının akışkanlığı olumlu etkilediği vurgulanmıştır. Bazı araştırmacılar uzun ana zincir veya büyük polimer moleküllerinin ($M_n > 50000$ g/mol) PCE'nin etkinliğini azaltan köprüleme etkisine sebep olduğunu belirtmiştir [18]. Köprüleme etkisi, PCE'nin birden fazla çimento tanesine adsorbe olmasıdır [19]. Ayrıca ana zincir uzunluğu artışı ile PCE moleküllerinin birbirine takılması ihtimali artmakta ve bu moleküller gergin yapılarını koruyamamaktadır (Şekil 5).

Uzun yan zincirler genellikle daha iyi sterik etki sağlamaktadır. Bu nedenle çimento hamurlarının akışkanlığını artırmaktadır. Bununla birlikte, yan zincir uzunluğunun artmasıyla hava sürükleme etkisi meydana gelebilmektedir. Bu nedenle karışımlarda basınç dayanımı kaybı olabilmektedir [1,20]

Yan zincir uzunluğu belirli bir değeri aştığında fonksiyonel grupların içeriği azalmaktadır. Bu durum, katkının adsorpsiyon performansını düşürmektedir [21]. Ayrıca yan zincir uzunluğu artışı ile PCE moleküllerinin birbirine ve etrenjitin katmanları arasına takılma olasılığı artmaktadır [22]. Bu yüzden, farklı yapılara sahip PCE'lerde en iyi performansı sağlamak için yan zincirlerin uzunluğunun, optimum bir aralıkta olması gereklidir (Şekil 6).



Şekil 5. PCE molekülü ana zincir uzunluğunun etkisi [3].



Şekil 6. PCE molekülü yan zincir uzunluğunun etkisi [23].

Yüksek molekül ağırlığına sahip PCE'ler, genellikle kısa menzilli (short-range) itki kuvvetlerine yol açmakta ve çimento taneleri üzerindeki adsorpsiyon miktarları molekül ağırlığının artışı ile artmaktadır.

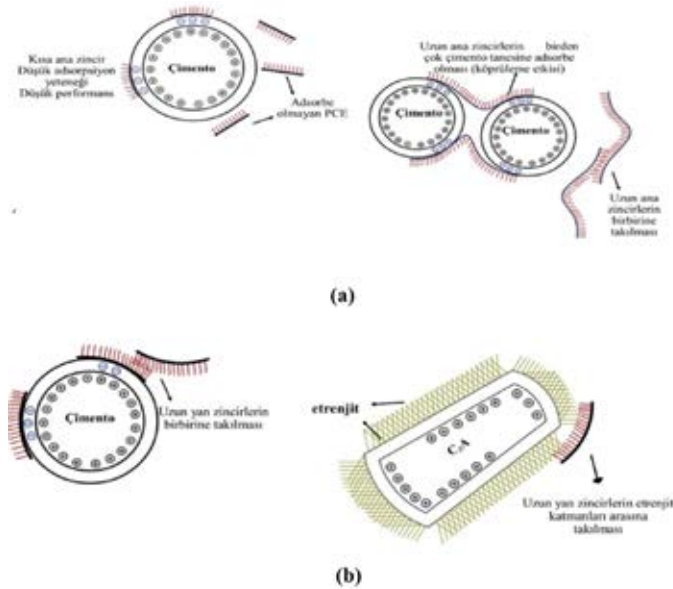
Öte yandan, yapılan araştırmalarda orta molekül ağırlığa sahip PCE'lerin çimentolu sistemlerin taze hâl özelliklerini olumlu etkilediği ifade edilmiştir. Örneğin molekül ağırlığı 32.000 ile 132.000 g/mol aralığında değişen PCE'lerle yapılan bir çalışmada [24], molekül ağırlığı 62.000 g/mol olan PCE'nin taze hâl özellikleri açısından en iyi performansı (düşük katkı ihtiyacı, kıvam koruma, iyi reolojik özellikler) sergilediği vurgulanmıştır.

