

**Türkiye’de Mevcut Bazı Puzolanik Malzemelerin Özellikleri
ile Çimento Harcı Alkali-Silis Tepkimesi Genleşmesine
Etkileri Arasında İstatistiksel Bağlılıklar Geliştirilmesi**

Program Kodu: 1002

Proje No: 215M816

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Sinan Turhan ERDOĞAN

Araştırmacı:

Prof. Dr. Mustafa TOKYAY

Bursiyer:

Mahdi MAHYAR

MAYIS 2017

ANKARA

ÖNSÖZ

Alkali-silis tepkimesi portland çimentolu betonların dayanıklılığını etkileyen ciddi bir sorundur. Sulu ortamlarda alkali elementler (ve hidroksil iyonları) ile reaktif silis içeriği olan beton agregaları arasında gerçekleşen bu tepkime betonun içinde genleşmeye ve müteakip çatlamaya yol açarak betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz etkiler. Alkali-silis tepkimesini engellemenin veya etkilerini azaltmanın en ekonomik yöntemlerinden biri çimento hidratasyonu esnasında puzolanik vb. ikincil tepkimeler ortaya çıkaran, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, veya doğal puzolan gibi toz mineral katkıları kullanmaktır. Ancak eklenebilecek her malzeme farklı kimyasal kompozisyona sahip olacağından, genleşmeyi azaltıcı etkileri farklı olacaktır. Belirli bir çimento-reaktif agregası kombinasyonu ile betonda kullanıldıklarında gösterecekleri genleşme azaltıcı performans deneysel olarak bulunabileceği için, bu mineral katkıların ve çimentonun oksit içeriği ile uzama azaltmadaki etkinlikleri ilişkilendirilebilir. TÜBİTAK 1002 Hızlı Destek Programı çerçevesinde desteklenen bu oniki aylık proje kapsamında toplam onbir farklı uçucu kül/yüksek fırın cürufu/doğal puzolan, iki farklı portland çimentosu, ve bir reaktif agregası kullanılarak ASTM C 1567 deney yöntemi harç numunesi 14. gün uzama yüzdesi ile karışımdaki bağlayıcı tozların miktarları ve oksit içerikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu ilişkilerden yola çıkarak uzama-toplam oksit içeriği arasında bir bağıntı geliştirilmiş, seçilen bir çimento/mineral katkı/agregası kombinasyonu için uzama miktarını tehlikeli kabul edilen bir değerin altında tutmak için gereken çimento ikame yüzdesini tahmin eden bir model önerilmiştir. Modelin başarısı yapılan tahminler ile ölçülen değerler kıyaslanarak tartışılmış ve geliştirilmesi için öneriler sunulmuştur.

İÇİNDEKİLER

Önsöz.....	ii
İçindekiler.....	iii
Tablo Listesi	iv
Şekil Listesi	v
Özet	vi
Abstract	vii
1. Giriş	1
2. Literatür Özeti.....	2
3. Gereç ve Yöntem	5
3.1 Kullanılan Malzemeler.....	5
3.2 Yöntem.....	10
4. Bulgular.....	13
4.1 ASTM C 1567 Deneyi Uzama Miktarları.....	13
4.1.1 Uçucu Kül İkamesinin Harç Uzamasına Etkileri.....	13
4.1.2 Öğütülmüş, Granüle Yüksek Fırın Cürufu İkamesinin Harç Uzamasına Etkileri.....	15
4.1.3 Doğal Puzolan İkamesinin Harç Uzamasına Etkileri.....	16
4.2 Puzolan Kimyasal Kompozisyonunun Harç Uzamasına Etkileri.....	17
4.2.1 Oksit Miktarları ile Uzama Arasındaki İlişki – Ayrı Değerlendirme.....	17
4.2.2 Oksit Miktarları ile Uzama Arasındaki İlişki – Gruplu (Birleşik) Değerlendirme.....	20
4.2.3 Oksit Miktarları ile Uzama Arasındaki İlişki – Tüm Oksitlerin Etkisi.....	24
4.2.4 Oksit Miktarları ile Uzama Arasındaki İlişki – Oksitlerin Farklı Tepkiyebilirliklerinin Etkisi.....	25
4.2.5 Belirli bir Reaktif Agregat-Çimento Kombinasyonunda Uzamayı Sınırlandırmak İçin Gerekli Mineral Katkı Miktarının Tahmini.....	27
Tartışma/Sonuç	30
Kaynaklar	32

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Kullanılan toz malzemeler.....	5
Tablo 2. Kullanılan toz malzemelerin kimyasal kompozisyonları.....	6
Tablo 3. Kullanılan mineral katkıların fiziksel özellikleri.....	7
Tablo 4. Harç karışımlarının hazırlanmasında kullanılan malzeme oranları.....	10
Tablo 5. Kullanılan iki çimento ve bir rektif agrega ile yapılan harçların uzamasını % 0.10'un altında tutmak için gerektiği hesaplanan ve ölçülen mineral katkı miktarları.....	28

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Kullanılan uçucu küllerin x-ışını kırınım desenleri.....	8
Şekil 2. Kullanılan yüksek fırın cüruflarının x-ışını kırınım desenleri.....	8
Şekil 3. Kullanılan doğal puzolanların x-ışını kırınım desenleri.....	9
Şekil 4. Kullanılan portland çimentolarının x-ışını kırınım desenleri.....	9
Şekil 5. Uçucu kül içeren harç numunelerinin deney sonundaki uzama miktarlarının kül miktarına bağlı değişimi.....	14
Şekil 6. Uçucu kül içeren tüm harç numunelerinin deney sonu uzama miktarlarının kül miktarına bağlı değişimi.....	14
Şekil 7. Yüksek fırın cürufu içeren harç numunelerinin deney sonundaki uzama miktarlarının cüruf miktarına bağlı değişimi.....	15
Şekil 8. Yüksek fırın cürufu içeren tüm harç numunelerinin deney sonu uzama miktarlarının cüruf miktarına bağlı değişimi.....	15
Şekil 9. Doğal puzolan içeren harç numunelerinin deney sonu uzama miktarlarının doğal puzolan miktarına bağlı değişimi.....	16
Şekil 10. Doğal puzolan içeren tüm harç numunelerinin deney sonu uzama miktarlarının doğal puzolan miktarına bağlı değişimi.....	17
Şekil 11. UK 1 içeren tüm harç numunelerinin deney sonu uzama miktarlarının numunelerdeki: a) SiO ₂ içeriği ile ilişkisi; b) Na ₂ O içeriği ile ilişkisi.....	18
Şekil 12. UK 1 içeren tüm harç numunelerinin deney sonu uzama miktarlarının numunelerdeki çeşitli oksitlerin miktarı ile ilişkisi.....	19
Şekil 13. Kullanılan tüm uçucu küller ile ve iki çimento ile ayrı ayrı hazırlanmış harçların uzamasının çeşitli oksit eşdeğerleri ile ilişkisi.....	21
Şekil 14. Kullanılan tüm cüruflar ile ve iki çimento ile ayrı ayrı hazırlanmış harçların uzamasının çeşitli oksit eşdeğerleri ile ilişkisi.....	22
Şekil 15. Kullanılan tüm doğal puzolanlar ile ve iki çimento ile ayrı ayrı hazırlanmış harçların uzamasının çeşitli oksit eşdeğerleri ile ilişkisi.....	23
Şekil 16. Tüm mineral katkı/çimento kombinasyonları için ASTM C 1567 deneyi son uzaması ile a) SiO ₂ eq; ve b) CaOeq arasındaki ilişki.....	24
Şekil 17. Tüm mineral katkı/çimento kombinasyonları için ASTM C 1567 deneyi son uzaması ile CaOeq/SiO ₂ eq arasındaki ilişki: a) normalize edilmemiş; b) normalize edilmiş.....	24
Şekil 18. Tüm mineral katkı/çimento kombinasyonları için ASTM C 1567 deneyi son uzaması ile Cb/Cc arasındaki ilişki.....	26

ÖZET

Portland çimentosu betonu, mekanik özellikleri sebebiyle, en çok kullanılan yapı malzemesidir. Çevresel etkenler karşısında dayanıklı oluşu inşasında kullanıldığı yapıların uzun servis ömürleri olmasını sağlamaktadır. Yapılarda gözlenen en ciddi dayanıklılık sorunlarından biri betondaki agregaların alkali silis tepkimesine (AST) bağlı genleşmelerdir. AST'den sıkça etkilenen yapılar arasında barajlar gibi su yapıları, ve yatay yüzeyler sayılabilir. Betonun AST dayanıklılığını artırmak için kullanılan en pratik ve en yaygın yöntem uygun mineral katkı maddelerinin çimento ile kısmen ikame edilerek kullanılmasıdır. Bu amaçla doğal puzolan, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi malzemeler sıklıkla beton yapımında kullanılmaktadır. Bu malzemeler genelde beton üretim tesislerinde standartlara uygun ikame yüzdeleri seçilerek, kaynakları ve kimyasal kompozisyonları arasındaki farklar dikkatlice değerlendirilmeden kullanılmaktadır. AST kaynaklı genleşmelerin büyüklüğü ve sorun yaratıp yaratmayacakları hakkında fikir edinmek için önerilmiş olan pek çok deney mevcuttur. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı, kısa süren ve düşük miktarda malzeme kullanan ASTM C 1567 (veya kaynağı olan ASTM C1260) standardında tarif edilen hızlandırılmış harç çubuğu genleşme deneyidir. Son yıllarda yurt dışında bu deneyin sonuçları ile kullanılan çimento ve mineral katkıların kimyasal ve fiziksel özellikleri arasında bağıntılar önerilmiştir. Bu gibi bağıntılar çeşitli malzeme parametrelerinin genleşme miktarına etkisi hakkında fikir vermektedir. Bu çalışmalar yurt dışında mevcut mineral katkı ile yapılmış olduğu için, Türkiye'de ortaya çıkan malzemeler ile de yapılmaları gerekmektedir. Bu çalışmada farklı kimyasal içeriğe sahip onbir mineral katkı, iki farklı çimento ile yedi farklı ikame oranında kullanılmış, ASTM C 1567 deneyi uzama sonuçlarına etkileri incelenmiş, farklı harçların uzama miktarları ile oksit içerikleri arasında istatistiksel bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen bağıntılarla, oksit içeriği bilinen bir mineral katkı kullanılarak, bir çimento/agrega kombinasyonunun uzamasını sınır değerlerin altında tutmak için gereken ikame yüzdesi hesaplanabilmektedir. Deneysel sonuçlar ile tahmin edilen ikame yüzdeleri kıyaslanarak modelin başarısı tartışılmış, iyileştirilmesi için öneriler sunulmuştur. Projede kullanılan mineral katkıların ülkenin farklı bölgelerinde mevcut olması sebebiyle çalışma sonuçlarının sosyoekonomik fayda sağlayabileceği ümit edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Alkali-Silis reaksiyonu, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu, doğal puzolan, istatistiksel model

ABSTRACT

Portland cement concrete is the most common construction material worldwide due mainly to its mechanical properties. Durability of concrete against environmental effects directly influences the service life of concrete structures. One of the most senior durability problems in structures is expansion due to Alkali-Silica Reaction (ASR). Some structures that commonly suffer due to ASR are hydro structures such as dams, and level surfaces. The most economical and practical solution for preparing highly durable concretes is partial replacement of Portland cement with suitable mineral admixtures or pozzolanic materials. For this purpose the use of natural pozzolans, fly ash, and ground granulated blast furnace slag are very common in concrete industry. These materials are typically used at ready-mixed concrete plants at replacement amounts satisfying relevant standards, without differences in source and composition being considered carefully. There exist many tests to estimate the magnitude of ASR-related expansions and whether these will pose problems or not. The most common one of these which also is the quickest and the one that used the lowest quantity of material is the accelerated mortar bar expansion test method ASTM C 1567 (or its parent standard ASTM C 1260). In recent years, attempts have been made abroad to develop relations between the results of this test and the chemical and physical properties of the cements and mineral admixtures used. Such relations give an idea about the influence of various material parameters on the amount of expansion. Since such studies have been conducted using mineral admixtures available in other countries, they also need to be conducted with materials in Turkey. In this study, eleven chemically different mineral admixtures, two different cements, and seven different cement-replacement ratios were used, their influence on ASTM C 1567 test expansion was evaluated, and a statistical model was developed between the amounts of expansion of different mortars and their oxide contents. The cement-replacement level needed to keep the expansions of a cement/aggregate combination below a specified limit, using a given mineral admixture with a known oxide composition, can be calculated with the model. The success of the model is discussed by comparing the estimated replacement levels with those determined by experimentation, and ideas for improvement have been proposed. As the admixtures intended to be studied are available in various regions of the country, it is hoped that the project results can provide socio-economical benefits.

Keywords: Alkali silica reaction, fly ash, ground granulated blast furnace slag, natural pozzolan, statistical model

1. GİRİŞ

Portland çimentolu beton yapıların en önemli özeliği çevresel etkenlere karşı dayanıklı oluşlarıdır. Betonun zaman içinde çevresel etkenlere karşı koyabilme başarısı, çevresel etkenin niteliğine ve betonu oluşturan malzemelerin kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Dayanıklılığı olumsuz etkileyen olaylardan önemli bir tanesi alkali silis tepkimesidir (AST). AST bazı silisli beton agrega tiplerinin betonu oluşturan malzemelerden veya betonun dışından gelen alkalilerle tepkimeye girmesi ve sulu ortamda genleşmesi olayıdır. AST genleşmeleri yapısal elemanın şekline ve kısıtlamalarına bağlı olarak çatlamaya yol açabilmektedir. AST kaynaklı çatlamalar betonun içine su ve başka maddelerin nüfuzunu hızlandırmakta ve başka dayanıklılık sorunlarının da ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.

Betonun AST dayanıklılığını artırmak için önerilmiş pek çok yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerden en ekonomik ve pratik olanlarından biri portland çimentosunu bir mineral katkı malzemesi ile kısmen ikame etmektir. Bu işlem çimento hidrasyon ürünü kalsiyum hidroksit ile mineral katkının içerdiği silisli bileşenleri tepkimesi (puzolanik tepkime) sonucunda betonun geçirimsizliğini azaltarak ve duruma göre sistemdeki serbest alkali miktarlarını azaltarak zararlı genleşme tepkimelerinin miktarını azaltır. Farklı mineral katkılar farklı kimyasal kompozisyonlara sahip olduğundan yol açabildikleri puzolanik tepkime miktarı ve dolayısıyla genleşme azaltıcı etkileri farklıdır. Dolayısıyla aynı etkiyi yaratmak için farklı miktarlarda kullanılmaları gerekmektedir. Genellikle mineral katkılar uçucu küller, yüksek fırın cürüfları, doğal puzolanlar, veya silis dumanı gibi sınıflara ayrılarak, aynı sınıftaki malzemeler benzer etki yaratacak gibi yorumlanır. Oysa benzer kabul edilen malzemeler arasında bile davranış farklılıkları olabilmektedir. Örneğin uçucu küller bu sebeple içerdikleri kireç miktarına göre alt sınıflara ayrılmaktadır. Ancak bu durumda bile genellemeler yanıltıcı olabilmektedir. Mineral katkıların AST'ye etkilerini değerlendirmenin daha sağlıklı bir yöntemi genleşme uzamasının ölçüldüğü deneyler yapılmasıdır. ASTM C 1567 deneyi bu amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu hızlı deney yöntemi bile inşaat projelerinde atlanabilmekte ve AST'nin kontrol edilebilmesi için gereken çimento ikame miktarları bilinçsiz olarak seçilebilmektedir. Deney sayısının azaltılması ve bazı deneylerin yerine güvenilir modeller veya bağıntılar kullanılabilmesi bu riskli durumun önüne geçilmesine yardımcı olabilir. Bu sebeple, son yıllarda bu deney yönteminden elde edilen harç uzama yüzdeleri ile çimento ve mineral katkı kimyasal kompozisyonları arasında bir takım bağıntılar önerilmiştir. Ülkemizde mevcut doğal mineral katkılar veya ortaya çıkan yapay mineral katkılarla bu tür bağıntılar pek geliştirilmemiştir. Özellikle endüstriyel atıkların ortaya çıktığı fabrika işlemlerinin farklılık gösterebilmesi sebebiyle, bu tür uzama-mineral katkı kompozisyonu ilişkilerinin ülkemiz için de çalışılması, modeller önerilmesi, önerilen modellerin başarısının sınanması, gerekiyorsa yeni modeller önerilmesi önemlidir.

Bu proje kapsamında Türkiye'de mevcut üç farklı tipten onbir adet doğal veya yapay mineral katkı seçilerek iki farklı çimento ve bir reaktif agrega ile harçlar hazırlanmış, ASTM C 1567 deneyi sonunda gösterdikleri uzama miktarı ile çimento/katkı sisteminin kimyasal kompozisyonu arasında bağıntılar kurulmuş, anlamlı olan ilişkiler belirlenerek bunları içeren bir istatistiksel model önerilmiştir. Ayrıca bu model kullanılarak her bir mineral katkı ile deney sonunda seçilmiş bir sınır uzama miktarının altında kalabilmek için gereken en düşük ikame yüzdesi tahmin edilmiş ve deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Modelin başarısı tartışılmış, geliştirilmesi için önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Alkali silis tepkimesi (AST) betonun dayanıklılığını olumsuz etkileyen olaylardan önemli bir tanesidir. AST, bazı silisli beton agrega tiplerinin betonu oluşturan malzemelerden veya betonun dışından gelen alkali ile tepkimeye girmesi ve sulu ortamda genleşmesi olayıdır. AST genleşmeleri miktarlarına, yapısal elemanın şekline ve kısıtlamalarına bağlı olarak çatlamaya yol açabilmektedir. AST kaynaklı çatlamalar betonun içine su ve başka maddelerin nüfuzunu hızlandırmakta ve başka dayanıklılık sorunlarının da ortaya çıkmasına neden olabilmektedir (Baradan, 2010; Erdoğan, 2010; Ramyar, 2013). Yapılar bazen bir kaç sene gibi kısa bir sürede, bazen de daha uzun vadede tamir veya yıkıp yeniden yapma gerektirebilmektedir.