4.3. PCE özelliklerinin çimentolu sistemlerin özelliklerine etkisi:

PCE özelliklerinin çimentolu sistemlerin taze hal ve reolojik özelliklerine etkisi üzerine yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde ana zincir uzunluğunun adsorpsiyonu arttırdığı ve bağlayıcı sistemin eşik kayma gerilmesini düşürdüğü görülmüştür. Öte yandan, belirli bir noktadan sonra ana zincirdeki uzama köprüleme etkisi sebebiyle reolojik özellikleri olumsuz etkilemektedir [18]. Yan zincir uzunluklarının, çimentolu sistemlerin reolojik özellikleri üzerinde ana zincir özelliklerinden daha baskın olduğu görülmüştür. Uzun yan zincirler daha iyi dispersiyona sebep olurken adsorbsiyonu azaltabilmekte,

belirli bir uzunluktan sonra (örneğin 3.000 g/mol) moleküllerin birbirine takılarak etkinliğin azalmasına yol açabilmektedir (Şekil 7). Bu sebeple ana ve yan zincir uzunluklarının tasarımında denge güdülmeli gerekmektedir.

PCE özelliklerinin çimento bileşenleri ve hidratasyon ürünleri ile etkileşimi irdelendiğinde, yüksek oranda C_3A varlığında belirli bir noktaya kadar yan zincir uzunluğu/yoğunluğu yüksek katkıların daha iyi dispersiyon performansı sergileyerek taze hâl özelliklerini olumlu etkilediği sonucuna varılmıştır. PCE, C_3A ve etrenjite adsorbe olduktan sonra, C_3S 'nin reaktif bölgelerine de adsorbe olur. Bu durum, C_3S 'nin çözünmesini yavaşlatır ve hidratasyonunu geciktirir. Ayrıca, PCE'nin eklenmesiyle CH morfolojisi değişir ve CH kristallerinin ortalama boyutu azaltılabilir.



Şekil 7. PCE molekülü a. Ana ve b. Yan zincir uzunluk değişiminin etkisi [3].

PCE'nin adsorpsiyon davranışı, adsorpsiyon tabakası kalınlığı, yüzey kaplama alanı, sterik etki ve dispersiyon performansı ile doğrudan ilişkilidir. PCE'nin ana zincir yoğunluğunun ve uzunluğunun artması adsorpsiyon miktarını artırırken, sterik etkiyi azaltabilir ve çözeltide serbest haldeki polimerin hidrodinamik yarıçapının (R_h) azalmasına neden olabilir. Öte yandan, yan zincir yoğunluğunun ve uzunluğunun artması adsorpsiyon miktarını ve adsorpsiyon tabaka kalınlığını azaltırken, sterik engel nedeniyle R_h 'ı artırabilir [25,26]. R_h , çözelti içindeki polimerin hareketini ve polimer zincirinin etkin boyutunu ifade eden bir büyüklüktür. Bu büyüklüğün sabit olmadığı, solvent koşulları, sıcaklık ve diğer çevresel faktörlere bağlı olarak değişebileceği vurgulanmalıdır.

PCE'nin ana zincir uzunluğunun belli oranlara kadar artışı ile adsorpsiyonun artması, hidratasyonun gecikmesine yol açabilmektedir. PCE kullanımının hidratasyon ürünlerinin büyümesini engellemesi de priz süresini uzatan parametrelerdendir. Yan zincir uzunluğunun artışı dispersiyon etkisi ile çimento tanelerinin su ile temasını kolaylaştırarak hidratasyonu hızlandırabilmektedir [26].

5. Sonuçlar

Çimentolu sistemlerin hem taze hem de sertleşmiş hal özelliklerini etkileyen PCE-çimento uyumu konusunda yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Çimentodaki C_3A miktarının artışı, karışımların taze hâl ve reolojik özelliklerini olumsuz etkileyerek katkı ihtiyacını arttırmaktadır. Çimentonun hidratasyon hızını ayarlaması ve PCE ile rekabetçi adsorpsiyona sebep olması nedeniyle, karışımlarda bulunan sülfat türü ve miktarının tayini büyük öneme sahiptir.