Sertleşmiş betonun gözenek çözeltisinin içindeki alkalilerin ve reaktif agregaların tepkime ve genleşme mekanizmaları hakkında çok sayıda çalışma mevcuttur (Diamond, 1975; Diamond, 1976). Buna rağmen alkali-silis tepkimesinin nasıl oluştuğu tam olarak bilinmemektedir (Fournier vd., 2009; Rajabipour vd., 2015). Dolayısıyla AST genleşmesini azaltmak amacıyla çok çeşitli yöntemler önerilmiştir (Malvar vd., 2002; Turanlı vd., 2003; Andiç vd., 2008; Akçaözoğlu vd., 2010; Demir ve Arslan, 2013). Önerilen yöntemlerden çoğu karışımın içindeki toplam alkali miktarını azaltmak (ASTM C 150, 2017), dışarıdan su veya alkali tuzlarının girişini yavaşlatmak amacıyla betonun geçirimsizliğini azaltmak (Ramlochan vd., 2010), alkalileri çözünmeyecek şekilde hidrasyon ürünlerine bağlamak (Chen ve Brouwers, 2010), oluşan AST jelinin genleşme miktarını etkilemek (Buldeel vd., 2010) stratejilerinden birini veya birkaçını uygulamaktadır. AST uzamasını azaltmak amacıyla kullanılan yöntemlerden en yaygın ve muhtemelen en pratik olanı portland çimentosunun uygun bir mineral katkı ile kısmen ikame edilmesidir (Thomas, 2011). Bu tür katkılar puzolanik tepkime sayesinde oluşmuş olan çimento hidrasyon ürünü kalsiyum hidroksit C-S-H'a dönüşmesini sağlayarak betonun ortalama gözenek boyutunu ve geçirimsizliğini düşürür. Ayrıca cüruf gibi bazı mineral katkıların hidrasyonu esnasında ortamdaki alkalilerin bir kısmı bağlanarak AST'ye katkı verme durumlarını yitirir. Çimento ikamesi çimentodan gelen alkali miktarını azaltacağı için, mineral katkının içerisinde yüksek miktarda çözünbilir alkali bulunmadığı durumlarda, ortamdaki toplam alkali miktarı buna bağlı AST oluşumu azalır. Ancak farklı mineral katkılar farklı miktarlarda silis içeriğine sahip olduğundan, ve içerdikleri oksitlerin bağlı olduğu mineraller arasındaki farklar sebebiyle farklı çözünürlüğe sahip olacakları için AST'yi azaltmaktaki etkinlikleri farklılık gösterir. Ayrıca betonun AST genleşme miktarı ve içinde çatlak oluşup oluşmaması betonun ve betonu oluşturan malzemelerin kimyasal yapılarına bağlı olduğu gibi, betonun fiziksel ve mekanik yapısına da bağlıdır. Tüm bu özelliklerin belirlenmesi ve değerlendirilmesi zor olduğu için AST riski halihazırda deneye dayalı olarak değerlendirilmektedir. Bu amaçla ortaya atılmış olan çok sayıda deney yöntemi mevcuttur (Grattan-Bellew, 1997; Thomas vd., 2006; Lindgård vd., 2012; Ideker vd., 2012). Bu yöntemlerin bir kısmı beton, bir kısmı harç numuneleri üzerinde uygulanır. Doğrudan agregaların tepkiyebilirliğini inceleyen yöntemler de önerilmiştir (Chen vd., 2010; Fernandes vd., 2016). Bu yöntemlerin bir kısmı ASTM veya EN tarafından standartlaştırılmıştır. Yöntemlerin süreleri, maliyetleri ve gerektirdikleri zahmet numuneye de bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Bu yöntemler arasında belki de en yaygın olarak uygulananı ASTM C 1260 (2014) deney yöntemidir. Harç numuneleri üzerinde uygulanan bu yöntem "hızlı harç çubuğu deneyi" olarak da anılmaktadır. Bu deneyde sonuçlar numune

hazırlanmasından sonra 16 günde alınabilmektedir. Bu yöntem agregaların AST riskini değerlendirmek için önerilmişse de, zaman içinde AST riskine çimento tipinin, puzolan kullanımının vs. etkisini değerlendirmek için de kullanıldığından yakın geçmişte aynı yöntem ASTM C 1567 (2013) numarasıyla ve 'bağlayıcı kombinasyonlarının AST potansiyeline etkisi' tanımıyla da önerilmiştir. Bu deney yönteminde bir çimento/mineral katkı/ince agrega kombinasyonu kullanılarak harç prizma numuneleri yapılmakta, numuneler bir gün süreyle kalıpta tutulmakta, bir gün sonra kalıptan çıkarılarak oda sıcaklığında musluk suyu içerisinde 80 °C fırına konmakta, bir gün sonra ise 1 N NaOH çözeltisine konarak 80 °C'de fırında tutulmaktadır. Ondört gün boyunca aralıklı olarak uzun boyutunun boy ölçümü yapılarak birinci gün sonundaki boyuna kıyasla yüzde uzaması hesaplanmaktadır. Sıcak fırında 14 gün sonunda verdiği uzama miktarına bakılarak agrega/çimento/katkı kombinasyonunun tehlikeli bir genişmeye yol açıp açmayacağı yorumlanmaktadır. Bu deney yöntemindeki dipnotlara göre 2+14 gün sonunda % 0.10'dan daha düşük uzama gösteren agrega/bağlayıcı kombinasyonları ile beton üretildiğinde sahada gözlenen ASTM genişmeleri hasar vermeyecek seviyelerde olacaktır. Dolayısıyla bu değer bu deney sonundaki uzama için bir nevi sınır değerdir.

ASTM C 1567 deney yöntemi kullanılarak çimento ikamesinde kullanılan çeşitli mineral katkıların AST genişmesine etkileri ve genişmeyi azaltmadaki başarıları test edilebilecek olsa da bu işlem her yeni puzolanik katkı-çimento kombinasyonu için ve aynı malzemeyle farklı ikame yüzdelerinde iteratif olarak deney yapılmasını gerektirmektedir. Bu işlemi kolaylaştırabilmek ve farklı projeler için uygun katkı tipi ve miktarını öngörebilmek için son yıllarda yurt dışındaki malzemeler kullanılarak ASTM C 1260/C 1567 deneyi sonuçları ve katkı kimyasal ve fiziksel özellikleri arasında bağıntılar kurulmaya çalışılmaktadır (Malvar ve Lenke, 2006; Harish ve Rangaraju, 2013; Schumacher ve Ideker, 2014). Örnek olarak Malvar ve Lenke (2006) çimentonun ve uçucu külün CaO, SiO₂, MgO gibi oksitlerinin miktarlarına bağlı olarak çimento-kül karışımlarının ASTM C 1260 deneyi sonundaki numune genişmesinin sadece çimento içeren kontrol harcının genişmesine oranını veren bir bağıntı önermektedir. Benzer şekilde belirli bir kül ile deney sonunda kritik kabul ettikleri bir genişmenin (% 0.08) altında kalmak için gerekli çimento ikame yüzdesinin hesaplanması için de bir bağıntı önermektedir. Bu bağıntıların geliştirilmesinde kullanılan puzolanik özellikteki mineral katkı malzemelerinin tamamı uçucu küldür. Uçucu küllerin kimyasal ve fiziksel yapısı, ve dolayısıyla puzolanik olarak veya başka şekilde tepkimeye ne kadar açık oldukları geldiği kömürün özelliklerine ve yakma koşullarına bağlı olarak çok değişkenlik gösterebilmektedir (Aughenbaugh vd., 2013). Dolayısıyla yurt dışında yapılan çalışmaların beton karışım oranı önerilerini birebir uygulamak genellikle olumsuz veya kısıtlı başarıda sonuç vermektedir. Türkiye'de mevcut küllerin özellikleri üzerine araştırmalar yurtdışındaki küllerden çok farklı kabul edilebilecek kömür küllerinde sahip olduğumuza işaret etmektedir (Türker vd., 2004). Dolayısıyla Malvar ve Lenke (2006)'deki gibi bağıntılar muhakkak yerel malzemeler kullanılarak kontrol edilmeli ve iyileştirilmelidir. Örneğin Wright vd. (2011) kendi ülkelerindeki malzemeler için başka ülkelerdeki küller kullanılarak geliştirilmiş bağıntılardaki bazı katsayıları konservatif bularak değişiklikler önermiştir. Uçucu kül ile başka puzolanik malzemelerin mineral yapılarındaki veya kristal/amorf yapı oranlarındaki farklar da sonuçları etkileyebileceğinden, ülkemizde çokça bulunan doğal puzolanlar ve öğütülmüş, granüle yüksek fırın cürufu gibi puzolanik mineral katkıları değerlendirildiğinde bu bağıntıların bir miktar değişmesi olasılığı yüksektir. Shafaatian vd. (2013) ASTM C 1567 deneyinde uçucu küllerin genişmeyi nasıl azalttığını incelemiş ve alkali bağlanmasının/hapsinin ve geçirimsizlik

azaltımının etkili olduğuna karar vermiştir. Yüksek fırın cürufu veya doğal puzolanların alkali bağlama etkinlikleri uçucu küllerinkinden farklı olabileceği için performansa etkilerinin de farklı şekilde olacağı dolayısıyla geliştirilecek bir bağıntıyı farklı etkileyecekleri de öngörülebilir. Bu tür bir bağıntının güvenilir olabilmesi için farklı tiplerde ve kimyasal özelliklerde, farklı kaynaklardan temin edilmiş çok sayıda mineral katkının birbirinden farklı çimentolarla etkileşimlerinin incelenmesine dayalı olmalıdır.

Literatür taraması göstermiştir ki farklı mineral katkıların AST genişmesine etkilerini kimyasal içeriklerine bakarak değerlendirmek mümkündür. Mineral katkıların mineralojilerin x-ışını kırınım gibi bir deney ile değerlendirilmesi mümkün olsa da farklı katkıların içerdiği aynı mineral kristal boyutu vs. gibi farklılıklar ve dolayısıyla çözünme/tepkime farklılıkları gösterebilir. Ayrıca mineralojinin nicel olarak belirlenmesi kolay değildir. Dolayısıyla kimyasal içeriklerin değerlendirilmesinde araştırmacılar çimento ve mineral katkının oksit içeriklerini kullanmaktadır. Çimentodan gelen veya farklı mineral katkılardan gelen aynı oksit (örneğin SiO_2) farklı minerallerin içinden gelebileceği için AST'ye etkisi bakımından farklılık gösterebilir. Dolayısıyla modeller bazen aynı oksitin etkisini kaynağına göre farklı ele almaktadır (Malvar ve Lenke, 2006; Schumacher ve Ideker, 2014). Dolayısıyla, uygulamada ikili (çimento ve bir mineral katkı) sistemlerin yanı sıra üçlü ve hatta dörtli sistemler olsa da, modelleme bakımından bu gibi durumlar fazlasıyla karmaşık olmaktadır. Bu sebeple uzama-oksit içeriği ilişkisi için model geliştirmeye yönelik çalışmalarda yalnızca çimento içeren harçların AST uzamalarını referans alarak mineral katkıların AST uzamasına etkilerini incelemek yaygın yöntemdir. Yine bu tür çalışmalarda AST uzaması değişkeni olarak yalnızca deney sonu uzama miktarı kullanılmakta, erken yaşlardaki uzama miktarları değerlendirilmemektedir. Her ne kadar 1-14 gün aralığındaki uzamalar mineral katkıdan oksitlerin çözünürlüğü ve AST'ye etkisi hakkında bilgi verse de, bir agrega/çimento/katkı kombinasyonunun deneyde başarılı/başarısız olma değerlendirmesi yalnızca son uzama miktarına bağlı yapıldığından diğer sonuçları değerlendirmek oluşturulacak modellere fazla katkı sunmayan ancak karmaşıklıklarını ve tahmin belirsizliklerini artıran faktörler olacaktır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 Kullanılan Malzemeler

Bu araştırma projesi kapsamında ASTM C 1567 deney yöntemine uygun şekilde harç karışımları hazırlanarak numuneler dökülmüştür. Harçların hazırlanmasında Kızılırmak Nehri'nden temin edilen silisli dere kumu kullanılmıştır. Bu kum reaktif olduğu bilindiği için seçilmiş olup, kuvars minerali ve amorf yapıda silikon oksiti içermektedir. Bağlayıcı toz mineral katkı olarak altı farklı uçucu kül, iki farklı öğütülmüş, granüle yüksek fırın cürufu, üç farklı doğal puzolan, ve iki farklı portland çimentosu kullanılmıştır. Bu sayılar proje önerisinde belirtilmiş olan hedefi tutursa da, aslında daha fazla tip malzeme temin edilmek istenmiş fakat pek çok üretici/firma taleplerimize olumsuz cevap vermiştir. Malzemeler seçilirken mümkün olduğunca Türkiye'nin farklı yerlerinden temin edilmelerine ve birbirilerinden farklı kimyasal özelliklere sahip olmalarına çalışılmıştır. Yapay malzemelerin kaynakları, doğal olanların da beyana dayalı içerikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Kullanılan toz malzemeler

Mineral Katkı Kısaltması	Açıklama
UK 1	Soma termik santrali uçucu külü
UK 1	Sugözü termik santrali uçucu külü
UK 1	Çayırhan termik santrali uçucu külü
UK 1	Çatalağzı termik santrali uçucu külü
UK 1	Tunçbilek termik santrali uçucu külü
UK 1	Kemerköy termik santrali uçucu külü
YFC 1	Yüksek Fırın Cürufu – kaynağı öğrenilemedi
YFC 2	Yüksek fırın cürufu – kaynağı öğrenilemedi
DP 1	Perlit
DP 2	Zeolit
DP 3	Tras
PÇ 1	Baştaş CEM I tipi Portland çimentosu
PÇ 2	Çimsa CEM I tipi Portland çimentosu

Bu malzemelerin x-ışını floresans yöntemiyle bulunmuş olan kimyasal kompozisyonları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan toz malzemelerin kimyasal kompozisyonları

Kütle (%)	UK 1	UK 2	UK 3	UK 4	UK 5	UK 6	YFC 1	YFC 2	DP 1	DP 2	DP 3	PÇ 1	PÇ 2
SiO ₂	46.8	54.4	44.8	46.2	51.5	23.1	38.2	39.7	71.8	71.1	60.2	15.2	16.4
Al ₂ O ₃	27.1	26.5	13.3	14.6	20.6	12.8	10	10.6	13.8	12.3	17.1	4.13	4.16
CaO	12.7	3.18	15.6	3.58	1.49	38.9	36.7	36.9	1.11	2.55	6.23	64.8	64.1
Fe ₂ O ₃	5.14	7.35	9.31	20.2	13.3	8.11	1.16	1.16	1.85	1.3	5.76	3.67	3.56
SO ₃	1.85	0.481	5.54	1.31	0.966	11.6	1.46	1.26	0.0155	0.0211	0.573	4.98	4.05
Na ₂ O	0.41	0.573	1.74	0.315	0.0682	0.388	0.251	0.231	3.51	0.368	2.23	0.326	0.41
K ₂ O	1.69	2.17	2.27	5.15	1.59	1.97	1.1	0.835	5.49	5.33	2	1.07	0.708
TiO ₂	1.22	1.58	0.823	2.36	1.35	0.693	1.1	0.749	0.0298	0.0785	1	0.272	0.43
MgO	1.22	1.15	4.67	0.457	2.54	1.1	6.09	5.72	0.038	0.513	1.38	1.25	1.09
Minör bileşenler (P ₂ O ₅ , BaO, SrO, MnO, ZrO ₂ , Cr ₂ O ₃ , ZnO, NiO, Rb ₂ O, Cl, CuO, V ₂ O ₅ , Ga ₂ O ₃ , As ₂ O ₃ , PbO, Co ₂ O ₃ , Nb ₂ O ₅)	0.063	0.104	0.099	0.225	0.137	0.060	0.565	0.466	0.041	0.030	0.077	0.043	0.035
Kızdırma Kaybı	1.2	1.25	1.00	3.4	4.84	0.7	-0.81	-0.56	2.02	6.23	2.73	3.89	4.73
Na ₂ O _{eq}	1.522	2.001	3.234	3.704	1.114	1.684	0.975	0.780	7.122	3.875	3.546	1.030	0.876
CaO _{eq}	17.069	6.926	28.899	8.482	6.707	50.073	47.075	46.444	7.617	6.783	11.759	70.956	69.244
SiO _{2eq}	64.695	72.772	56.134	62.395	68.634	33.689	44.526	46.380	80.624	78.834	72.438	19.012	20.189

Tablo 2'nin alt kısmında ayrıca malzemeler için hesaplanmış bazı eşdeğerler (Na₂O, CaO, ve SiO₂) de verilmektedir. Bu eşdeğerler, alkali-silis tepkimesi uzamasına benzer şekilde katkı veren farklı oksitlerin gruplanabilmesine imkan tanımaktadır ve raporun sonuç kısmında kullanılmaktadır. Bu eşdeğerlerin hesaplanmasında şu formüller kullanılmıştır:

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658 \cdot \text{K}_2\text{O} \quad (1)$$

$$\text{CaO}_{\text{eq}} = \text{CaO} + 0.905 \cdot \text{Na}_2\text{O} + 0.595 \cdot \text{K}_2\text{O} + 1.391 \cdot \text{MgO} + 0.700 \cdot \text{SO}_3 \quad (2)$$

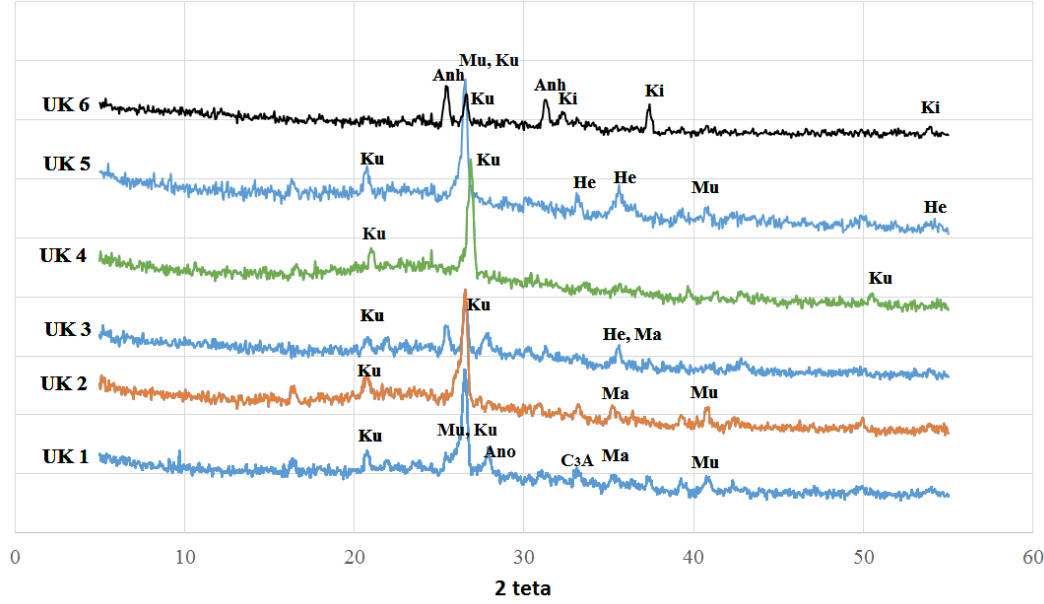
$$\text{SiO}_{2\text{eq}} = \text{SiO}_2 + 0.589 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.376 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad (3)$$

Görülebileceği gibi seçilen uçucu küllerin CaO içerikleri % 1.5 ile % 39 arasında, SiO₂ içerikleri % 23 ile % 54 arasında, eşdeğer alkali içerikleri % 1.1 ile % 3.7 arasında değişmektedir. Uçucu küllerden üçünün CaO içeriğinin düşük (< % 10), ikisinin orta (% 10-20), birinin ise yüksek (> % 20) olduğu görülmektedir. Dolayısıyla uçucu küller bu bakımdan geniş bir aralığı temsil edebilecek durumdadır. Küller arasında kükürt oksiti bakımından da farklı olanlar mevcuttur. Dolayısıyla bu gibi parametrelerin deney sonuçlarına etkisinin de incelenmesi mümkündür. Seçilen yüksek fırın cürüflarına bakıldığında, bekleneceği gibi kimyasal kompozisyon farklarının küçük olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla bu malzemelerin karışımlara etkisi daha ziyade soğutma vb. işlemler kaynaklı küçük ölçekli fiziksel yapı farklılıklarından, yani içerdikleri oksitlerin bağlı olduğu yapıların alkali ortamda çözünübilirlik farklarından kaynaklanabilir. İki cürufun eşdeğer alkali miktarları arasındaki küçük fark da bu deneyler özelinde önemli olabilir. Kullanılan üç doğal puzolanik malzemeden biri (DP 3) silis içeriği bakımından farklılık göstermektedir. DP 1'ün demir oksit içeriği de yüksek olarak göze çarpmaktadır. DP 1'in hem sodyum oksiti, hem de potasyum oksiti literatürde perlit için rastlandığı şekilde yüksek olup, üç doğal puzolanın sodyum ve potasyum içerikleri de geniş bir aralığı temsil etmektedir. Kullanılan iki portland çimentosu seçilirken dikkat edildiği üzere, PÇ 1'in alkali ve kireç eşdeğerleri PÇ 2'ninkilere kıyasla daha yüksek, silikon oksiti eşdeğeri ise daha düşüktür. Buna göre kimyasal özellik bakımından (incelik, amorflik gibi özellikleri bir kenara konursa) PÇ 1'in daha reaktif, yani daha fazla genleşen harç numuneleri oluşturması beklenebilir. Kullanılan mineral katkıların fiziksel özellikleri Tablo 3'te gösterilmektedir.