- Çimento inceliğindeki artış karışımın su ihtiyacını arttıran ortamda yeterli miktarda PCE bulunması hâlinde, karışımın taze hâl ve reolojik özelliklerini olumlu etkileyebilmektedir. İnceliğin taze hâl özelliklerine etkisinde, çimentonun kimyasal bileşimi önemli bir etkidir.

- PCE'nin ana zincirini oluşturan monomer tipi, ana zincirin rijitliğini değiştirmektedir. Bu durum aynı zamanda PCE'nin adsorpsiyon özelliğini değiştirerek çimentolu sistemlerin reolojik performansını etkilemektedir. Ayrıca, PCE'nin ana zincirinin uzun olması, anyonik grup miktarının artışına bağlı olarak adsorpsiyonun da artmasına yol açmaktadır ancak, belli bir ana zincir uzunluğundan sonra, PCE'nin birden fazla çimento tanesine adsorpsiyonu sonucu köprüleme etkisi ortaya çıkmaktadır. Bu da PCE'nin etkinliğini azaltarak akıcılığı olumsuz etkilemektedir.

- Polietilen glikol (PEG) yan zincirler, sterik itki sayesinde çimentolu sistemin akıcılığı üzerinde büyük etkiye sahiptir ancak yan zincir uzunluğunun artması, toplam yük yoğunluğunun azalmasına dolayısıyla adsorpsiyonun azalmasına yol açmaktadır. Ayrıca uzun yan zincirlerin birbirlerine takılması sonucu PCE'nin etkinliği azalabilmektedir. Yüksek yan zincir yoğunluğu, adsorpsiyonu engellemesi nedeniyle PCE'nin performansını düşürerek çimentolu sistemin akıcılığını azaltmaktadır.

- PCE'nin çimento tanesine adsorbe olması, hidratasyonun yavaşlamasına dolayısıyla priz süresinin uzamasına neden olmaktadır. Bu durum erken yaş dayanımlarına olumsuz etki ederken, ileriki yaşlarda bu etki ortadan kalkabilmektedir.

6. Kaynaklar

1. Sha, S., Wang, M., Shi, C., & Xiao, Y. (2020). Influence of the structures of polycarboxylate superplasticizer on its performance in cement-based materials-A review. *Construction and Building Materials*, 233, 117257.
2. Xiang, S., Gao, Y., & Shi, C. (2020). Progresses in synthesis of polycarboxylate superplasticizer. *Advances in Civil Engineering*, 2020. 1-14. <https://doi.org/10.1155/2020/8810443>
3. Kobya, V. (2023). Effect of Water Reducing Admixture Chain Length on Behaviour of Cementitious Systems Having Different C_3A Content. Ph.D. thesis, Bursa Uludağ University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Bursa, Turkey.
4. Stecher, J., & Plank, J. (2019). Novel concrete superplasticizers based on phosphate esters. *Cement and Concrete Research*, 119, 36-43.
5. Wang, Z., Kang, Y., & Peng, J. (2021). Microstructural characteristics analysis of PCE copolymer from methyl allyl polyethylene glycol and Methacrylic acid based on determination of monomer reactivity ratios. *Journal of Wuhan University of Technology- Materials Science Edition*, 36, 223-229.
6. Lange, A., & Plank, J. (2016). Contribution of non-adsorbing polymers to cement dispersion. *Cement and Concrete Research*, 79, 131-136. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.003>.
7. Li, Y., Yang, C., Zhang, Y., Zheng, J., Guo, H., & Lu, M. (2014). Study on dispersion, adsorption and flow retaining behaviors of cement mortars with TPEG-type polyether kind polycarboxylate superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 64, 324-332.
8. Mardani-Aghabaglou, A., Felekoğlu, B., & Ramyar, K. (2017a). Effect of cement C_3A content on properties of cementitious systems containing high-range water-reducing admixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8), 04017066.
9. Mardani-Aghabaglou, A., Son, A. E., Felekoğlu, B., & Ramyar, K. (2017b). Effect of cement fineness on properties of cementitious materials containing high range water reducing admixture. *Journal of Green Building*, 12(1), 142-167.
10. Ferrari, L., Bernard, L., DeYZhner, F., Kaufmann, J., Winnefeld, F., & Plank, J. (2012). Characterization of Polycarboxylate-Ether Based Superplasticizer on Cement Clinker Surfaces. *Journal of the American Ceramic Society*, 95(7), 2189-2195.
11. Kong, X. M., Zhang, Y. R Hou. S. S. (2013). Study on the rheological properties of portland cement pastes with polycarboxylate superplasticizers. *Rheology Acta* 52 (7): 707-718.
12. Karakuzu, K., Kobya, V., Mardani-Aghabaglou, A., Felekoğlu, B., & Ramyar, K. (2021). Adsorption properties of polycarboxylate ether-based high range water reducing admixture on cementitious systems: A review. *Construction and Building Materials*, 312, 125366.
13. Prince, W., Edwards-Lajnef, M., & Aı tcin, P. C. (2002). Interaction between ettringite and a polynaphthalene sulfonate superplasticizer in a cementitious paste. *Cement and Concrete Research*, 32(1), 79-85.
14. Röβler, C., Möser, B., & Stark, J. (2007). Influence of superplasticizers on C_3A hydration and ettringite growth in cement paste. In *Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement*, Montreal, Vol. 12.
15. Myers R.J., Geng G., Li J., Rodríguez E.D., Ha J., Kidkhunthod P., Spósito G., Lammers L.N., Kirchheim A.P., Monteiro P.J.M., Role of adsorption phenomena in cubic tricalcium aluminate dissolution, *Langmuir* 33 (2017) 45-55, <http://dx.doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b03474>.
16. Plank, J., & Hirsch, C. (2007). Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 537-542.
17. He, Y., Zhang, X., Shui, L., Wang, Y., Gu, M., Wang, X., ... & Peng, L. (2019). Effects of PCEs with various carboxylic densities and functional groups on the fluidity and hydration performances of cement paste. *Construction and Building Materials*, 202, 656-668.
18. Kashani, A., Provis, J. L., Xu, J., Kilcullen, A. R., Qiao, G. G., & van Deventer, J. S. (2014). Effect of molecular architecture of polycarboxylate ethers on plasticizing performance in alkali-activated slag paste. *Journal of Materials Science*, 49(7), 2761-2772.
19. Zhang, Q., Shu, X., Yu, X., Yang, Y., & Ran, Q. (2020). Toward the viscosity reducing of cement paste: Optimization of the molecular weight of polycarboxylate superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 242, 117984.
20. Ma, Y., Shi, C., Lei, L., Sha, S., Zhou, B., Liu, Y., & Xiao, Y. (2020). Research progress on polycarboxylate based superplasticizers with tolerance to clays-A review. *Construction and Building Materials*, 255, 119386.
21. Feng, H., Feng, Z., Wang, W., Deng, Z., & Zheng, B. (2021). Impact of polycarboxylate superplasticizers (PCEs) with novel molecular structures on fluidity, rheological behavior and adsorption properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 292, 123285.
22. Kobya, V., Karakuzu, K., & Mardani, Ali. (2023). Effect of water reducing admixture main and side chain length variation on the time dependent slump flow performance of mixtures with different C_3A content. *International Journal of Science, Engineering and Management*, 10(1).
23. Kobya, V., Karakuzu, K., Mardani, A., Felekoğlu, B., & Ramyar, K. (2023). Combined interaction of PCE chains lengths, C_3A and water content in cementitious systems. *Construction and Building Materials*, 378, 131178.
24. Peng, X., Li, X., & Li, Z. (2013). Evaluation of the dispersing properties of polycarboxylate-type superplasticizers with different molecular weight in cement systems. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 34(9), 1265-1272.
25. Aı tcin, P.C., Flatt, R.J. (Eds.). (2016). *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Number 59. Cambridge, UK.
26. Kobya, V., Karakuzu, K., Mardani, A., Felekoğlu, B., & Ramyar, K. (2023). Effect of chain characteristics of polycarboxylate-based water-reducing admixtures on behavior of cementitious systems: A Review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(8), 03123002.