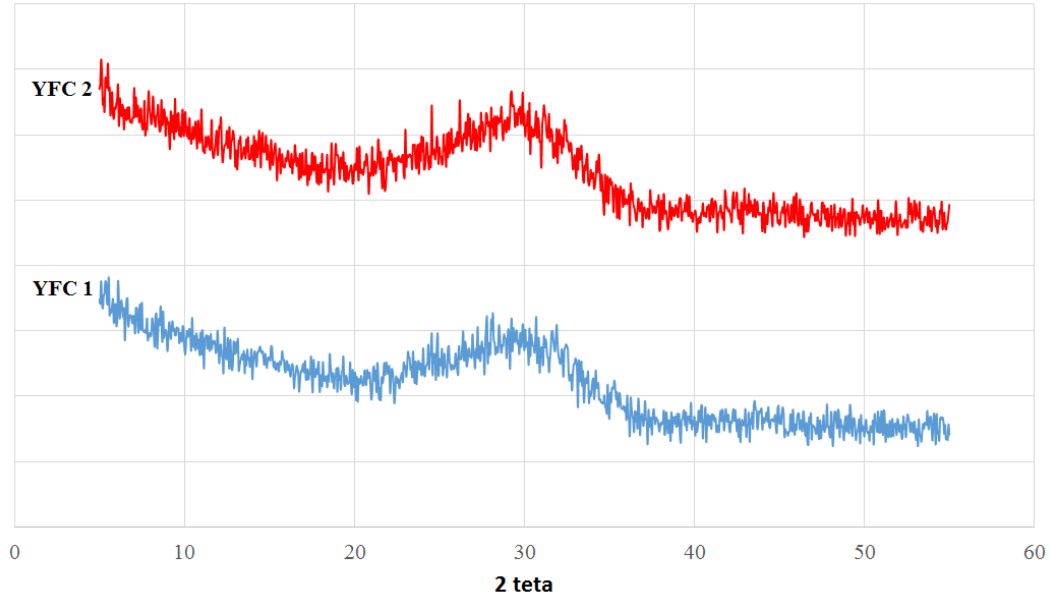
Tablo 3. Kullanılan mineral katkıların fiziksel özellikleri

Kütle (%)	UK 1	UK 2	UK 3	UK 4	UK 5	UK 6	YFC 1	YFC 2	DP 1	DP 2	DP 3	PÇ 1	PÇ 2
Özgül Ağırlık	2.39	2.31	2.25	1.99	2.15	2.50	2.87	2.84	2.38	2.19	2.35	3.16	3.15
Blaine incelik (cm ² /g)	2740	2900	2870	2890	4940	2420	4100	4150	5012	5032	5008	3400	3340

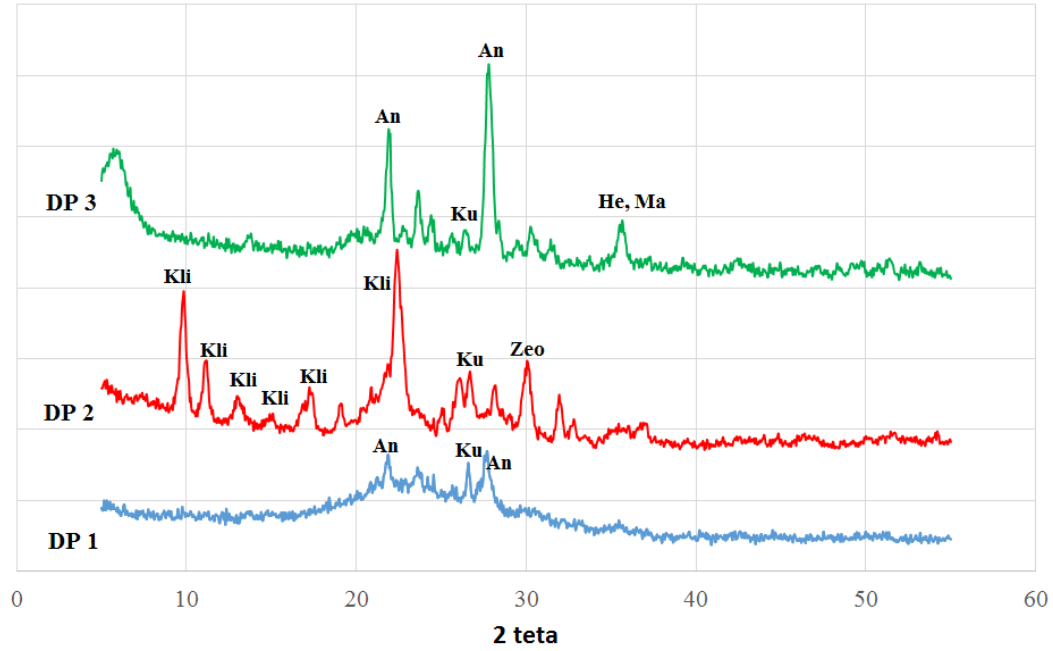
Buna göre beklendiği gibi yüksek fırın cürüfları doğal puzolanlardan ve uçucu küllerden biraz daha yoğundur. Doğal puzolanların incelikleri yüksek fırın cürüflarınıninkinden ve uçucu küllerinkinden yüksektir. Bağlayıcı tozların x-ışını kırınım difraktogramları ve mineral içerikleri Şekil 1-4'te gösterilmektedir (Ku: Kuvars; Anh: Anhidrit; Ki: Kireç; Mu: Mullit; He: Hematit; Ma: Manyetit; Ano: Anortit; Kli: Klinoptilolit; Zeo: Zeolit; C₃S: Alit; C₂S: Belit; C₃A: Trikalsiyum alüminat; C₄AF: Tetrakalsiyum alüminoferrit; Dih: Dihidrat alçı; x:tanımlanamadı)



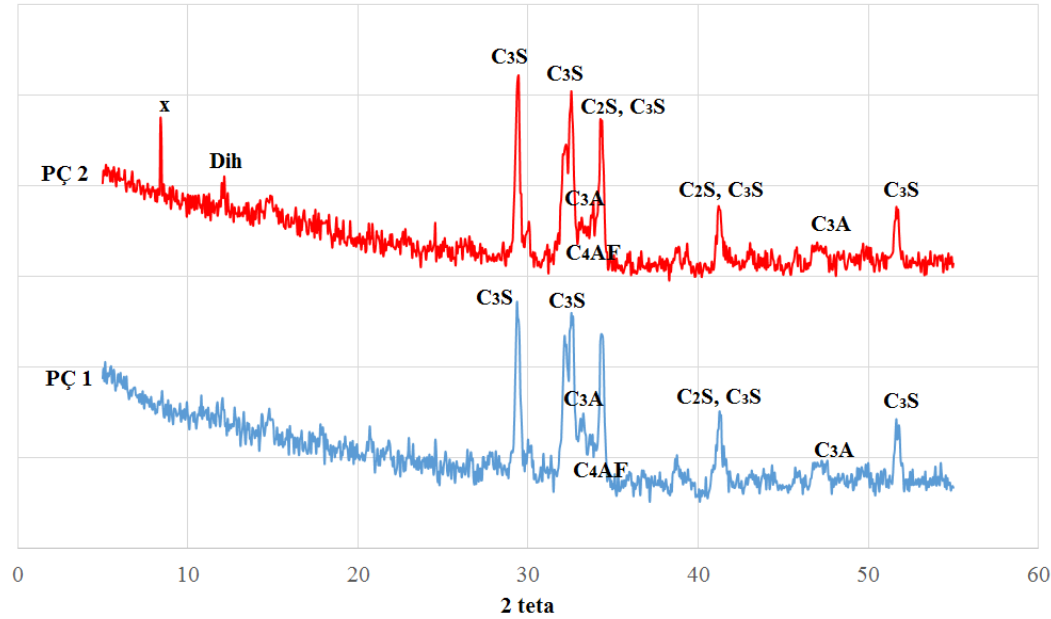
Şekil 1. Kullanılan uçucu küllerin x-ışını kırınım desenleri



Şekil 2. Kullanılan yüksek fırın cürufalarının x-ışını kırınım desenleri



Şekil 3. Kullanılan doğal puzolanların x-ışını kırınım desenleri



Şekil 4. Kullanılan portland çimentolarının x-ışını kırınım desenleri

Şekil 1-4 incelendiğinde uçucu küllerin tamamının kuvars içerdiği, UK 1-5'in mineralojik olarak birbirlerine daha çok benzediği, yüksek kireçli UK 6'nın ise farklı olarak anhidrit içerdiği görülmektedir. UK 6'nın % 1'den fazla SO_3 içerdiği düşünüldüğünde bu normaldir. Yüksek fırın cürufları çoğunlukla amorf ve 30 derece 2 teta civarında karakteristik bir geniş tepelik vermektedirler. Doğal puzolanlardan DP 2'nin doğal bir zeolit (klinoptilolit veya benzer bir yapı olduğu), DP 1'in (perlit) diğerlerinden daha amorf bir yapısı olduğu, DP 1 ve DP 3'ün anortit içerdiği anlaşılmaktadır. Kullanılan portland çimentolarının mineralojileri arasında fazla bir fark görülmemektedir. Tek ciddi fark PÇ 2'nin kırınım deseninde düşük açılarda olan bir pikdir. Bu 2 teta değerlerindeki pikler genelde hidrasyon ürünleri ile ilişkilendirilse de bu çimentonun bir miktar erken hidrasyon yapmış olması ihtimali düşüktür, zira görülmesi beklenen portlandit vb. başka hidrasyon ürünü pikleri yoktur.

3.2 Yöntem

Harç karışımı hazırlanmasında kullanılmak üzere seçilen tozlar Tablo 4'de verilen oranlarda karıştırılarak harçlar elde edilmiştir.

Tablo 4. Harç karışımlarının hazırlanmasında kullanılan malzeme oranları.

Karışım ismi	İnce agregası (g)	Portland çimentosu (g)	Mineral katkı (g)	Su (g)
Kontrol	990	440	0	206.8
1. Karışım (% 10 mineral katkı)	990	396	44	206.8
2. Karışım (% 20 mineral katkı)	990	352	88	206.8
3. Karışım (% 30 mineral katkı)	990	308	132	206.8
4. Karışım (% 40 mineral katkı)	990	264	176	206.8
5. Karışım (% 50 mineral katkı)	990	220	220	206.8
6. Karışım (% 60 mineral katkı)	990	176	264	206.8

Tablo 4'te görüldüğü gibi, ASTM C 1567 deney yöntemine uygun şekilde tüm harç karışımlarında su/bağlayıcı (0.47) ve agregası/bağlayıcı (2.25) oranları sabit tutulmuştur. Yine bu deney yöntemine uygun şekilde her karışımdan 254*254*2850 mm ebatlarında prizma numuneler hazırlanmıştır. Numuneler bir gün süreyle laboratuvar ortamında kalıpta tutulmuş, daha sonra kalıptan çıkartılarak uzun boyutları ölçülmüş ve numuneler oda sıcaklığında musluk suyu içerisine konarak 80 °C sıcaklıkta fırına konmuşlardır. Bir gün sonra da karışımlar sudan alınarak 1 N NaOH çözeltisi içeren kaplar içine üç'erli gruplar halinde konmuş ve kaplar deney sonuna kadar 80 °C sıcaklıkta tutulmuştur. Numuneler belirli günlerde boy ölçümü amacıyla kaplardan çıkartılarak soğumalarına izin vermeden ölçülerek tekrar çözelti içerisine konmuştur. Her

yaşta bir harçtan hazırlanmış üç farklı numunenin boyları ölçülerek ortalama bir uzama değeri hesaplanmıştır. Her bir yaşta üç numune arasındaki uzama yüzdesi farkı genellikle % 0-5 kadar değişmektedir (örnek olarak, eş numunelerden biri % 0.3 uzama gösterdiğinde diğeri % 0.285-0.315 arasında bir uzama gösterebilmektedir). Ancak belirtilmelidir ki, özellikle yüksek ikame miktarlarında ölçülen toplam uzamalar sifıra yaklaştığından numuneler üzerinde ölçülen uzama yüzdeleri arasındaki fark zaman zaman % 20-30 kadar olabilmektedir.

Burada belirtilmelidir ki, Tablo 4'de verilen karışımlar proje önerisinde belirtilmiş olan mineral katkıların çimento ikamesinde tek başlarına kullanılmaları hedefini sağlamakta, ancak katkıların ikili olarak kullanılmaları hedefini sağlamamaktadır. Bunun sebebi, literatür taraması aşamasında değerlendirilen çalışmalardan yola çıkılarak izlenen yöntem değişikliğidir. Özetle, herhangi bir harç karışımında portland çimentosunun ikamesi ile ölçülen uzamaların azalması beklenmektedir. İkame için kullanılan katkının sisteme kimyasal katkısını mineralojiye dayandırmak güç olacağından oksit analizine dayandırmak daha makuldür. Her oksit hem portland çimentosundan hem de mineral katkıdan geleceği, ve oksitlerin kaynağı olan mineraller/yapılar farklı olabileceği, dolayısıyla AST'ye etkileri farklı olabileceği için bunların aynıymış gibi değerlendirilmeleri sağlıklı olmayabilir. Geliştirilebilecek olan modellerde aynı oksitin iki farklı kaynağı (veya tepkiyebilirliği) olması modeli oldukça karmaşıklaştıracaktır. Böyle bir durumda üçüncü bir kaynak eklemek, her ne kadar üçlü sistemler pratikte kullanılabilirse de model oluşturmayı çok zorlaştırabilecek, ayrıca farklı katkıların birbirlerine etkileri gibi iyi anlaşılmayan, dolayısıyla modellerde sağlıklı değerlendirilmesi zor olan bir durum da ortaya koyabilecektir. Bu sebeple, proje önerisi aşamasındaki bu yaklaşımdan vazgeçilmiştir. Yine literatür incelemesi aşamasında izlenecek yöntemde proje önerisi hazırlanırken belirtilenden farklılıklar yapmak gereği duyulmuştur. Örneğin ASTM C 1567 deneyi ile numunelerin genişmesi onördüncü günden evvel de ölçülebildiği yani bir uzama yüzdesi-zaman eğrisi elde edilebildiği halde, agrega/çimento/mineral katkı kombinasyonunun uzaması değerlendirilirken yalnızca son uzama miktarı gözönüne alındığı, ve buna bağlı olarak güvenli veya tehlikeli değerlendirilmesi yapıldığı için, ara uzama değerlerinin bağıntı ve model geliştirilmesinde kullanılmasına ihtiyaç olmadığı kanaati oluşmuştur.

Buna karşılık, proje önerisinde iki farklı ikame yüzdesinin incelenmesi planlanmışken, kontrol (% 0 ikame) dışında altı farklı ikame yüzdesi kullanılmasının geliştirilecek modellerin başarısını artırabileceği, böylece hem normal hem de yüksek sayılabilecek (% 60) ikame yüzdelerinde mineral katkıların etkilerinin değerlendirilebileceği düşüncesi oluşmuştur. Dolayısıyla yöntem bakımından proje öncesine göre bir takım farklar ortaya çıksa da, kullanılan toz bağlayıcı çeşitliliği/sayısı bakımından bir değişiklik yapılmadığı için projeyi beklentisi olan uzama ile kimyasal içerik arasında ilişkilerin incelenmesi ve uzama tahmin eden bağıntılar geliştirilmeye çalışılmasından uzaklaştırmayacaktır.

Bulgular bölümünde sunulacağı gibi, numunelerin hazırlanması ve alkali çözeltisine tabi tutulmaları sonrasında uzama yüzdeleri belirlenmiş, harçların içindeki çimentodan ve mineral katkıdan gelen tekil oksitlerin ağırlıklı ortalama yoluyla hesaplanan miktarları ile aralarındaki ilişki doğrusal olan veya olmayan fonksiyonlar kullanılarak değerlendirilmiştir. İlişkilerin kuvveti korelasyon katsayılarına bakılarak değerlendirilmiştir. Daha sonra uzama yüzdesi ile ilişkisi kuvvetli olan oksitler arasından, uzamayı artırıcı ve azaltıcı olanlar birlikte

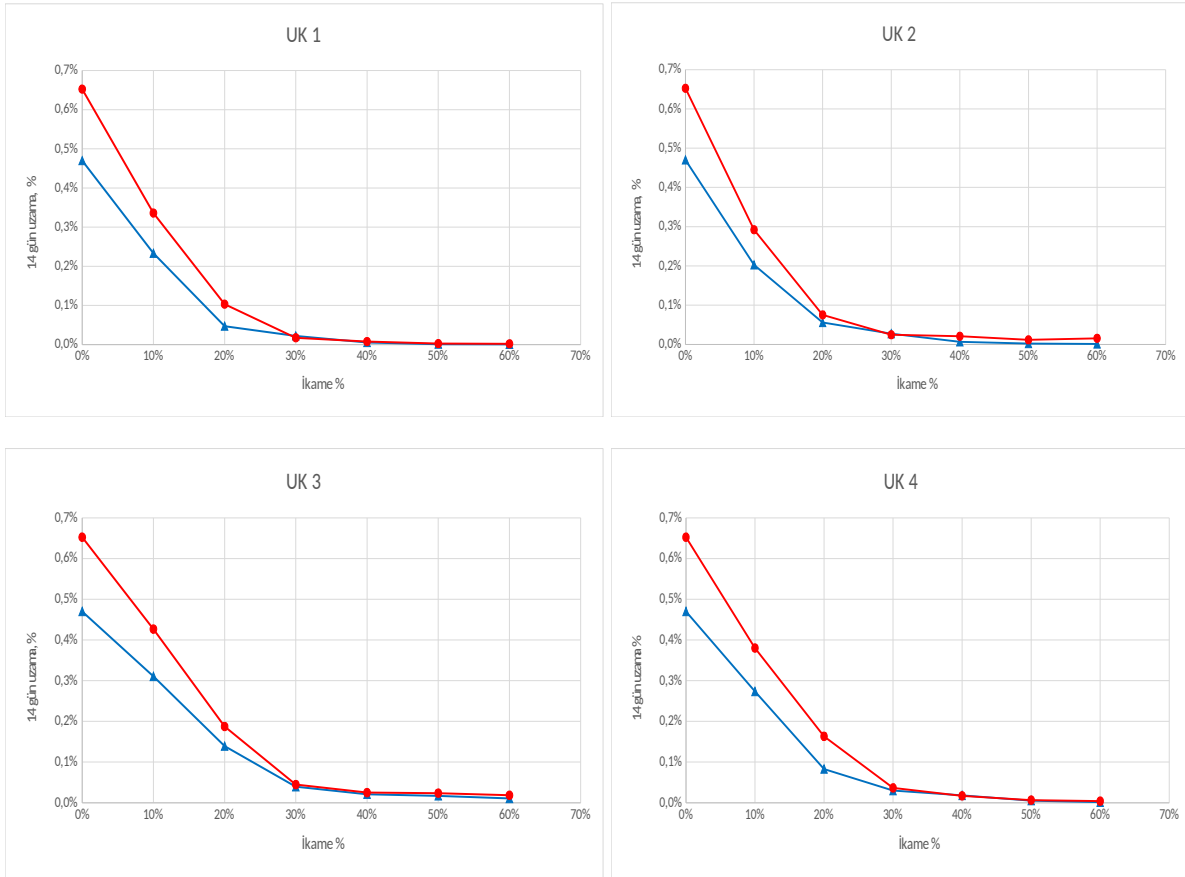
gruplanarak çoklu olarak değerlendirilmiştir. Bu grupta çimentodan ve mineral katkıdan gelen oksitlerin etkilerini eşit veya farklı olarak değerlendiren yöntemler izlenmiştir. Daha sonra tüm oksitler grupe edilerek uzama yüzdesi ile aralarında bir ilişki geliştirilmiş, ve bu ilişkidan yola çıkarak verilen herhangi bir agrega/çimento/mineral katkı kombinasyonu için, bu bağlayıcıların oksit içeriklerini ve kontrol (agrega/çimento) harcının 14. gün uzama miktarını kullanarak, uzamayı seçilen bir sınır değerinin altında tutmak için gerekli olan en düşük ikame miktarını hesaplayabilen bir model kurulmuştur. Bu model kullanılarak Tablo 4'teki harçlar için tahmin edilen mineral katkı ile çimento ikame yüzdeleri, deneysel ölçüm sonuçları ile kıyaslanmış ve model karışım bazında verdiği hata bakımından da değerlendirilmiştir.

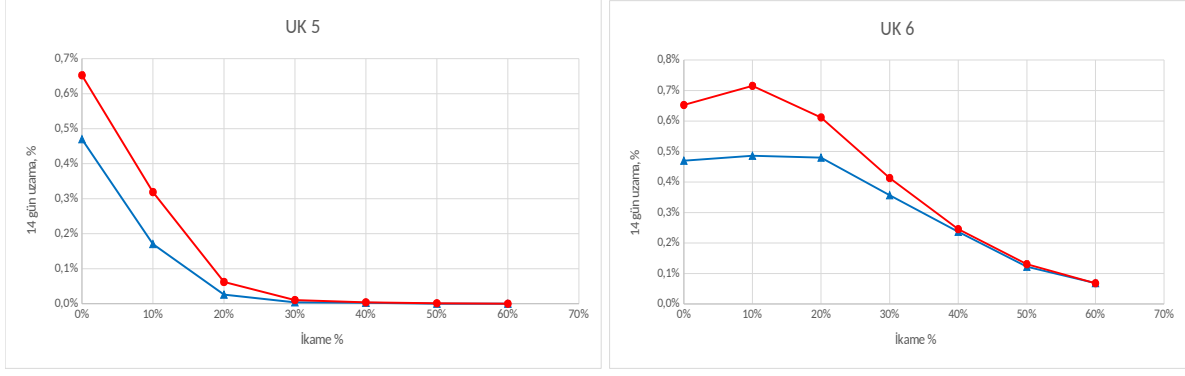
4. BULGULAR

4.1 ASTM C 1567 Deneyi Uzama Miktarları

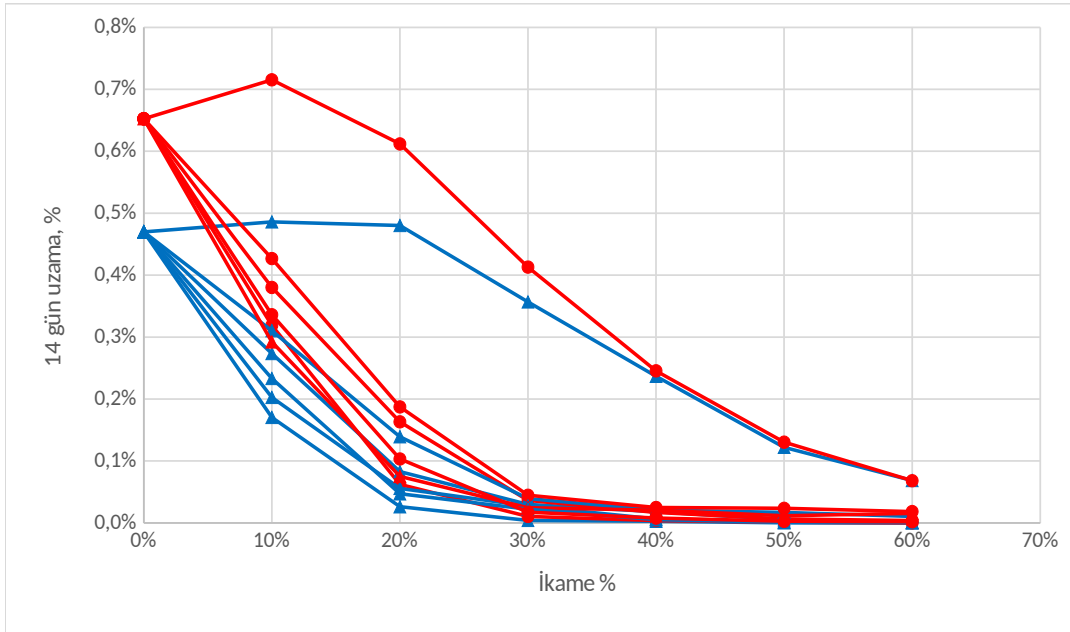
4.1.1 Uçucu Kül İkamesinin Harç Uzamasına Etkileri

Projede kapsamında kullanılan iki portland çimentosundan biri ve farklı mineral katkılardan biri kullanılarak üretilen numunelerin 14(+2) gün sonundaki boy uzamaları mineral katkı yüzdesine göre çizdirilmiştir. Deney numuneleri, daha önce de belirtildiği gibi bir gün kalıpta laboratuvar ortamında, bir gün suda, fırında ve ondört gün sıcak çözelti içerisinde beklemektedir. Uçucu kül içeren harçların genleşme-katkı yüzdesi grafikleri Şekil 5'de verilmektedir. Şekil 5'teki tüm grafiklerdeki veri iki portland çimentosu ile elde edilen uzamaların kıyaslanabilmesini kolaylaştırmak amacıyla Şekil 6'da toplanmıştır.





Şekil 5. Uçucu kül içeren harç numunelerinin deney sonundaki uzama miktarlarının kül miktarına bağlı değişimi



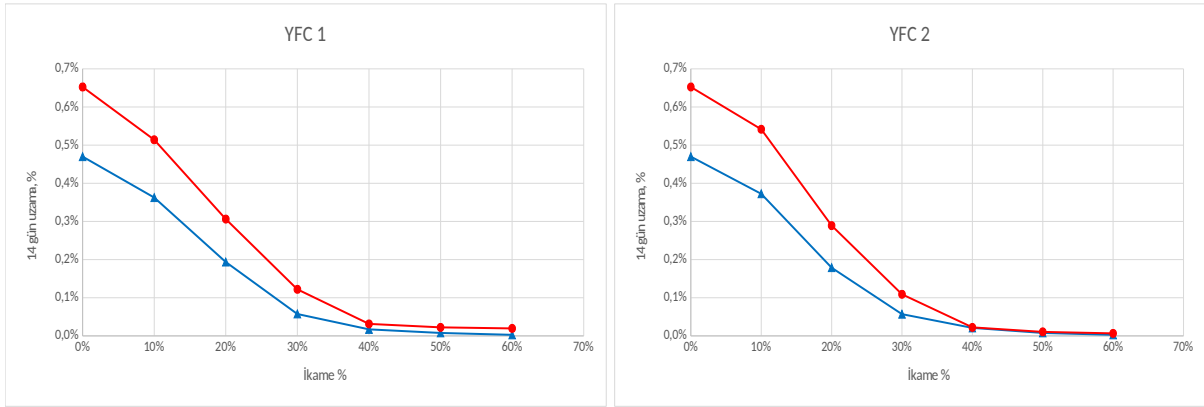
Şekil 6. Uçucu kül içeren tüm harç numunelerinin deney sonu uzama miktarlarının kül miktarına bağlı değişimi

Buna göre, PÇ 1'in kullanıldığı numunelerin deney sonu uzaması, düşük ikame miktarlarında bariz olarak PÇ 2'nin kullanıldığı numunelerinkinden fazladır. Bu durum kimyasal kompozisyonları değerlendirilirken yapılan tahminlerle tutarlıdır. Ancak % 10'dan yüksek ikame miktarlarında farklı çimentolu numunelerin uzamaları örtüşmeye başlamakta, kullanılan mineral katkının etkisi çimentolar arasındaki farkın yarattığı etkiyi bastırmaktadır. İki çimento arasındaki fark yaklaşık % 30 ikame miktarından itibaren kaybolmakta veya çok azalmaktadır. Altı külden beşi ile elde edilen numuneler % 15 ila % 26 ikame miktarında ASTM C 1567 deneyinde sınır uzama değeri olarak kullanılan % 0,10'un altına düşmektedir. Bu genellemelere uymayan iki numune, % 11,6 SO₃ ve % 38,9 CaO içeren, düşük puzolanik etkili, standart dışı UK 6 ile elde edilmiş olanlardır. Bu kül ile hazırlanan numuneler düşük ikame miktarında genleşme artışı göstermekte, sınır uzama değerinin altına inmeleri için de

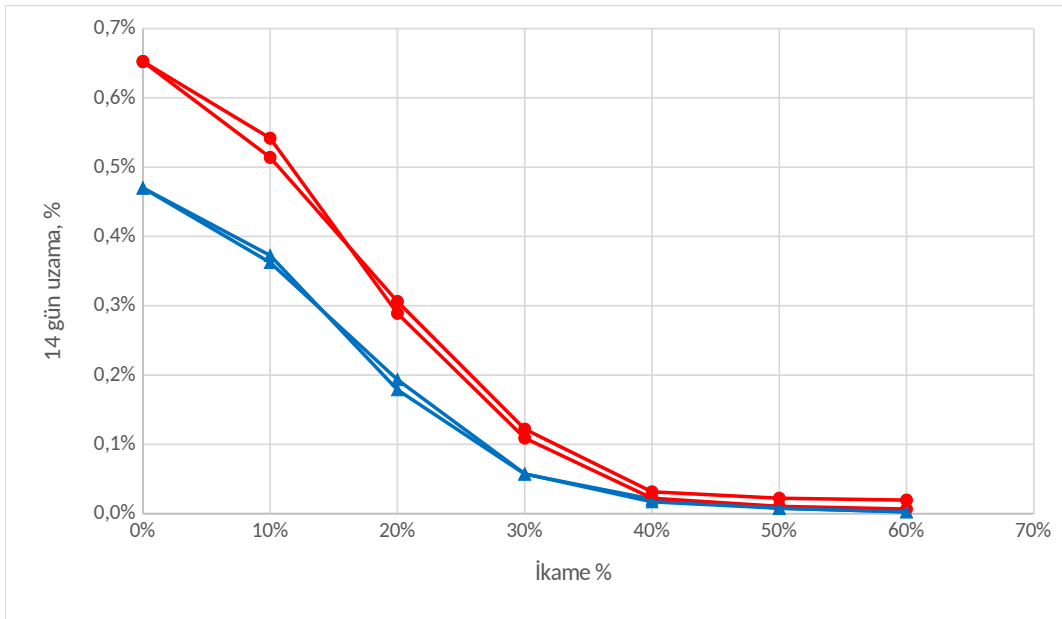
portland çimentosunun % 54 kadarının ikame edilmesi gerekmektedir. Bu kül değerlendirilmeye alınmadığında kalan kül içeren numunelerin tamamı % 30 ikamede sınır değerini epeyce altında uzama göstermiştir.

4.1.2 Öğütülmüş, Granüle Yüksek Fırın Cürufu İkamesinin Harç Uzamasına Etkileri

Öğütülmüş, granüle yüksek fırın cürufu içeren harçların genişleme-katkı yüzdesi grafikleri Şekil 7'de verilmektedir. Şekil 7'deki tüm grafiklerdeki veri Şekil 8'te toplanmıştır.



Şekil 7. Yüksek fırın cürufu içeren harç numunelerinin deney sonundaki uzama miktarlarının cüruf miktarına bağlı değişimi

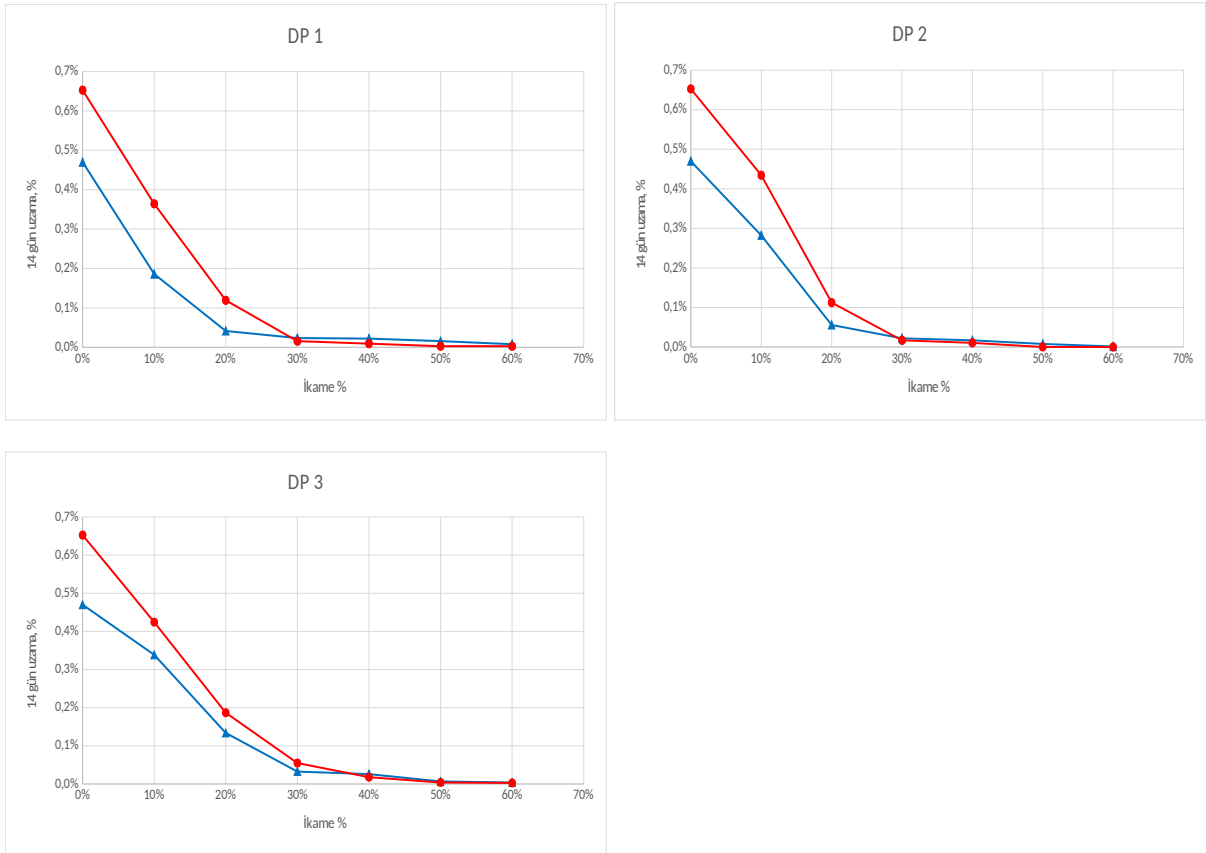


Şekil 8. Yüksek fırın cürufu içeren tüm harç numunelerinin deney sonundaki uzama miktarlarının cüruf miktarına bağlı değişimi

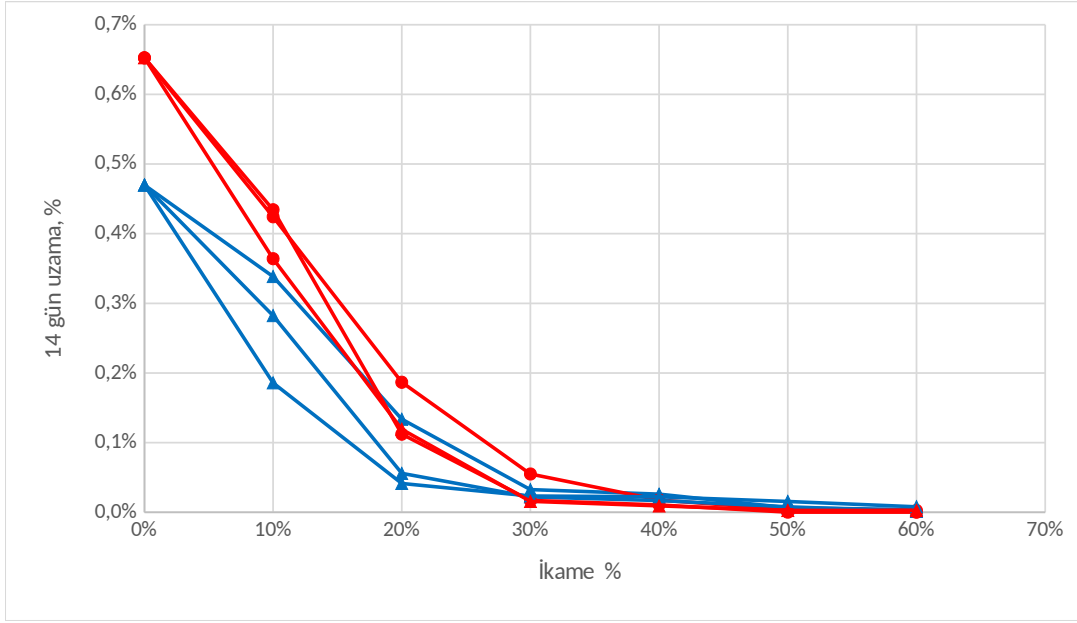
Yüksek fırın cürufu içeren numunelerde de, PÇ 1'in kullanıldığı numunelerin deney sonu uzaması daha yüksek olarak ölçülmüştür. Uçucu kül içeren numunelerden farklı olarak bu numunelerin uzaması daha yavaş (veya daha yüksek ikame miktarlarında) düşmüş, % 0.10 sınır uzama değerinin altına inilmesi için % 27-32 mineral katkı gerekmiştir. Cürufların uçucu küllere kıyasla genel olarak daha düşük $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ içerdikleri, hatta zaman zaman puzolanik malzeme olarak değil de gizli (latent) hidrolik bağlayıcı olarak değerlendirildikleri düşünüldüğünde bu durum şaşırtıcı değildir. Kullanılan iki farklı cüruf arasında genleşme önleyici performans açısından fazla bir fark görülmektedir. % 10 ikame miktarında YFC 1 genleşmeyi azıcık daha fazla sınırlandırmış olup, % 20 ikamede ise bu durum tersine dönmüştür. Aynı ikame miktarında, aynı çimento ve farklı cüruf ile hazırlanmış olan numunelerin uzamaları arasındaki fark her durumda düşük olan uzamanın % 5'inden azdır. Cürufu numunelerde % 30 ikamede halen PÇ 1 ile hazırlanmış olan numuneler sınır değerinde kalmış, ancak % 40 ikamede tüm numuneler sınırın altında uzama gösterebilmiştir.

4.1.3 Doğal Puzolan İkamesinin Harç Uzamasına Etkileri

Doğal puzolanik malzeme içeren harçların genleşme-katkı yüzdesi grafikleri Şekil 9'da verilmektedir. Şekil 9'daki tüm grafiklerdeki veri Şekil10'da toplanmıştır.



Şekil 9. Doğal puzolan içeren harç numunelerinin deney sonu uzama miktarlarının doğal puzolan miktarına bağlı değişimi



Şekil 10. Doğal puzolan içeren tüm harç numunelerinin deney sonu uzama miktarlarının doğal puzolan miktarına bağlı değişimi

Doğal puzolan içeren numunelerde de, PÇ 1'in kullanıldığı numunelerin deney sonu uzaması daha yüksek olarak ölçülmüştür. Bu numunelerin toplam uzamasının ikame miktarı ile azalması uçucu küllü numunelerinkine benzer şekilde gerçekleşmiş olup, % 0.10 sınır uzama değerinin altına inilmesi için gereken doğal puzolan miktarı % 16-27 kadardır. % 30 ikameden itibaren tüm numuneler sınırın epeyce altında (% 0.06'dan düşük) uzamalar göstermiştir.

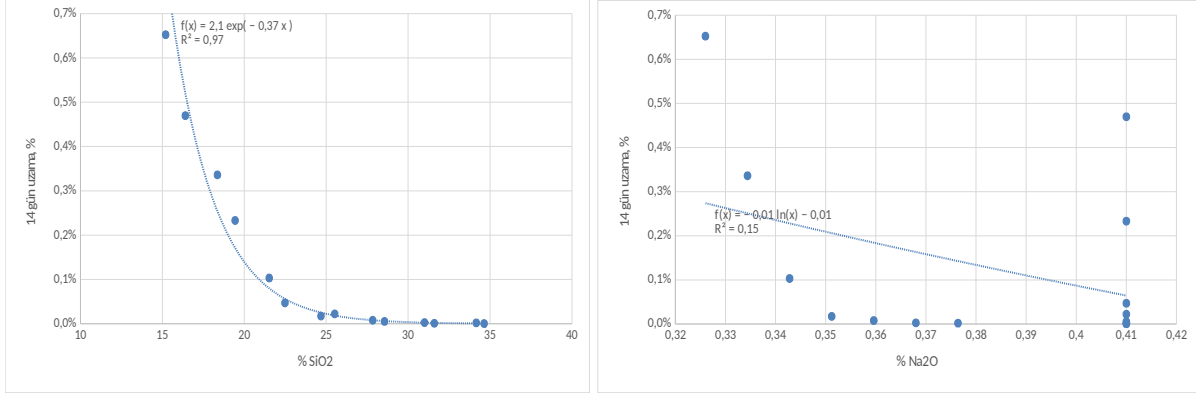
Tüm mineral katkıların, iki çimento ile ayrı ayrı karışımları değerlendirildiğinde alkali-silis tepkimesini azaltmakta en etkili malzeme sınıfının uçucu küller olduğu, doğal puzolanların davranışının buna yakın olduğu, cürufun ise ancak daha yüksek ikame miktarlarına etkili olabildiği görülmektedir. Ancak ucu küllerden birinin (UK 6) çok daha düşük etkisi ve hatta düşük ikame miktarlarında sebep olduğu genleşme artışı bu sınıfın davranışının diğer malzemelerinkinden daha belirsiz veya tehlikeli olduğuna da işaret etmektedir. Ayrıca doğal puzolanların uzamaya etkilerinin aynı ikame miktarında kendi aralarındaki farkı yüksek fırın cürufları kadar küçük olmasa da uçucu küllerin kendi aralarındaki farktan azdır.

4.2 Puzolan Kimyasal Kompozisyonunun Harç Uzamasına Etkileri

4.2.1 Oksit Miktarları ile Uzama Arasındaki İlişki – Ayrı Değerlendirme

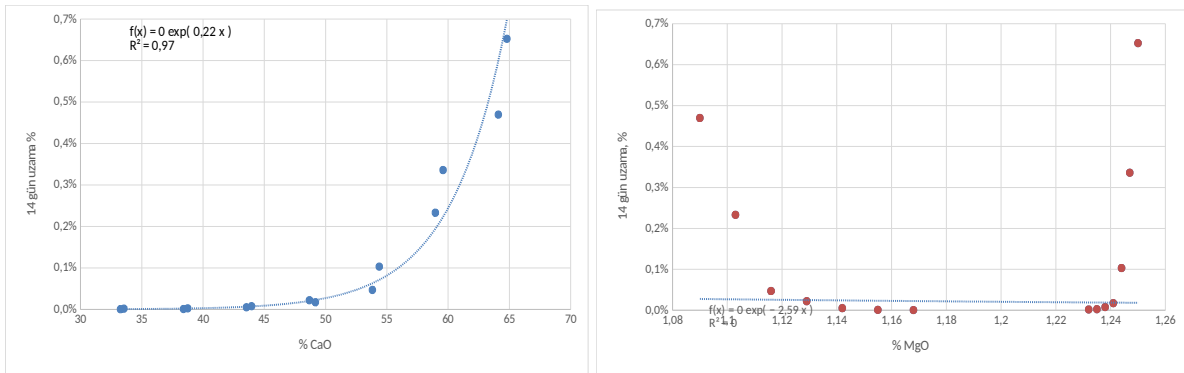
Farklı mineral katkıların ASTM C 1567 deneyi uzamasına etkilerinin araştırılmasında toplam uzamanın ikame miktarına bağlı değişiminin yanı sıra malzemelerin içerdiği farklı oksitlerin miktarlarının uzamaya etkisine bakmak da mümkündür. Bu göre herhangi bir numunenin içerdiği portland çimentosu ve mineral katkı yüzdeleri ve toz malzemelerin Tablo 2'de

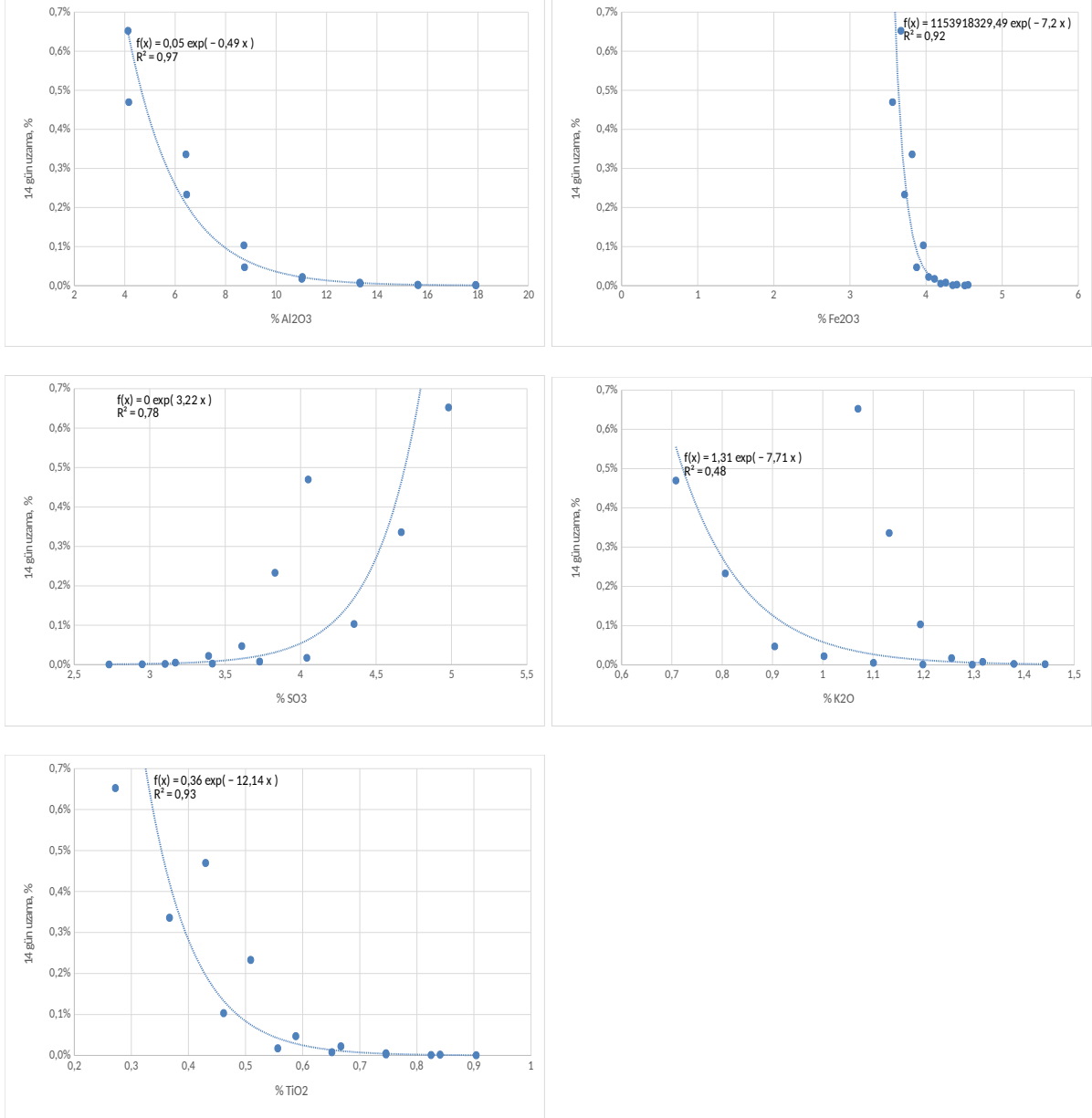
verilmiş olan kimyasal kompozisyonları kullanılarak numune için SiO_2 , CaO , vb. değerler hesaplanarak ölçülen uzama ile ilişkisi incelenebilir. Bunun bir örneği, uzama ile numunedeki toplam toz bağlayıcının içerdiği % SiO_2 miktarı arasındaki ilişki, UK 1 içeren ondört harç için (bir kül * iki çimento * kontrol dahil yedi ikame yüzdesi) Şekil 11a'da verilmektedir. Benzer şekilde uzama ile numunedeki toplam toz bağlayıcının içerdiği % Na_2O miktarı arasındaki ilişki de Şekil 11b'de verilmektedir.



Şekil 11. UK 1 içeren tüm harç numunelerinin deney sonu uzama miktarlarının numunelerdeki: a) SiO_2 içeriği ile ilişkisi; b) Na_2O içeriği ile ilişkisi

Görülebileceği gibi, deney sonundaki toplam uzama ile numunedeki toz bağlayıcı SiO_2 içeriği arasında kuvvetlice bir eksponansiyel ilişki mevcuttur. Na_2O içeriği ile ise anlamlı, kuvvetli bir ilişki bulunmamaktadır. Şekil 11b'de görülen bir başka durum da uzama- Na_2O ilişkisinin iki farklı çimento için ayrı ayrı değerlendirildiğinde anlamlı olabileceğidir. PÇ 2 ile UK 1'in Na_2O içeriklerinin tesadüfen aynı olması sonucunda Na_2O değeri her ikame yüzdesinde aynı kalmaktadır. Ancak PÇ 1'in UK 1 ile ikamesi ile Na_2O miktarı yavaşça artmakta ve uzama da yavaşça düşmektedir. Buna benzer ilişkileri her mineral katkı/çimento kombinasyonu için, her ikame yüzdesinde CaO , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , SO_3 , TiO_2 vs. ile uzama miktarı arasında incelemek mümkündür. UK 1 için kurulan bazı ilişkiler Şekil 12'de verilmiştir.





Şekil 12. UK 1 içeren tüm harç numunelerinin deney sonu uzama miktarlarının numunelerdeki çeşitli oksitlerin miktarı ile ilişkisi

Numune uzaması ile CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, ve TiO₂ içerikleri arasındaki ilişkinin kuvvetli olduğu, SO₃ ve K₂O içerikleri ile ilişkinin orta kuvvette olduğu, MgO içeriği ile ise herhangi bir ilişki olmadığı anlaşılmaktadır. Malvar ve Lenke (2006) de uzama ile MgO arasında bir ilişki tespit edememiştir. Buna sebep olarak düşük kireçli küllerde MgO miktarının düşük oluşu, yüksek kireçli küllerde ise MgO'nun kristal olmayan ve genişemeyen bir yapıda oluşunu göstermişlerdir. Ancak yine farklı çimento içeren numuneler ayrı ayrı değerlendirildiğinde ilişkilerin anlamlı olabildiği, örneğin MgO miktarının düşük veya yüksek olması durumunda genişleme uzamasının yüksek olduğu, ancak % 1.13-124 aralığındayken uzamanın düşük olduğu söylenebilir. Malhotra ve Ramezaniyanpour (1994) ise uzama ile Fe₂O₃ içeriği arasında anlamlı bir ilişki gözlemlememiştir. Oysa bu çalışmada bu ilişki kuvvetli çıkmıştır. SO₃

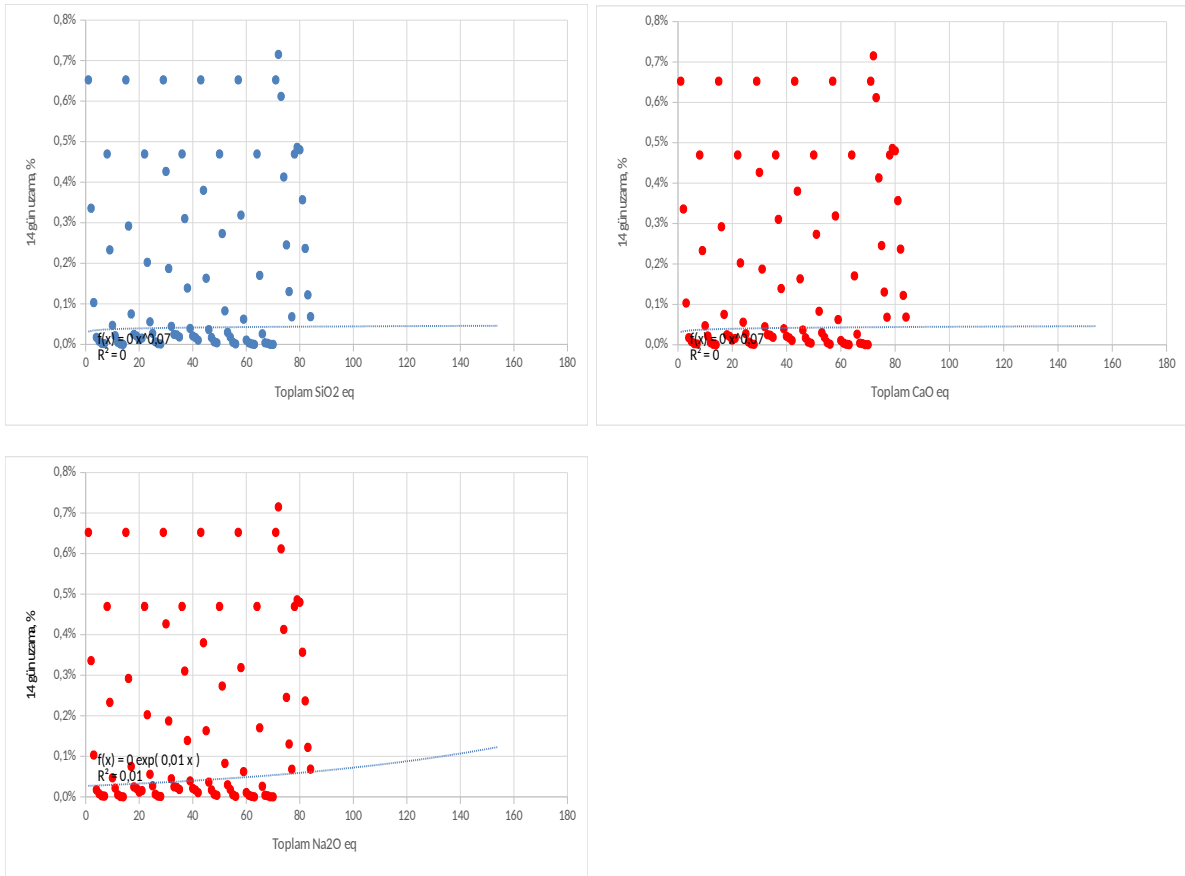
miktarındaki artışın da farklı çimentolar için farklı uzama artışına sebep olduğu görülmektedir. Bu durumdan çıkarılabilecek bir sonuç bazı oksitlerin miktarı ile uzama arasında kullanılan çimentodan bağımsız olarak kurulabilecek bir ilişki varken, bazı oksitler için ilişki daha karmaşık olup çimentodan da etkilenmektedir. Bu durum incelenen oksit miktarının etkisinin doğrudan değil dolaylı olarak, örneğin başka bir oksitin de miktarından etkilenerek gerçekleştiğine işaret etmektedir. Ayrıca, doğal olarak karışımda daha yüksek miktarlarda bulunan CaO, SiO₂ gibi oksitler ile düşük miktarlarda bulunan alkali oksit, kükürt oksit gibi maddelerin uzamaya etkilerinin değerlendirilmesinde farklılıklar oluşmaktadır.

Şekil 11 ve 12'dekilere benzer ilişkiler kullanılan tüm mineral katkıları için incelendiğinde genel olarak CaO, SiO₂, Al₂O₃, ve Fe₂O₃ ile uzama arasındaki ilişkiler kuvvetlidir. Yüksek kireçli ve kükürlü UK 6 da dahil tüm katkılarla hazırlanan numunelerde CaO içeriği arttıkça uzama artmaktadır, SiO₂ arttıkça ise uzama azalmaktadır. % 0.10 sınır uzamanın altında uzama elde edilen numunelerin CaO içeriği uçucu küllü veya doğal puzolanlı karışımlarda % 50-55'den düşük, cürüflü karışımlarda ise % 55-60'den düşüktür. Yine sınırın altında uzama gösteren numunelerin SiO₂ içeriği uçucu küllü veya cürüflü karışımlarda % 20-25'den, doğal puzolanlı numunelerde ise % 25-30'dan yüksektir. Sınır değerinin altında uzayan tüm numunelerde katkı tipinden bağımsız olarak Al₂O₃ miktarı % 5-9'dan yüksektir. Demir oksit miktarının toplam uzamaya etkisi incelendiğinde uçucu küller için Fe₂O₃ arttıkça uzamanın aladığı, ancak cürüfler için bunun tersinin gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Doğal puzolan içeren karışımlardan ise birinde Fe₂O₃-uzama miktarı ilişkisi diğer ikisinden farklıdır. Kullanılan doğal puzolanların Fe₂O₃ içerikleri kıyaslandığında birinin diğer ikisinden epeyce farklı olduğu, dolayısıyla ikame miktarı arttıkça bu puzolanı içeren numunelerin Fe₂O₃ miktarının arttığı, diğer doğal puzolanlı numunelerin ise Fe₂O₃ miktarının azaldığı görülmektedir. Puzolan katkısının geçirimsizliği azaltmak vb. etkileri sayesinde uzamadaki azalma her halükarda baskın olmakta, dolayısıyla toplam miktarı fazla olmayan bu oksitin etkisi bu basit şekilde kolayca değerlendirilememektedir. Sınır uzamanın altında kalan harçlarda Fe₂O₃ içeriği küllü numuneler için %3.5-7'den yüksek, cürüflü numuneler için yaklaşık % 3'ten düşüktür. Benzer bir durum SO₃ miktarının uzamaya etkisinde de görülmekte olup, uçucu küllü harçlardan ikisi için uzama miktarı artan SO₃ miktarı ile azalmakta, dördü için ise artmaktadır. Cürüflü ve doğal puzolanlı numunelerin uzaması artan SO₃ miktarı ile artmaktadır. Bu katkılar için sınır değerinin altında uzayan numunelerin SO₃ içeriği %3-4'ün altındadır. Uçucu küllerden beşi için sınır uzamaya denk gelen SO₃ miktarı % 3.5-5.5 aralığında olup, yüksek kükürt oksidi içeren UK 6 için % 9 civarındadır. Dolayısıyla, sınırlanan mineral katkıları arasında diğerlerinden çok farklı olan bir tanesi bulunduğu genel gözlemlere çok büyük etkisi olabileceği anlaşılmaktadır. Alkali oksitler için de genel olarak karışık bir durum söz konusu olup katkıların bir kısmını içeren numunelerde uzamayı artırmakta, bir kısmını içeren numunelerde ise azaltmaktadır. Bu durum, mineral katkı miktarı az olan bu oksitlerin çimentoda da benzer miktarlarda olmasından, dolayısıyla ikame ile ağırlıklı ortalama değerlerinin bazı karışımlarda azalıp bazı karışımlarda artmasından kaynaklanmaktadır.

4.2.2 Oksit Miktarları ile Uzama Arasındaki İlişki – Gruplu (Birleşik) Değerlendirme

Yukarıda özetlenen türde her oksitin uzamaya etkisinin ayrı ayrı incelenmesinde bir takım sorunlar ortaya çıktığı, birden fazla oksitin miktarlarındaki değişimin etkilerinin

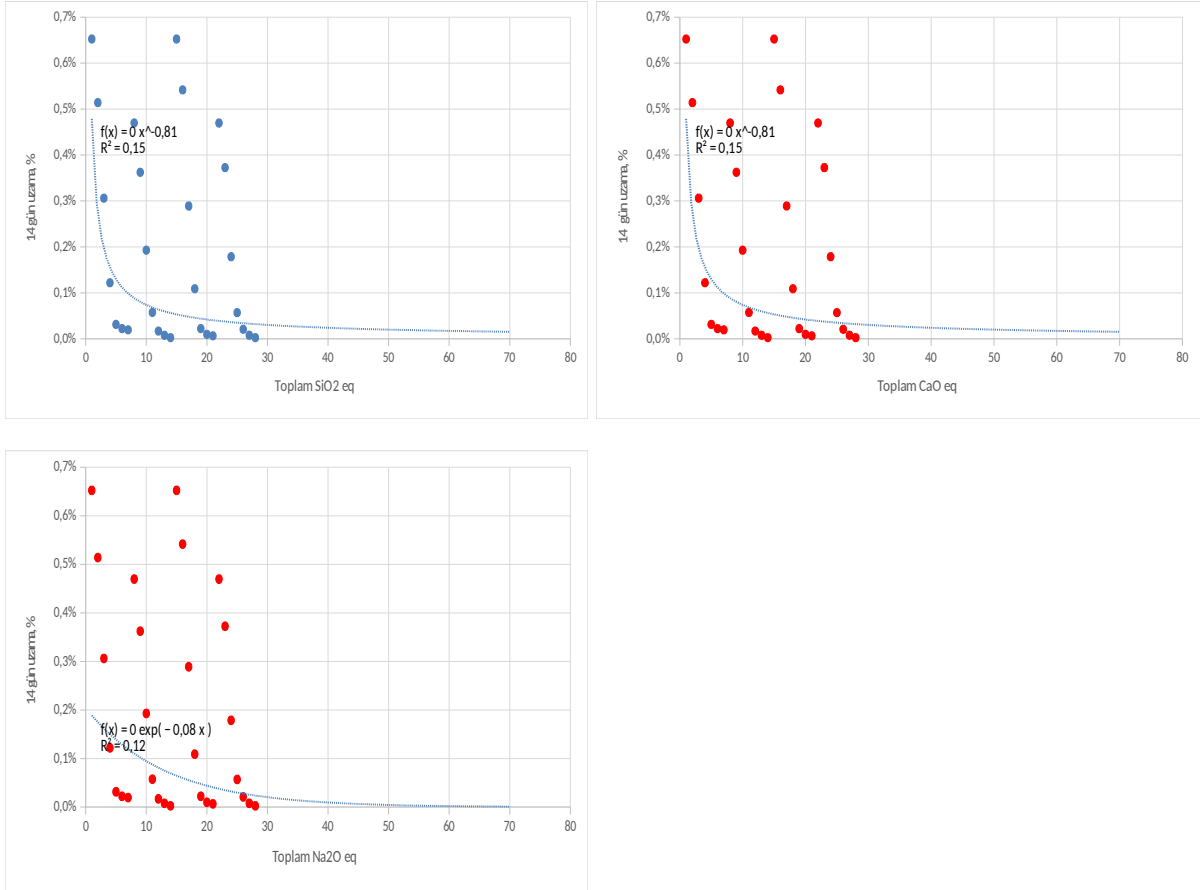
gözlenemeyebileceği açıktır. Bu yöneme alternatif olarak elde edilen uzama verisini incelemenin bir yolu da Denklem 1-3'deki gibi hesaplanan bazı eşdeğerler ile arasındaki ilişkiye bakmak olabilir. Denklem 2'de verilen CaO_{eq} genellikle alkali-silis tepkimesi kaynaklı uzamayı artıran dört farklı oksitin (Na_2O , K_2O , MgO , SO_3) molekül ağırlıkları kullanılarak kendisi de uzamayı artıran CaO 'ya çevrildiği bir formül ile hesaplanır. Örneğin Na_2O 'nun çarpanı 0.905, CaO molar kütlelerinin Na_2O molar kütlelerine bölünmesi yoluyla ($56.07/61.98 = 0.905$) hesaplanmaktadır. SiO_{2eq} de, benzer şekilde, genel olarak miktarları arttıkça uzamayı azaltan Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'ün molekül ağırlıkları kullanılarak kendisi de uzamayı düşüren SiO_2 'ye çevrildiği bir formül ile hesaplanır. Bu formüllerin önerilmesinde portland çimentolarının içerdiği alkali oksit miktarlarını tek bir değere dönüştüren Na_2O_{eq} eşdeğerinden (Denklem 1) esinlenilmiştir. Uçucu küller, cürufklar, ve doğal puzolanlar kendi aralarında gruplanarak, bu eşdeğerler toplam uzama ile ilişkilendirildiğinde Şekil 13-15'deki grafikler elde edilmektedir.



Şekil 13. Kullanılan tüm uçucu küller ile ve iki çimento ile ayrı ayrı hazırlanmış harçların uzamasının çeşitli oksit eşdeğerleri ile ilişkisi

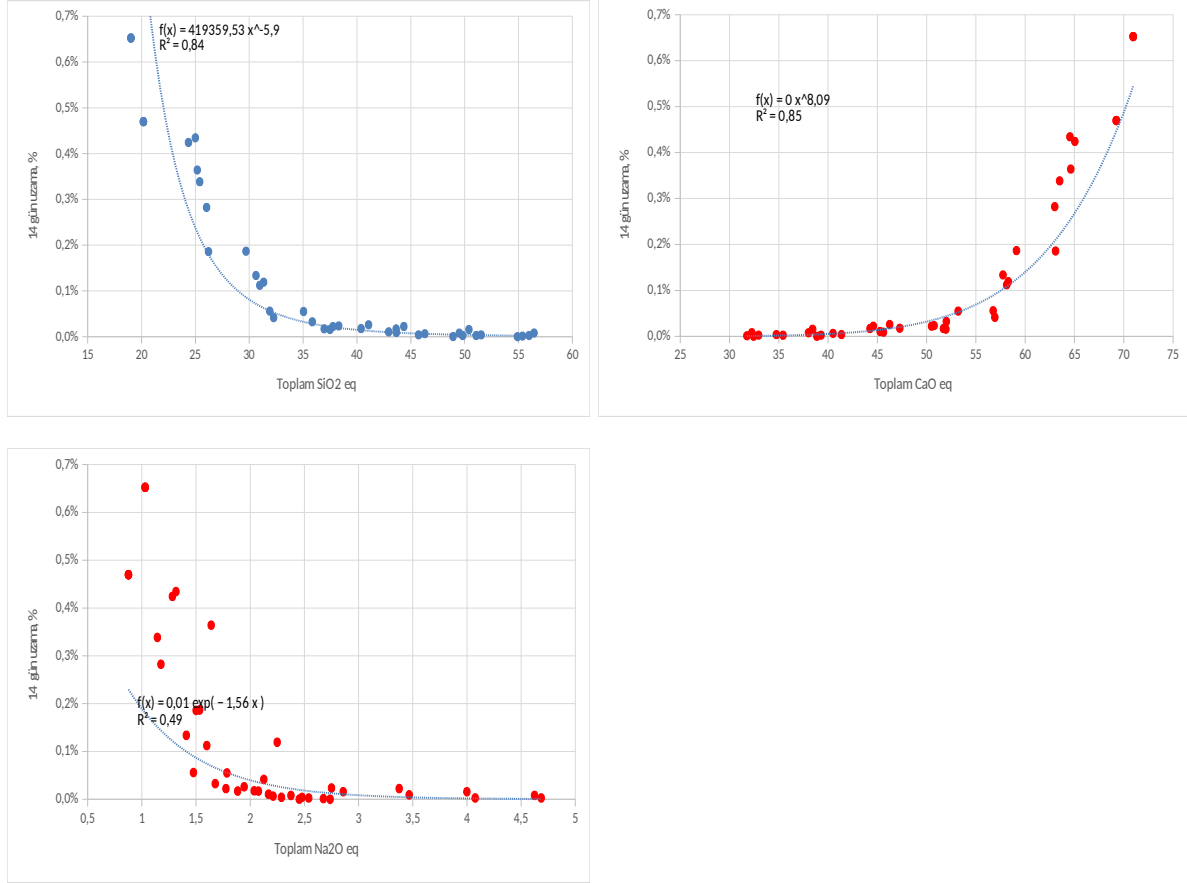
Şekil 13'deki her bir eğri 74 veri noktası kullanılarak elde edilmiştir (2 çimento*6 ikame miktarı*6 uçucu kül + 2 çimento ile mineral katkısız). Uzama ile SiO_{2eq} arasında ve CaO_{eq} arasındaki ilişkinin kuvvetli olduğu, Na_2O_{eq} ile olan ilişkinin zayıf olduğu görülmektedir. Bu ilişkilere göre SiO_{2eq} değeri % 27-28'den yüksek olan bir kül+portland çimentosu harcı deney sonunda şaibeli veya tehlikeli kabul edilen % 0.10'dan daha az uzayacaktır. Benzer şekilde

CaO_{eq} değeri % 59-60'dan küçük olan bir kül+portland çimentosu harcı sorunsuz olarak değerlendirilen bir miktarda uzama gösterecektir. Na₂O_{eq} için bulunan ilişki istatistiksel olarak anlamlı olmasa da, yine de yaklaşık % 1.6-1.7'dan yüksek eşdeğere sahip karışımlarda ölçülen uzamaların yüksek olmayacağı görülmektedir. Daha küçük değerlere sahip karışımların performansı hakkında ise tahminde bulunmak mümkün değildir.



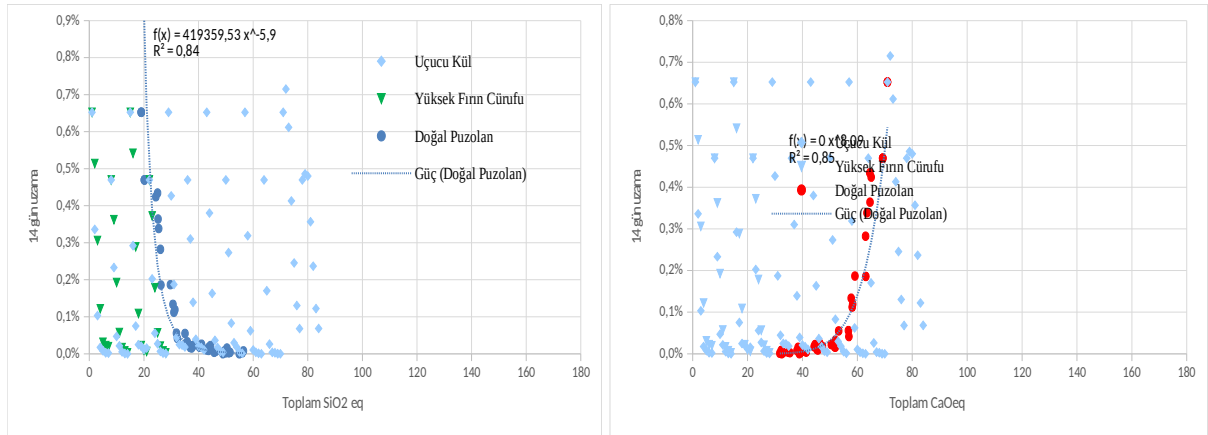
Şekil 14. Kullanılan tüm cürfler ile ve iki çimento ile ayrı ayrı hazırlanmış harçların uzamasının çeşitli oksit eşdeğerleri ile ilişkisi

Şekil 14'te deney sonu uzaması ile SiO_{2eq} arasında ve CaO_{eq} arasındaki ilişkinin kuvvetli olduğu, Na₂O ile olan ilişkinin yine zayıf olduğu görülmektedir. Bu ilişkilere göre SiO_{2eq} değeri % 27'den yüksek olan ve/veya CaO_{eq} değeri % 63'ten küçük olan bir cüruf+portland çimentosu bir cüruf+portland çimentosu harcı deney sonunda % 0.10'dan daha az uzayacaktır. Na₂O_{eq} değerlerine bakılarak karışımların alkali-silis tepkimesi performansı hakkında ise tahminde bulunmak mümkün değildir.



Şekil 15. Kullanılan tüm doğal puzolanlar ile ve iki çimento ile ayrı ayrı hazırlanmış harçların uzamasının çeşitli oksit eşdeğerleri ile ilişkisi

Şekil 15'te deney sonu uzaması ile SiO_{2eq} arasında ve CaO_{eq} arasındaki ilişkinin kuvvetli olduğu, Na₂O ile olan ilişkinin orta kuvvette olduğu görülmektedir. Bu ilişkilere göre SiO_{2eq} değeri % 31-32'den yüksek olan ve/veya CaO_{eq} değeri % 57-59'dan küçük olan bir doğal puzolan+portland çimentosu harcı deney sonunda % 0.10'dan daha az uzayacaktır. Na₂O_{eq} değerlerine bakılarak yaklaşık % 2.3'ten yüksek eşdeğere sahip karışımlarda ölçülen uzamaların yüksek olmayacağı ancak daha küçük değerlere sahip karışımların performansı hakkında tahminde bulunmanın mümkün olmadığı görülmektedir. Şekil 13-15 incelendiğinde Na₂O_{eq} ile uzama arasındaki ilişkinin beklenenin tersi olduğu, genel olarak bu değer arttıkça uzamanın azaldığı görülmektedir. Halbuki alkali-silis tepkimesinin şiddetinin alkali miktarındaki artış ile artması gerekmektedir. Bu anormalliğin sebebi çimento-mineral katkı karışımlarındaki alkalilerin büyük kısmının puzolanlardan gelmesi, dolayısıyla ikame miktarı arttıkça bir yandan genleşme potansiyeli artarken bir yandan geçirimsizliğin azalması, alkalileri bağlayabilecek hidrasyon ürünlerinin ortaya çıkması gibi genleşme potansiyelini düşüren olayların meydana gelmesidir. Nitekim bu eşdeğerin uzama miktarına etkisi alkali miktarları portland çimentosunkinden sırasıyla büyük ve küçük olan küller ve cürufur için terstir. Alkali miktarı epey yüksek olan doğal puzolan içeren karışımlarda da ilişki kuvvetlenmektedir. Dolayısıyla bu eşdeğeri uzama potansiyeli değerlendirmekte kullanmak çok sağlıklı olmayabilir. Şekil 16'da ASTM C 1567 deneyi son uzaması ile SiO_{2eq} ve CaO_{eq} arasındaki ilişki tüm mineral katkı/çimento kombinasyonları için birlikte gösterilmektedir.

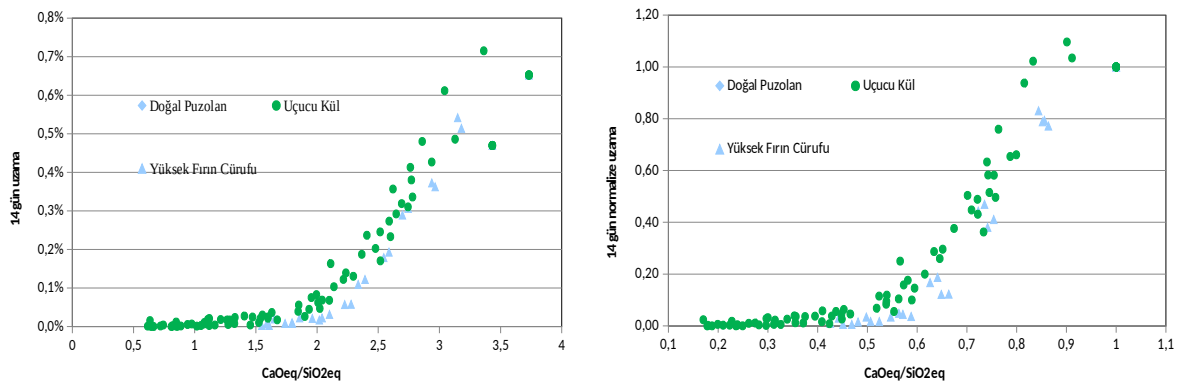


Şekil 16. Tüm mineral katkı/çimento kombinasyonları için ASTM C 1567 deneyi son uzaması ile a) SiO_{2eq} ; ve b) CaO_{eq} arasındaki ilişki.

Görülebileceği üzere her üç tip mineral katkı birlikte kullanıldığında elde edilen ilişkinin kuvveti (r^2 değeri) biraz düşmektedir. Aynı oksit farklı malzemeler içinde farklı minerallere bağlı olabileceği, yani serbest halde olmadığı, için sisteme etkisi de farklı olabileceğinden bu gözlenen durum şaşırtıcı değildir.

4.2.3 Oksit Miktarları ile Uzama Arasındaki İlişki – Tüm Oksitlerin Etkisi

Deney sonu uzama miktarını hem artıran oksitlerin, hem de azaltan oksitlerin birlikte etkisini değerlendirmek amacıyla, CaO_{eq}/SiO_{2eq} değerinin uzama miktarının uzama miktarı ile ilişkisini incelemek faydalı olabilir. Bu ilişki Şekil 17a'da gösterilmektedir.



Şekil 17. Tüm mineral katkı/çimento kombinasyonları için ASTM C 1567 deneyi son uzaması ile CaO_{eq}/SiO_{2eq} arasındaki ilişki: a) normalize edilmemiş; b) normalize edilmiş

Üç farklı mineral katkı tipi için $\text{CaO}_{\text{eq}}/\text{SiO}_{\text{eq}}$ değerinin uzama ile ilişkisinin yakın fakat biraz farklı olduğu görülmektedir. Genel olarak, deney sonunda sorunlu uzama miktarı için kullanılabilir bir sınır değer (örneğin % 0.10) seçildiğinde, cürüflar için gereken en düşük $\text{CaO}_{\text{eq}}/\text{SiO}_{\text{2eq}}$ değerinin 2.35 civarında, küller için gereken değer 2.2 civarında, doğal puzolanlar için gereken değer ise 1.9-2.0 civarında olduğu anlaşılmaktadır. Genleşmeleri cüruf ikamesi ile kontrol etmek için gereken mineral katkı miktarının önceki bölümlerde gözlemlendiği gibi kül veya doğal puzolan ikamesi ile kontrol etmek için gerekenden % 10 kadar fazla olduğu ve cürüfların CaO içeriğinin küllerin veya doğal puzolanlarınkinden yüksek, SiO_2 içeriğinin ise düşük olduğu gözönüne alındığında bu durum doğaldır. Benzer şekilde doğal puzolanların yüksek SiO_2 içeriği eşik $\text{CaO}_{\text{eq}}/\text{SiO}_{\text{2eq}}$ değerlerinin uçucu küllerinkinden de biraz düşük olmasına sebep olmaktadır. Deney ölçüm hassasiyetinin de etkisiyle düşük uzama değerlerinde (yüksek ikame miktarlarında) üç mineral katkı tipi arasındaki farklar kaybolmaktadır. Çok yüksek uzama miktarlarında ise yüksek kireçli külün etkisiyle kül verisi daha düşük uzamalardakine kıyasla dağılmaktadır.

$\text{CaO}_{\text{eq}}/\text{SiO}_{\text{2eq}}$ değerinin uzama ile ilişkisini "normalize" edilmiş halde incelemek de mümkündür. Değeri hem çimentodan hem de mineral katkıdan gelen oksitler ile hesaplanmış olan $\text{CaO}_{\text{eq}}/\text{SiO}_{\text{2eq}}$ değerini sadece çimentodan gelen $\text{CaO}_{\text{eq}}/\text{SiO}_{\text{2eq}}$ değerine bölmek, kullanılmış olan farklı çimentoların etkisini bir bakıma ortadan kaldırabilir. Herhangi bir ikame yüzdesindeki uzama miktarının yalnızca çimento içeren durumdaki uzamaya bölünmesi yoluyla yapılan bir normalizasyon da farklı agregaların etkisini yani kontrol durumdaki uzama miktarının sonuçlara etkisini ortadan kaldırabilir. Ancak bu çalışmada yalnızca bir reaktif agrega tipi kullanıldığından bu işlem çok gerekli değildir. Şekil 17b'de normalize edilmiş değerler ile elde edilen ilişkiler gösterilmektedir. Bu şekilde (1,1) noktası yalnızca çimento içeren harcın uzama miktarını, ve bu karışım için hesaplanan $\text{CaO}_{\text{eq}}/\text{SiO}_{\text{2eq}}$ değerinin bu karışımdaki çimentonun $\text{CaO}_{\text{eq}}/\text{SiO}_{\text{2eq}}$ değerine oranını temsil etmektedir. Dolayısıyla düşük miktarda yüksek kireçli kül içeren bazı harçların kontrolden fazla uzamaları 1.0'ın üstünde kalmalarına yol açmaktadır. Normalizasyonda iki farklı çimento ile hazırlanan harçların kendi içlerindeki en büyük uzama değerleri kullanıldığı için bir mineral katkı içeren harçların değerleri dikeyde birbirlerine yaklaşmakta, bu sebeple daha önce gösterilen yüksek kireçli kül içeren harçlar için elde edilen verilerin dağılımı azalmaktadır.

4.2.4 Oksit Miktarları ile Uzama Arasındaki İlişki – Oksitlerin Farklı Tepkiyebilirliklerinin Etkisi

Denklemler 2-3'de verilen formüllerde, oksitlerin CaO_{eq} ve SiO_{2eq} 'ye dönüştürülmesinde etkileri veya tepkiyebilirlikleri eşit kabul edilmekte, dolayısıyla çevrim yalnızca molar kütleler orantılanarak yapılmaktadır. Halbuki örneğin hem CaO'nun hem de SO_3 'ün uzamayı artırdığı kabul edilse de, tepkiyebilirliklerinin ve uzamaya etkilerinin eşit olacağını varsaymak doğru olmayabilir. Yine örneğin Denklem 1'de kullanılan Na_2O ve K_2O 'nun uzamaya etkilerinin eşit olmadığı, bu bileşenlerdeki farklı katyonların etkisiyle alkali-silis tepkimesine etkilerinin eşit olmadığı düşünülmektedir. Bu sebeple CaO_{eq} ve SiO_{2eq} formülleri ana bileşen haricindekileri bir etki faktörü ile çarparak değiştirilebilir. Bunun bir örneği Denklem 4 ve 5'te gösterilmektedir:

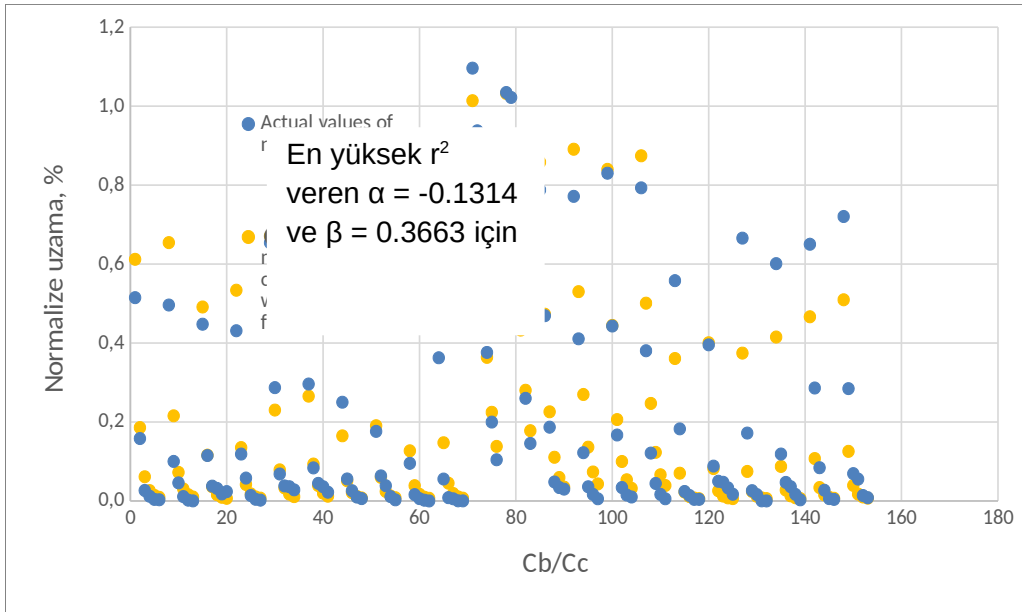
$$\text{CaO}_{\text{eqab}} = \text{CaO} + \alpha(0.905\text{Na}_2\text{O} + 0.595\text{K}_2\text{O} + 1.391\text{MgO} + 0.700\text{SO}_3) \quad (4)$$

$$\text{SiO}_{2\text{eqbb}} = \text{SiO}_2 + \beta(0.589\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.376\text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (5)$$

Buna göre α ve β katsayıları bazı oksitlerin tepkiyebilirliklerini değiştirebilmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu yeni denklemlerin kullanılmasıyla genişlemeyi artırıcı ve azaltıcı tüm oksitleri içeren formül Denklem 6'daki gibi değiştirilebilir:

$$C_b = \text{CaO}_{\text{eqab}} / \text{SiO}_{2\text{eqbb}} = [\text{CaO} + \alpha(0.905\text{Na}_2\text{O} + 0.595\text{K}_2\text{O} + 1.391\text{MgO} + 0.700\text{SO}_3)] / [\text{SiO}_2 + \beta(0.589\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.376\text{Fe}_2\text{O}_3)] \quad (6)$$

Denklem 6'da C_b , çimento/mineral katkı harmanının kimyasal indeksidir. Denklem 6'nın hiç mineral katkı içermeyen harçlar için kullanıldığı durum harman yerine sadece çimentonun kimyasal indeksini, C_c , vereceğinden (aynı çimentoyu içeren tüm karışımlar için sabit) yine önceki bölümde kullanılan yalnızca çimentolu (mineral katkısız) durum için normalizasyon uygulandığında, mineral katkılardan gelen oksitlerin etkisini öne çıkarmak için kullanılacak bir normalize kimyasal index, C_b/C_c , elde edilebilir. Benzer şekilde yalnızca mineral katkı içeren bir karışımın kimyasal indeksi de C_{mk} olarak tanımlanabilir. Bu değer Denklem 6'da harmanın oksit miktarları yerine mineral katkının oksit miktarları kullanılarak bulunabilir. Şekil 17'de gösterilen tüm veriler Denklem 6'da kullanılarak yeniden hesaplatıldığında ve en yüksek r^2 değerini veren α ve β katsayıları optimizasyon ile bulunduğunda, $\alpha = -0.1314$ ve $\beta = 0.3663$ değerleri elde edilmektedir. Normalize edilmiş uzama değerlerinin C_b/C_c 'ye bağlı değişimi Şekil 18'de gösterilmektedir.



Şekil 18. Tüm mineral katkı/çimento kombinasyonları için ASTM C 1567 deneyi son uzaması ile C_b/C_c arasındaki ilişki

Şekil 18'deki veriyi temsil için bir doğrusal olmayan hiperbolik tanjant modeli uygundur (Denklem 7):

$$E_{14b}/E_{14c} = (a_1/2) [1-\tanh((C_b/C_c)-a_3)/a_4)] + (a_2/2) [1+\tanh((C_b/C_c)-a_3)/a_4)] \quad (7)$$

Bu denklemde E_{14c} agreganın sadece çimento ile verdiği uzama miktarı, E_{14b} agreganın çimento ve mineral katkı ile verdiği uzama miktarıdır. Katsayılar olarak $\alpha = -0.1314$, $\beta = 0.3663$, $a_1 = 0.0035$, $a_2 = 1.2516$, $a_3 = 0.7572$, $a_4 = 0.2001$ kullanıldığında $r^2 = 0.93$ elde edilmektedir. E_{14b}/E_{14c} değeri mineral katkı ikameli harcın yapacağı normalize uzama değerini vermektedir.

4.2.5 Belirli bir Reaktif Agreg-Çimento Kombinasyonunda Uzamayı Sınırlandırmak İçin Gerekli Mineral Katkı Miktarının Tahmini

Bir uygulamada kullanılması planlanan çimento ve agreg belirlendiğinde, ASTM C 1567 deneyi uzamasını tehlikeli sayılabilecek bir miktarın altına çekmek için, seçili bir mineral katkıdan ne kadar kullanmak gerekeceği ilgi çekici bir problemdir. Eğer ASTM C 1567 deney yönteminde tehlikeli uzama sınır miktarı olarak % 0.10 kullanılabileceği düşünülürse, o zaman Şekil 18'deki normalize uzama ekseninde aranan sınır değer $0.8/E_{14c}$ olacaktır. Bu değeri veren C_b/C_c yatay eksen değeri de bir azami değer olacaktır. Bu iki noktayı ilişkilendiren fonksiyonu g olarak tanımlarsak o durumda:

$$C_b/C_c = g(0.1/E_{14c}) = a_4 \tanh^{-1} [(2(0.1/E_{14c})-(a_1+a_2))/(a_2-a_1)] + a_3 \quad (8)$$

olacaktır. Gereken asgari mineral katkı miktarını M olarak tanımlarsak, Denklem 6 şu şekilde yazılabilir:

$$C_b = CaO_{eq\alpha b}/SiO_{2\ eq\beta b} = [M(CaO_{eq\alpha mk}) + (1-M)(CaO_{eq\alpha c})] / [M(SiO_{2\ eq\beta mk}) + (1-M)(SiO_{2\ eq\beta c})] \quad (9)$$

Denklem 6, 7 ve 8 kullanılarak, uzamayı sınırlamak için gereken asgari mineral katkı miktarı:

$$M = [1-g(0.1/E_{14c})] / [(1- (CaO_{eq\alpha mk}/ CaO_{eq\alpha c})) - (1- (SiO_{2\ eq\beta mk}/ SiO_{2\ eq\beta c})) * g(0.1/E_{14c})] \quad (10)$$

olarak hesaplanabilir. Bu formül asgari mineral katkı miktarını katkı kimyasal özellikleri, çimento kimyasal özellikleri, ve yalnızca çimento içeren harçların 14 gün uzama değerini

kullanarak hesaplamaktadır. $M = 1$ değeri kullanıldığında mineral katkının kimyasal indeksi Cmk elde edilecektir. Bu çalışmada kullanılmış olan çimentolar ve agrega için uzamayı % 0.10'un altında tutmak için gereken değerler Denklem 10 kullanılarak hesaplanarak Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Kullanılan iki çimento ve bir rektif agrega ile yapılan harçların uzamasını % 0.10'un altında tutmak için gerektiği hesaplanan ve ölçülen mineral katkı miktarları

Mineral Katkı	Portland çimentosu	Ölçülen katkı miktarı (%)	Hesaplanan katkı miktarı (%)	Fark (%)
UK 1	PÇ 1	21.60	20.38	-5.6
UK 1	PÇ 2	20.12	17.15	-14.7
UK 2	PÇ 1	18.00	18.55	3.0
UK 2	PÇ 2	16.70	16.99	1.7
UK 3	PÇ 1	23.60	26.12	10.7
UK 3	PÇ 2	22.02	23.92	8.6
UK 4	PÇ 1	20.57	24.99	21.5
UK 4	PÇ 2	19.12	19.10	-0.1
UK 4	PÇ 1	18.64	18.53	-0.6
UK 4	PÇ 2	17.29	14.88	-14.0
UK 4	PÇ 1	57.59	54.88	-4.7
UK 4	PÇ 2	55.80	54.12	-3.0
YFC 1	PÇ 1	35.32	32.43	-8.2
YFC 1	PÇ 2	33.43	26.87	-19.6
YFC 2	PÇ 1	33.97	31.04	-8.6
YFC 2	PÇ 2	32.10	26.47	-17.5
DP 1	PÇ 1	14.93	21.85	46.3
DP 1	PÇ 2	13.81	15.95	15.5
DP 2	PÇ 1	15.26	21.28	39.4

DP 2	PÇ 2	14.12	18.05	27.8
DP 3	PÇ 1	17.47	26.58	52.2
DP 3	PÇ 2	16.20	23.33	44.0

Tablo 5’de görüldüğü üzere çimentoların ve katkıların oksit içeriği ve sadece çimento içeren harçların toplam uzaması Denklem 10’da kullanılarak elde edilen ikame yüzdeleri uçucu küller ve cüruflar için genellikle ölçülen değere yakındır. Fark bir çimento/kül kombinasyonu haricinde % 20’den küçük, 16 kombinasyonun ortalaması olarak da % 10’un altındadır. Doğal puzolanlar için ise farklar % 16-52 olup, ölçülen hesaplanan mineral katkı miktarı her durumda ölçülen gerekenden fazladır. Kontrol numunesi uzaması daha yüksek olan PÇ 1 içeren mineral katkılı harçlar için yapılan tahminler PÇ 2’yi içerenler için yapılanlardan biraz daha yüksek hataya sahiptir, ancak fark küçüktür. Değerlendirilen toplam 22 çimento/mineral katkı kombinasyonunun yarısı için hesaplanan miktar gerekenin altında yani güvensiz, yarısı için ise üstünde yani güvenli taraftadır. Her ne kadar çimentonun ve mineral katkının miktarlarına dayanarak geliştirilen ve Şekil 18’de gösterilen modelin determinasyon katsayısı yüksek olsa da ($r^2 = 0.93$), tahmin edilen gerekli asgari mineral katkı miktarlarının ne kadar hatalı olabileceği görülmektedir. Bu hataları azaltmanın bir yolu üç farklı mineral katkı tipini ayrı ayrı değerlendiren yeni bir model geliştirmek olabilir.

5. TARTIŞMA/SONUÇ

Bu araştırma projesi kapsamında Türkiye’de farklı kaynaklardan altı adet uçucu kül, iki adet öğütülmüş yüksek fırın cürufu, ve üç adet doğal puzolan temin edilmiş, bu mineral katkıları alkali içerikleri bakımından birbirinden farklı iki portland çimentosu ve reaktif olduğu bilinen bir doğal agrega ile birlikte kullanılarak çimentonun katkılardan biri ile ikame edildiği çok sayıda harç karışımı hazırlanmıştır. Elde edilen harçlar ile ASTM C 1567 deneyinde kullanılmak üzere numuneler hazırlanmış ve numunelerin alkali çözeltisi içinde yüksek sıcaklıkta gösterdikleri alkali-silis tepkimesi genişmesi bir ekseninde boy uzaması ölçülerek değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel sonuçlar istatistiksel yöntemler kullanılarak incelenmiş ve mineral katkı özellikleri ile alkali-silis tepkimesi kaynaklı uzama arasında bağıntılar geliştirilmiştir. Çalışmadan şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Tüm ikame senaryolarında, yüksek alkali içeren çimento ile hazırlanan harçların deney sonu uzaması düşük alkalik içeren muadil harcından yüksektir.
- Kullanılan tüm mineral katkıları yeterli miktarlarda kullanıldıklarında AST uzamasını zararlı kabul edilen sınırın altına çekebilmektedir. Sınır uzama değeri % 0.10 olarak alındığında gerekli çimento ikame miktarı doğal puzolanlar için % 16-27 aralığında, yüksek fırın cürufu için % 27-32 aralığında, ve uçucu küllerden bir hariç diğerleri için % 15-26 aralığındadır. Ancak uçucu küllerden yüksek kireç ve yüksek kükürt oksiti içeriği olan ile ikame durumunda gereken miktar % 50’nin üzerindedir. Bu kül ile düşük ikame miktarlarında ise uzama azalmak yerine artmaktadır. Diğer küller arasında kireç içeriği yüksekçe olanlar bulunduğu için, küllerin AST’ye etkilerinin değerlendirilmesinde kükürt oksiti içeriklerine bakılması önemli görülmektedir.
- Numunelerdeki toplam toz bağlayıcı oksit içerikleri arasındaki ilişkiler ayrı ayrı değerlendirildiklerinde, AST uzaması ile CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, ve TiO₂ içerikleri arasında kuvvetli ilişkiler olduğu görülmektedir. SO₃ ve K₂O içerikleri ile orta kuvvette ilişkiler görülmekte, MgO veya Na₂O içerikleri ile ise anlamlı bir ilişki kurulamamaktadır.
- Uzama ile oksit miktarları arasındaki ilişki AST genişmesini artıran oksitler (CaO_{eq}) ve azaltan oksitler (SiO_{2eq}) ayrı ayrı gruplanarak incelendiğinde, uzama miktarı ile SiO_{2eq} arasında ve CaO_{eq} arasındaki ilişkinin kuvvetli olduğu görülmektedir. Bu ilişkilere göre SiO_{2eq} değeri % 27-28’den yüksek olan bir kül+portland çimentosu harcı deney sonunda “şaiyeli kabul edilen” kabul edilen % 0.10’dan daha az uzayacaktır. Benzer şekilde CaO_{eq} değeri % 59-60’dan düşük olan bir kül+portland çimentosu harcı sorunsuz olarak değerlendirilen bir miktarda uzama gösterecektir. Na₂O_{eq} için bulunan ilişki istatistiksel olarak anlamlı olmasa da, yine de yaklaşık % 1.6-1.7’den yüksek eşdeğere sahip karışımlarda ölçülen uzamaların yüksek olmayacağı görülmektedir. Daha küçük değerlere sahip karışımların performansı hakkında ise tahminde bulunmak mümkün değildir.

- Cürüflu harçlar incelendiğinde deney sonu uzaması $\text{SiO}_{2\text{eq}}$ değeri % 27'den yüksek olan ve/veya CaO_{eq} değeri % 63'ten küçük olan bir cüruf+portland çimentosu harcı deney sonunda % 0.10'dan daha az uzayacaktır. $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ değerlerine bakılarak karışımların AST performansı hakkında tahminde bulunmak mümkün değildir. Doğal puzolanlı harçlar için ise $\text{SiO}_{2\text{eq}}$ değeri % 31-32'den yüksek olan ve/veya CaO_{eq} değeri % 57-59'dan küçük olan bir doğal puzolan+portland çimentosu harcı deney sonunda % 0.10'dan daha az uzayacaktır. $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ değerlerine bakılarak yaklaşık % 2.3'ten yüksek eşdeğere sahip karışımlarda ölçülen uzamaların yüksek olmayacağı ancak daha küçük değerlere sahip karışımların performansı hakkında tahminde bulunmanın mümkün olmadığı görülmektedir.
- Tüm harçlar için genel olarak $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ değeri arttıkça uzamanın azaldığı görülmektedir. Bu durum çimento-mineral katkı karışımlarındaki alkalilerin büyük kısmının puzolanlardan gelmesi, dolayısıyla ikame miktarı arttıkça bir yandan genişleme potansiyeli artarken bir yandan geçirimsizliğin azalması, alkalileri bağlayabilecek hidratasyon ürünlerinin ortaya çıkması gibi genişleme potansiyelini düşüren olayların meydana gelmesidir. Bu eşdeğerin uzama miktarına etkisi alkali miktarları portland çimentosunkinden sırasıyla büyük ve küçük olan küller ve cürüfler için terstir. Dolayısıyla bu eşdeğeri uzama potansiyeli değerlendirmekte kullanmak çok sağlıklı olmayabilir.
- Üç farklı mineral katkı tipi için $\text{CaO}_{\text{eq}}/\text{SiO}_{2\text{eq}}$ değeri ile uzama ilişkisinin birbirinden biraz farklı olduğu görülmektedir. Deney sonu uzama sınırı olarak % 0.10 seçildiğinde cürüfler için gereken en düşük $\text{CaO}_{\text{eq}}/\text{SiO}_{2\text{eq}}$ değerinin 2.35 civarında, küller için gereken değer 2.2 civarında, doğal puzolanlar için gereken değerin ise 1.9-2.0 civarında olduğu anlaşılmaktadır.
- Çimentodan gelen ve mineral katkıdan gelen oksitlerin tepkiyebilirliklerini ayrı ayrı değerlendirerek, tüm mineral katkılar ve ikame oranları için ölçülen deney sonu uzamalarını ve oksit miktarlarını kullanan bir bağıntı elde etmek ve bu bağıntıdan yola çıkarak seçilen herhangi bir agrega/çimento/mineral katkı kombinasyonu için seçilen bir sınır uzama değerinin altında kalmak için gerekli en düşük ikame yüzdesini tahmin eden bir model geliştirmek mümkündür. Bu çalışmada geliştirilen bağıntının yüksekçe ($r^2 = 0.93$) bir determinasyon katsayısı vardır. Model ile tahmin edilen gerekli ikame yüzdeleri ölçülenlerle kıyaslandığında hata % 10'dan küçüktür. Ancak, özellikle doğal puzolan içeren harçlar için tahminler hem hep yüksek taraftadır, hem de hata miktarı % 15'in üzerindedir.
- Bu çalışmanın devamında üç mineral katkı için beraber kurulmuş olan model değiştirilerek mineral katkı tipinin değerlendirmeye alınması tahminlerdeki hataları düşürebilir.
- Müteakip çalışmalarda geliştirilecek modellerin daha başarılı olmasını sağlayacak şekilde daha çok sayıda mineral katkı, çimento, ve agrega kullanılabilir. Ayrıca kullanılan katkıların alkali çözünürlüklerini değerlendiren ek deneyler yapılarak sonuçları geliştirilecek modellerde girdi olarak kullanılabilir.

6. KAYNAKLAR

Akçaözoğlu, S., Atış, C.D., Akçaözoğlu K. 2010. "An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete", *Waste Management*, 30 (2), 285-290.

Andiç, Ö., Yardımcı, M.Y., Ramyar K. 2008. "Performance of carbon, polyvinylalcohol and steel based microfibers on alkali-silica reaction expansion", *Construction and Building Materials*, (22) 7, 1527-1531.

ASTM C 150, 2017. *Standard Specification for Portland Cement*, West Conshohocken, PA.

ASTM C 1260, 2014. *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C1567, 2013. *Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method)*, West Conshohocken, PA.

Aughenbaugh, K.L., Chancey, R. T., Stutzman, P., Juenger, M. C., Fowler, D. W. 2013. "An examination of the reactivity of fly ash in cementitious pore solutions" *Materials and Structures* 46 (5), 869-880.

Baradan, İ.B., Yazıcı, H., Ün, H. 2010. *Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*, İstanbul: Türkiye Hazır Beton Birliği.

Bulteel, D., Garcia-Diaz,E., Dégrugilliers, P.. 2010. "Influence of lithium hydroxide on alkali-silica reaction" *Cement and Concrete Research* 40(4), 526-530.

Chen, W., Brouwers, H.J.H. 2010. "Alkali binding in hydrated Portland cement paste" *Cement and Concrete Research* 40(4), 716-722.

Chen J., Jayapalan, A.R., Kim, J., Kurtis, K., Jacobs, L. J. 2010. Rapid evaluation of alkali-silica reactivity of aggregates using a nonlinear resonance spectroscopy technique. *Cement and Concrete Research* 40 (6), 914-923.

Demir, İ., Arslan, M. 2013. "The mechanical and microstructural properties of Li₂SO₄, LiNO₃, Li₂CO₃ and LiBr added mortars exposed to alkali-silica reaction", Construction and Building Materials, 42, 64-77. cements and in concrete pore solutions" Cement and Concrete Research 5(4), 329-345.

Diamond, S. 1975. "A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms 1. Alkalies in Cements and in Concrete Pore Solution", Cement and Concrete Research 5(4), 329-345.

Diamond, S. 1976. "A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms 2. Reactive aggregates", Cement and Concrete Research 6(4), 549-560.

Erdoğan T.Y. 2010. Beton, Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayınları.

Fernandes, I., Andiç-Çakır, Ö., Hooton, D. 2016. "Assessing aggregates for alkali-aggregate reaction potential", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials 169 (3), 172-178.

Fournier, B., Ideker, JH., Folliard, KJ., Thomas, MDA., Nkinamubanzi, PC., Chevrier R. 2009. "Effect of environmental conditions on expansion in concrete due to alkali-silica reaction (ASR)", Materials Characterization, 60 (7), 669-679.

Grattan-Bellew, P. E. 1997. "A critical review of ultra-accelerated tests for alkali-silica reactivity" Cement and Concrete Composites 19 (5-6), 403-414.

Harish, K.V., Rangaraju, P.R., 2011. "Effect of Blended Fly Ashes in Mitigating ASR", The Journal of Transportation Research Board, 2240, 10.

Lindgård, J., Andiç-Çakır, Ö., Fernandes, I., Rønning, T.F., Thomas, M.D.A. 2012. Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing, Cement and Concrete Research 42 (2), 223-243.

Malhotra, V. M., and Ramezaniapour, A. A. 1994. "Fly Ash in Concrete," MSL 94-45(IR), CANMET, Canada Center for Mineral and Energy Technology, Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario, Kanada.

Malvar, L. J.; Cline, G. D.; Burke, D. F.; Rollings, R.; Sherman, T. W.; and Greene, J. 2002. "Alkali Silica Reaction Mitigation: State-of-the-Art and Recommendations", *ACI Materials Journal*, 99 (5), 480-489.

Malvar, L. J., Lenke L. R. 2006. "Efficiency of Fly Ash in Mitigating Alkali-Silica Reaction Based on Chemical Composition", *ACI Materials Journal*, 103 (5), 319-326.

Rajabipour, F., Giannini, E., Dunant, C., Ideker, J. H., Thomas, M.D.A. 2015. "Alkali-silica reaction: current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps" *Cement and Concrete Research* 76, 130-146.

Ramlochan, T., Thomas, M., Gruber, K.A. 2010. "The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete" *Cement and Concrete Research* 30(3), 339-344.

Ramyar, K. 2013. "Betonda Alkali-Silis Reaksiyonu: Bir Derleme", *Hazır Beton* 120.

Shafaatian, S., Akhavan, A., Maraghechi, H., Rajabipour, F. 2013. "How does fly ash mitigate alkali silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C 1567)", *Cement and Concrete Composites*, 37, 143-153.

Schumacher, K. A., Ideker, J. H. 2014. "New considerations in predicting mitigation of alkali-silica reaction based on fly ash chemistry", *Journal of Materials in Civil Engineering* 27(4).

Thomas, M. 2011. "The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review", *Cement and Concrete Research*, 41 (12), 1224-1231.

Thomas, M., Fournier, B., Folliard, K., Ideker, J., Shehata, M. 2006. "Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete", *Cement and Concrete Research*, 36 (10), 1842-1856.

Turanli, L., Bektas, F., Monteiro, P.J.M. 2003. "Use of ground clay brick as a pozzolanic material to reduce the alkali-silica reaction", *Cement and Concrete Research*, 33 (10), 1539-1542.

Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A. 2004. Türkiye'deki Uçucu küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri (2. Basım). Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği/AR-GE/Y03.03.

Venkatanarayanan, H.K., Rangaraju, P.R. 2013. "Decoupling the effects of chemical composition and fineness of fly ash in mitigating alkali-silica reaction", *Cement and Concrete Composites*, 43, 54-68.

Wright, J.R., Shafaatian, S., Rajabipour, F. 2014. "Reliability of chemical index model in determining fly ash effectiveness against alkali-silica reaction induced by highly reactive glass aggregates", *Construction and Building Materials*, 64, 166-171.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. SİNAN TURHAN ERDOĞAN
Proje No:	215M816
Proje Başlığı:	Türkiye'de Mevcut Bazı Puzolanik Malzemelerin Özellikleri İle Çimento Harcı Alkali-Silis Tepkimesi Genleşmesine Etkileri Arasında İstatistiksel Bağlıntılar Geliştirilmesi
Proje Türü:	1002 - Hızlı Destek
Proje Süresi:	12
Araştırmacılar:	MUSTAFA TOKYAY
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. MÜHENDİSLİK F. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/03/2016 - 01/03/2017
Onaylanan Bütçe:	29800.0
Harcanan Bütçe:	26983.34
Öz:	<p>Portland çimentosu betonu, mekanik özellikleri sebebiyle, en çok kullanılan yapı malzemesidir. Çevresel etkenler karşısında dayanıklı oluşu inşasında kullanıldığı yapıların uzun servis ömürleri olmasını sağlamaktadır. Yapılarda gözlenen en ciddi dayanıklılık sorunlarından biri betondaki agregaların alkali silis tepkimesine (AST) bağlı genleşmelerdir. AST'den sıkça etkilenen yapılar arasında barajlar gibi su yapıları, ve yatay yüzeyler sayılabilir. Betonun AST dayanıklılığını artırmak için kullanılan en pratik ve en yaygın yöntem uygun mineral katkı maddelerinin çimento ile kısmen ikame edilerek kullanılmasıdır. Bu amaçla doğal puzolan, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi malzemeler sıklıkla beton yapımında kullanılmaktadır. Bu malzemeler genelde beton üretim tesislerinde standartlara uygun ikame yüzdeleri seçilerek, kaynakları ve kimyasal kompozisyonları arasındaki farklar dikkatlice değerlendirilmeden kullanılmaktadır. AST kaynaklı genleşmelerin büyüklüğü ve sorun yaratıp yaratmayacakları hakkında fikir edinmek için önerilmiş olan pek çok deney mevcuttur. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı, kısa süren ve düşük miktarda malzeme kullanan ASTM C 1567 (veya kaynağı olan ASTM C1260) standardında tarif edilen hızlandırılmış harç çubuğu genleşme deneyidir. Son yıllarda yurt dışında bu deneyin sonuçları ile kullanılan çimento ve mineral katkıların kimyasal ve fiziksel özellikleri arasında bağlantılar önerilmiştir. Bu gibi bağlantılar çeşitli malzeme parametrelerinin genleşme miktarına etkisi hakkında fikir vermektedir. Bu çalışmalar yurt dışında mevcut mineral katkılar ile yapılmış olduğu için, Türkiye'de ortaya çıkan malzemeler ile de yapılmaları gerekmektedir. Bu çalışmada farklı kimyasal içeriğe sahip onbir mineral katkı, iki farklı çimento ile yedi farklı ikame oranında kullanılmış, ASTM C 1567 deneyi uzama sonuçlarına etkileri incelenmiş, farklı harçların uzama miktarları ile oksit içerikleri arasında istatistiksel bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen bağlantılarla, oksit içeriği bilinen bir mineral katkı kullanılarak, bir çimento/agrega kombinasyonunun uzamasını sınır değerlerin altında tutmak için gereken ikame yüzdesi hesaplanabilmektedir. Deneysel sonuçlar ile tahmin edilen ikame yüzdeleri kıyaslanarak modelin başarısı tartışılmış, iyileştirilmesi için öneriler sunulmuştur. Projede kullanılan mineral katkıların ülkenin farklı bölgelerinde mevcut olması sebebiyle çalışma sonuçlarının sosyoekonomik fayda sağlayabileceği ümit edilmektedir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Alkali-Silis reaksiyonu, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu, doğal puzolan, istatistiksel model
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır