



## Metakaolin ve Akışkanlaştırıcı Katkı Kullanımının Harçların Mekanik Performansına ve Bazı Durabilite Özelliklerine Etkileri

Selçuk TÜRKEL\*<sup>1</sup>, Melek Müge TEVRİZCİ

<sup>1</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, 35160, İzmir

(Alınış Tarihi: 21.12.2014, Kabul Tarihi: 13.03.2015)

### Anahtar Kelimeler

Metakaolin  
Akışkanlaştırıcı  
Mekanik performans  
Alkali-silika reaksiyonu  
Klor geçirimsizliği.

**Özet:** Bu çalışmada, çimentonun bir kısmı yerine farklı metakaolin (MK) katkı oranlarıyla hazırlanan harç örneklerinin mekanik ve bazı durabilite özellikleri incelenmiştir. Harç karışımlarında metakaolin çimento ağırlığının % 0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15,0 ve 20.0' si oranlarında ikame edilmiştir. Çalışma kapsamında iki grup harç karışımı oluşturulmuştur. İlk grup harç karışımlarında harcın sarsma tablasındaki yayılma değeri 110-120 mm arasında olacak şekilde su/bağlayıcı oranı değiştirilmiştir. İkinci grupta ise su/bağlayıcı oranı 0,5 olarak sabit tutulup aynı yayılma değerini sağlamak için süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Hazırlanan örnekler üzerinde eğilme ve eğilme sonrası basınç, hızlı klor geçirimsizliği ve alkali silika reaktivitesi (ASR) deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda MK ve süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımının, mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediği, harçların ASR genleşmesini ve hızlı klor geçirimsizliğini önemli ölçüde azalttığı görülmüştür.

## The Effects Of Using Plasticizer And Metakaolin On The Mechanical Performance And Some Durability Properties Of Mortars

### Keywords

Metakaolin  
Superplasticiser  
Mechanical performance  
Alkali silica reaction  
Chloride penetration.

**Abstract:** In this study, mechanical and some durability properties of mortars were investigated using different replacement of cement by metakaolin (MK). For this purpose, 8 different mortar mixtures were designed. In mortar mixtures, MK was replaced 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, 15%, 20% by weight of cement. The mortar mixtures have been produced as two groups. In the first group, the water/binder ratio is varying depending on the water requirement of the mixtures. In the second group, super plasticizer chemical admixture has been incorporated to the mixtures in order to have a constant water/binder ratio of 0.5. Bending and compressive strength tests after bending, rapid chloride permeability and alkali-silica reactivity (ASR) experiments were performed on the prepared samples. Based on the results obtained from this study, the mechanical properties of mortars affected positively by using MK and super plasticizer. In addition to this, ASR expansion and rapid chloride permeability were reduced significantly.

### 1. Giriş

Harç ve betonda puzolanik katkı olarak metakaolin kullanımı son yıllarda önemli ölçüde araştırılan bir konu haline gelmiştir. Bu araştırmaların çoğu durabiliteyi olumsuz yönde etkileyen bir hidratasyon ürünü olan portlanditin ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) bağlanması üzerine odaklanmıştır. Portlanditin bağlanması, portlandit ve metakaolinin oluşturduğu reaksiyonlar sonucunda dayanımın artışı sağlanmasının yanı sıra durabilite bakımından da büyük önem taşımaktadır. (Tevrizci, 2010).

Metakaolinin çimento harcında puzolan amaçlı olarak kullanımı 1960'lı yıllara dayanmakta olup 1990'lı yıllardan itibaren ise sağladığı yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle beton üretiminde kullanımı yaygınlaşmıştır (Barness ve Bensted, 2001).

Saflaştırılmış kaolin kilinin kalsine edilmesiyle yüksek oranda puzolanik özelliğe sahip olan MK, beyaz renkli, amorf yapılı bir alumina silikattir. MK diğer puzolanlarda olduğu gibi kalsiyum hidroksitle

\* İlgili yazar: [selcuk.turkel@deu.edu.tr](mailto:selcuk.turkel@deu.edu.tr)

reaksiyona girerek çimentoya ilave bağlayıcı özellik kazandırır. Yapılan çalışmalarda, çimento yerine uygun oranlarda MK kullanıldığında, mekanik özellikleri olumlu etkilediği (Poon vd., 2006, Sabir vd., 2001), kılcal su emme, permeabilite ve hızlı klor geçirimliliğini azaltarak durabiliteyi arttırdığı (Khatib ve Clay, 2004, Gruber vd., 2001, Bai vd., 2003, Al-Akhras, 2006, Ramezani-pour ve Bahrami Jovein, 2012), çiçeklenmeyi kontrol etmede etkili olduğu ve özellikle alkali silika reaksiyonu oluşumunu azalttığı bulunmuştur (Ramlochan vd., 2003, Aquino vd., 2001). Ayrıca, MK kullanımının işlenebilirliği arttırarak daha düzgün bir yüzey elde edilmesine olanak sağladığı (Siddique ve Kalus, 2009, Kim vd., 2007), betonda kuruma rötresi ve sünmenin azaldığı da rapor edilmiştir (Brooks ve Johari, 2001).

Caldarone vd. (1994), aynı su/bağlayıcı oranlarına sahip, % 5 ve % 10 oranlarında MK ve silika dumanı (SD) içeren betonlar üretmiş ve çalışma sonucunda MK içeren betonların SD içerenlere göre daha yüksek dayanımlar verdiği belirtilmiştir. MK' in benzer etkileri Wild vd. (1996) tarafından da rapor edilmiştir. Araştırmacılar, MK' in betonun dayanımı üzerindeki etkisini şu üç ana faktöre bağlamıştır: filler etkisi, hidrasyonu hızlandırması ve puzolanik reaksiyon (Sabir vd., 2001). Qian ve Li'nin (2001), %15' e kadar MK kullanarak yaptıkları çalışmada MK' in çökme değerine ve basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Karışım suyunu sabit tutarak hazırlanan betonlarda MK ilavesi ile betonda işlenebilirliğin azaldığı ancak %1,2 oranında akışkanlaştırıcı katkı kullanıldığında kıvam kaybı yaşanmadığı belirlenmiştir. Bu durum uygun akışkanlaştırıcı oranının kullanımı ile MK' in kıvam sorunu yaşanmadan yüksek oranda kullanılabilirliğini göstermiştir. Ayrıca bu karışımların basınç dayanımları da MK ilavesi ile artmıştır. Yukarıda özetlendiği üzere, MK' in çimento harcının dayanım ve dayanıklılığı üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalarda, genellikle belli kullanım oranına kadar MK' in olumlu etkisi gözlenmektedir. Yüksek kullanım oranlarında ise karışımın su ihtiyacını arttırması nedeniyle MK' in performansı düşmektedir. Su ihtiyacı artışı etkili akışkanlaştırıcılar kullanılarak çözümlenirse daha yüksek oranlarda MK kullanımı mümkün olabilmektedir.

Ayrıca birçok araştırmacı çimentoya göre daha ince tane boyutlarına sahip olan MK'nin çimentonun mekanik fiziksel ve durabilite özellikleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu belirlemiştir (Figueiredo vd., 2014, Ferraza vd., 2014, Aghabaglou vd., 2014).

Bu çalışmada, değişik oranlarda metakaolin ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımının harç örneklerinin eğilme ve eğilme sonrası basınç, hızlı klor geçirimliliği, alkali silika reaktivitesi ve kapiler

su emme özelliklerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır.

## 2. Malzemeler Ve Yöntem

### 2.1. Malzemeler

Bu çalışmadaki tüm karışımlarda CEM I 42.5R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 1' de verilmiştir. Metakaolin katkısının tedarikçi firma tarafından verilen fiziksel, kimyasal özellikleri ve laboratuvar deneyi ile saptanan puzolanik aktivite indeksi değeri Tablo 2' de sunulmuştur.

**Tablo 1.** Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Bileşim	(%)	Basınç Dayanımı (MPa)	
CaO	62,92	2 günlük	24,3
SiO <sub>2</sub>	19,90	28 günlük	46,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,90		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,10	Fiziksel Özellikler	
MgO	1,25	Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3395
Na <sub>2</sub> O	0,38	Özgül ağırlık	3,15
K <sub>2</sub> O	0,90		
SO <sub>3</sub>	3,26	Mineralojik Bileşim	
Cl	0,0112	C <sub>3</sub> S	52,9
Kızd. Kay.	3,94	C <sub>2</sub> S	13,6
Serbest CaO	1,94	C <sub>3</sub> A	12,1
Çözünmeyen Kalıntı	0,23	C <sub>4</sub> AF	6,4

**Tablo 2.** Metakaolin katkısının kimyasal, fiziksel ve puzolanik aktivite özellikleri

Kimyasal Bileşim	(%)	Fiziksel ve Mekanik Özellikler	
CaO	0,1	Özgül ağırlık	2,589
SiO <sub>2</sub>	53		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43	Puzolanik Aktivite İndeksi, (%)	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,9	7. gün	123,5
MgO	0,09	28. gün	141,4
Na <sub>2</sub> O	0,04	İncelik (Lazer difraksiyon yöntemi ile)	
K <sub>2</sub> O	0,3	%10'u < 2µm	
SO <sub>3</sub>	0,09	%50'si < 4.5µm	

Agrega olarak 4 mm elekten elenmiş doğal kum kullanılmıştır. Doğal kumun elek analizi ve fiziksel özellikleri Tablo 3’ de verilmiştir.

**Tablo 3.** Doğal kumun elek analizi ve fiziksel özellikleri

Elek açıklığı (mm)	Kümülatif geçen (%)	Fiziksel Özellikler	
8	100	Kuru	
4	91	Yüzey	
2	62	Doygun Özgül Ağırlık	2,570
1	44		
0,5	27	Su emme (%)	2,30
0,25	15		

Kimyasal katkı olarak Sika firmasından sağlanan 1,22 kg/l yoğunluğa sahip melamin sülfonat polimeri esaslı Sikament FFN isimli süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

## 2.2. Örneklerin Hazırlanması, Kürü ve Uygulanan Deneyle

Harç karışımları iki grup (akışkanlaştırıcı katkılı ve katkısız) olarak tasarlanmış ve metakaolin her grupta çimento yerine ağırlıkça % 0, 2,5, 5,0, 7,5, 10,0, 12,5, 15,0 ve 20,0’ si oranlarında kullanılmıştır. Harç karışımlarına ASTM C230 standardına uygun olarak sarsma tablası deneyi yapılmış ve harçların işlenebilirlik özellikleri belirlenmiştir. Su/bağlayıcı oranı birinci grup (MK kodlu) harç karışımlarında harcın sarsma tablasındaki yayılma değeri 110-120 mm arasında olacak şekilde değişken, ikinci grupta (MKA kodlu) ise aynı yayılma değeri için süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak 0,5 değerinde sabit tutulmuştur. Karışımların hazırlanmasında Hobart mikser kullanılmış olup ASTM C 348 standardına uygun olarak karıştırılmış ve sıkıştırılmıştır. Kum, çimento ve metakaolin karıştırıcıya konulduktan sonra kuru olarak 30 sn karıştırılmıştır. Birinci grup için gerekli su miktarı, ikinci grupta ise sabit su/bağlayıcı oranında ihtiyaç duyulan süperakışkanlaştırıcı miktarı istenilen yayılma değerlerine göre belirlenerek karışıma katılmış ve karışım 1 dakika boyunca karıştırılmıştır. Mikser durdurularak kabın kenarında ve dibinde kuru malzeme kalmamasını sağlamak için kaşık ile karıştırılmış ve mikser 30 saniye daha çalıştırılmıştır. Üretilen harçların karışım oranları ve isimlendirilmesi Tablo 4’de sunulmuştur. Eğilme ve basınç dayanımı deneyleri için toplam 192 adet 40x40x160 mm prizmatik örnek kullanılmıştır.

**Tablo 4.** Harç karışımlarında kullanılan malzeme miktarları

Karışım Adı	MK oranı (%)	Su/bağlayıcı oranı	Kum (kg/m <sup>3</sup> )	Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	MK (kg/m <sup>3</sup> )	S.Ak ışı. (kg/m <sup>3</sup> )	Su (kg)
MK-1	0	0.50	1508	503	0	0	251
MK-2	2.5	0.52	1507	490	12	0	251
MK-3	5	0.54	1506	476	25	0	253
MK-4	7.5	0.54	1472	454	37	0	267
MK-5	10	0.57	1447	434	48	0	279
MK-6	12.5	0.58	1446	422	60	0	279
MK-7	15	0.60	1430	405	72	0	286
MK-8	20	0.62	1413	377	94	0	293
MKA-1	0	0.50	1508	503	0	0	251
MKA-2	2.5	0.50	1505	489	13	2.2	251
MKA-3	5	0.50	1503	476	25	2.8	250
MKA-4	7.5	0.50	1501	463	38	2.8	250
MKA-5	10	0.50	1500	450	50	3.3	250
MKA-6	12.5	0.50	1498	437	62	3.3	250
MKA-7	15	0.50	1496	424	75	3.8	250
MKA-8	20	0.50	1492	402	100	5.5	252

Klor geçirimsizliği deneyi ASTM C 1202 standardına göre yapılmış olup deneyler toplam 32 adet  $\Phi$ 100/50 mm’lik silindir örnek üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan karışımlar kalıplara iki kademe doldurulmuş ve tokmaklanmıştır. Daha sonra sarsma tablasında titreşim etkisine tabi tutularak harcın sıkıştırılması sağlanmıştır. Dökümden 24±2 saat sonra kalıplar alınmış ve örnekler 20oC sıcaklıktaki kirece doymun suda 28 gün kür edilmiştir. Kür süresinin tamamlanmasının ardından kuru yüzey doymun haldeki örnekler Şekil 1’ de gösterilen deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Çözeltilerin dışarı çıkmasına engel olmak için silindir örneğin açıkta kalan yan yüzeyi silikonla kaplanmıştır. Düzeneğin bir hücreesine 30 g/l NaCl, diğer hücreesine 12 g/l NaOH çözeltisi doldurulmuş ve silindir örneğin karşılıklı iki yüzü bu sıvıyla temas ettirilmiştir.



Şekil-1. Klor Geçirirliliği deneyi düzeneği

Alkali silika reaksiyonu deneyi için 32 adet 25x25x285 mm'lik harç çubuğu örnekleri hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar kalıplara iki kademede doldurulmuş ve tokmaklanmıştır. Daha sonra sarsma tablasında titreşim etkisine tabi tutularak harcın sıkıştırılması sağlanmıştır. Örnekler 24±2 saat bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılmış ve ilk boy ölçümleri yapılmıştır(Li). 24±2 saat 80oC sıcaklıktaki saf suda bekletilen örneklerin tekrar boy ölçümü yapılmıştır(Lo) . Bu aşamadan sonra örnekler, 80oC sıcaklıktaki 1M NaOH çözeltisi içinde 14 gün bekletilmiştir (Şekil 2).

### 3. Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Bu çalışmada yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

#### 3.1. Eğilme ve Eğilme Sonrası Basınç Dayanımı

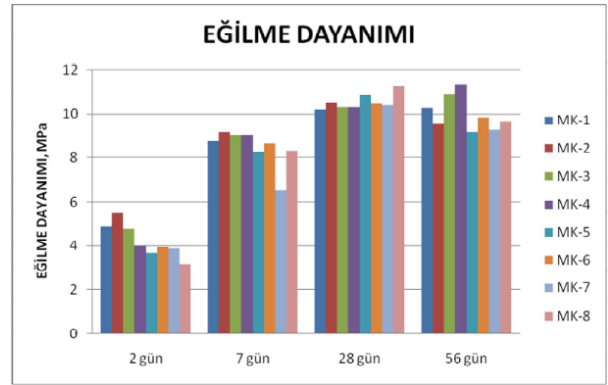
Çalışmada üretilen harçlardan hazırlanan 40/40/160 mm prizmatik akışkanlaştırıcı katkılı ve katkısız örnekler üzerinde yapılan eğilme deneyleri sonuçları grafik olarak Şekil-3'de verilmiştir. Grafiklerde yer alan sonuçlar 3 adet örneğin ortalamasıdır.

Şekil 3 (a)' dan görüldüğü gibi akışkanlaştırıcı katkısız karışımların 2. ve 7. gün eğilme dayanımları içinde en yüksek değeri MK-2 sağlamıştır. 28. günde en yüksek eğilme dayanımı değerini MK-8 sağlarken, MK-4 karışımı 56. günde en yüksek eğilme dayanımı değerini vermiştir. Genel olarak MK ikame oranının artması ile ileri yaşlarda (28 ve 56. günler) daha yüksek eğilme dayanımları elde edilmiştir. Şekil-3 (b)' den süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin genel olarak düzenli bir eğilme dayanımı artışı sergilediği görülmektedir. 2. günde en yüksek eğilme dayanımı değeri %5 MK ikame edilen MK-3K karışımına ait iken,7. gün de en yüksek eğilme dayanımını sağlayan karışım %12,5 MK içeren MK-6K isimli karışımdır. 28. gün MK-7K en yüksek eğilme

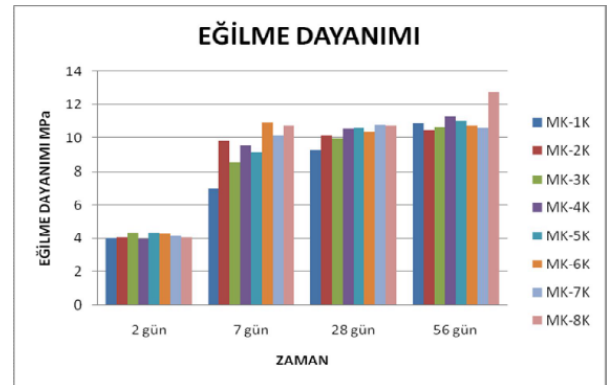
değerini sağlarken 56. günde en yüksek performansı MK-8K karışımı göstermiştir.



Şekil 2. ASR harç çubuğu örneklerinin 80°C sıcaklıkta NaOH çözeltisi içinde kür edilmesi



(a)

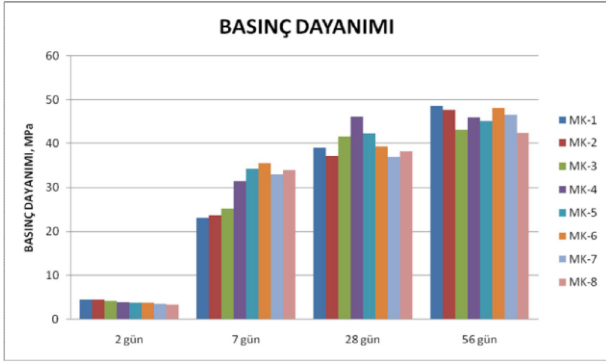


(b)

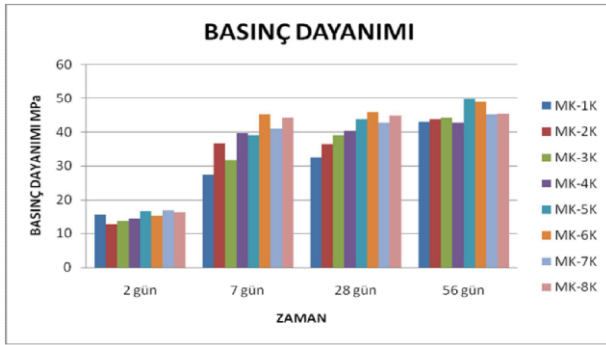
Şekil 3. (a) Süperakışkanlaştırıcı kullanmadan (b) kullanılarak hazırlanan örneklerin eğilme dayanımları

Şekil 4'(a) da süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin yaşlarına göre basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Buna göre erken yaşlarda MK ikame artış oranıyla ters orantılı olarak azalan basınç dayanımı ileri yaşlarda artış eğilimine girmiştir. 28. günde en yüksek basınç dayanımını %7,5 MK içeren

karışım sağlarken 56. günde en yüksek basınç dayanımına kontrol örnekleri ulaşmıştır.



(a)



(b)

**Şekil 4.** (a) Süperakışkanlaştırıcı kullanmadan (b) kullanılarak hazırlanan örneklerin basınç Dayanımları

Şekil 4(b)' de süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin yaşlarına göre basınç dayanımı değerleri yer almaktadır. Yapılan bu çalışmada harç örneklerinin yaşı ilerledikçe eğilme dayanımlarında olduğu gibi basınç dayanımları da artış göstermiştir. 2. günde en iyi sonucu %15 MK içeren MK-7K verirken, 7., 28. ve 56. günlerde en iyi dayanım gösteren karışım MK-6K olmuştur.

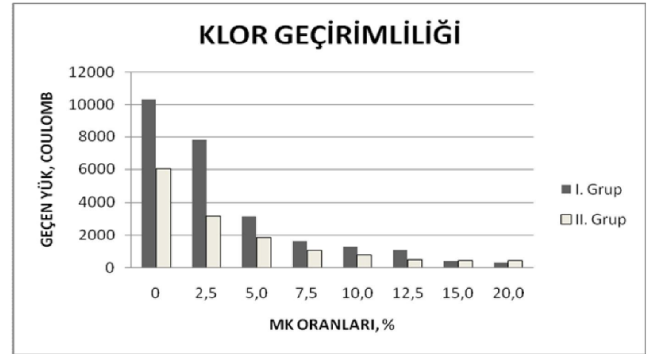
Şekil 4 (a)' ya göre süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin 2. gün basınç dayanım değeri en düşük olan karışım en yüksek MK ikame edilmiş olan MK-8' dir. Tüm karışım oranları ilerleyen yaşlarında genellikle benzer davranışlar göstermişlerdir. Ancak MK-4 karışımının 28. gün dayanımı 56. gün dayanımına göre az da olsa yüksek çıkmıştır. Bu durumun nedeninin harcın kalıba iyi yerleştirilememesinden kaynaklandığını söylemek mümkündür. Şekil 4(b)' ye göre süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin basınç dayanımı değerleri örneklerin yaşı ilerledikçe artmıştır. 2. günde en iyi sonucu %15 MK içeren MK-7K verirken, 7., 28. ve 56. günlerde en iyi dayanım gösteren karışım MK-6K olmuştur.

Metakaolinin beton veya harçların erken ve ileriki yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımına katkı yapması metakaolin 3 farklı özelliği sayesinde katkı sağlanmaktadır. Bunlar; Portland çimentosunun

hidratasyonunu hızlandırması, puzolanik reaksiyon yapması ve inceliği nedeniyle boşlukları doldurmasıdır (Badogiannis vd., 2004, Khatib vd., 2005). Metakaolinin yapısında bulunan silis ve alüminin  $Ca(OH)_2$  ile reaksiyona girerek, çimentoda hidratasyon sonucu oluşan CSH jellerine ilave CSH jelleri ile  $C_4AH_{13}$ ,  $C_2ASH_8$ ,  $C_3AH_6$  fazları da üretmekte ve bunun sonucunda dayanım artışları oluşmaktadır (Siddique ve Kalus, 2009, Khatib ve Hibbert, 2005). Ayrıca çok ince taneli olan metakaolin tanecikleri, harçta oluşan boşlukları tıkayarak kompasiteyi artırmaktadır. Yine çok ince taneli metakaolin çimento hamurunun boşluk yapısında olumlu yönde iyileşme sağlamaktadır (Poon vd., 2006). Tüm bu etkiler sonucunda üretilen harç ve betonun mekanik özelliklerinde bu çalışmada olduğu gibi olumlu artışlar elde edilmektedir. Ayrıca diğer araştırmacıların (Güneyisi vd., 2012, Mermerdaş vd., 2012, Shorky vd., 2013 ve Yazıcı vd., 2014) mekanik özellikler üzerine yaptıkları çalışmalarda, metakaolin katkılı harç veya beton örneklerinde en etkili MK kullanım oranının %15 olduğu bulguları bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile uyumludur.

### 3.2. Klor Geçirimsizliği

ASTM C 1202 - 97 standardına uygun olarak süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan ve kullanılarak hazırlanan klor geçirimsizliği örneklerinden 6 saatlik deney süresi sonunda geçen toplam elektriksel yük her iki grup örnekler için Şekil 5' de verilmiştir.



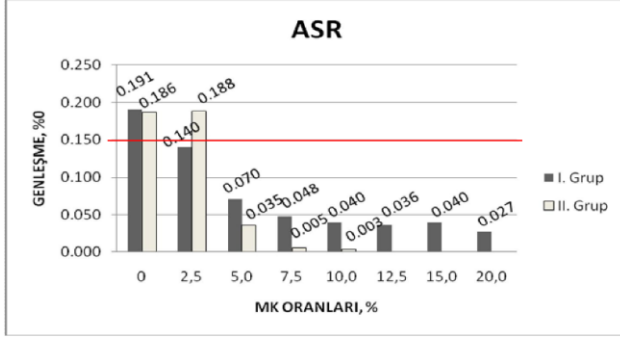
**Şekil 5.** Süperakışkanlaştırıcı kullanılmamış ve kullanılan karışımlarla hazırlanan örneklerden geçen elektriksel yükler

Şekil 5' den görüldüğü gibi her iki grup örnekler benzer davranış göstermekte olup MK ikame oranı arttıkça geçen toplam yük azalmıştır. Betonda %10, %12.5 ve %15 oranında metakaolin kullanılan benzer bir çalışmada metakaolin katkı oranı artışıyla betonun hızlı klor geçirimsizliğinin, metakaolin kullanılmayanlara kıyasla azaldığı belirlenmiştir (Ramezaniyanpour ve Bahrami, 2012). Dolayısıyla farklı bir araştırmadan çıkan bu sonuç, bu çalışmada elde edilen sonuçları desteklemektedir. Süperakışkanlaştırıcı kullanılan örneklerde geçen toplam elektriksel yük diğer örneklere oranla daha

azdır. MK kullanımı gözenekliliği ve boşluk yapısını azaltmıştır. Ayrıca süperakışkanlaştırıcı kullanımı işlenebilirliği arttırdığı için harç kalıba daha iyi yerleşmiş ve boşluk yapısı azalmıştır. Böylece geçen elektriksel yük azalmış ve süperakışkanlaştırıcı kullanılan harçlar içinde %12,5 MK ikame oranına kadar daha iyi performans sergilemişlerdir.

### 3.3. Alkali Silika Reaksiyonu

Şekil-6' da I. ve II. grup karışımlarla hazırlanan örneklerin ASR genleşmeleri görülmektedir.



Şekil 6. Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan ve kullanılarak hazırlanan harç çubuğu örneklerinin ASR genleşmeleri

Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerde kontrol karışımı dışında tüm ikame oranları için genleşme değerleri Kanada standardı (CAN/CSA A23.2 25A, 1994) tehlikeli sınırı olan %0,15 değerinin altında kalmıştır. Artan MK ikame oranları için genleşme değerinin azaldığı görülmektedir. En düşük genleşme değeri %20 MK ikame edilmiş karışım olan MK-8' de elde edilmiştir. Benzer sonuçlara daha önce yapılan çalışmalarda da ulaşılmıştır (Aquino vd., 2001). Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan ASR harç çubuğu örneklerinde kontrol karışımı ve %2,5 MK ikame edilen karışımlarda genleşme değerlerinin tehlikeli sınır olan % 0,15 değerinin üstüne çıktığı gözlenmiştir. Artan MK ikame oranları için genleşme değerleri azalmış %12,5, %15 ve %20 ikame oranları için genleşme gözlenmemiştir. Bu çalışmadan elde edilen, MK oranı arttıkça ASR genleşmelerinin azaldığı ve özellikle çimento yerine %15 ve %20 oranında MK kullanımı ile genleşmelerin tehlikeli sınır değerinin oldukça altında kaldığı bulgusu, Yazıcı vd. (Yazıcı vd., 2014) tarafından elde edilen sonuçlar ile uyum sağlamaktadır.

Şekil 6' da I. ve II. grup karışımlar kullanılarak hazırlanan örnekler ASR açısından karşılaştırıldığında, süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örnekler akışkanlaştırıcı katkısız örneklere göre daha iyi performans göstermişlerdir. Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile işlenebilirliğin artması harcın kalıba daha iyi

yerleşmesini ve daha iyi sıkışmasını sağladığından, harçtaki boşluk oranı azalmaktadır. Bu sebeple süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılan harç çubuklarının, kullanılmayanlara göre ASR açısından daha iyi performans sergilediğini söylemek mümkündür.

### 4. Sonuçlar

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Metakaolin kullanımı ile harç örneklerinin basınç ve eğilme dayanımı değerlerinde artış sağlanmıştır. Su/bağlayıcı oranı değişken olan I. Grup örneklerde dayanım değerleri süperakışkanlaştırıcı kullanılan II. Grup örneklere göre daha düşük değerlerdedir. Örneklerin 2. günden 56. güne kadar her yaş durumu için en iyi basınç dayanımı değeri %7,5 oranında metakaolin içeren MK-4 karışımında elde edilmiştir.

Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımı, yüksek oranda MK ikamesi yapılan karışımlarda işlenebilirliği arttırdığından örneklerin boşluk yapısı ve buna bağlı olarak dayanım ve geçirimsizlik özellikleri üzerinde olumlu etki yaratmıştır.

Hızlandırılmış klor geçirimsizliği deneyinde metakaolin ikame oranının artması örneklerden geçen elektriksel yükün azalmasına sebep olmuştur. Süperakışkanlaştırıcı kullanılan (su/bağlayıcı oranı düşük) karışımlarda klor geçirimsizliğine karşı direnç daha yüksek olarak elde edilmiştir. Ancak en yüksek MK ikame değerinde bile geçirimsizlik değeri ihmal edilebilir sınır olan 100 Coulomb' un üstündedir.

Metakaolin kullanımının harç örneklerinin ASR riskini azalttığı görülmüştür. Bu durumun metakaolin katkı oranı arttıkça harç örneklerinin geçirimsizliğinin azalmasından kaynaklandığını belirtmek mümkündür. Ayrıca süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile en düşük metakaolin katkı oranlı karışımlarda da yüksek ASR direnci elde edilmiştir.

### 5. Kaynaklar

Aghabaglou, A.M., Sezer, G.İ., Ramyar, K., 2014. Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. Construction and Building Materials, 70(15), 17-25.

Al-Akhras, N.M., 2006. Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. Cem.Con.Res. 36, 1727-1734.

Aquino W., Lange, D.A., Olek, J., 2001. The influence of metakaolin and silica fume on the chemistry of alkali-silica reaction products. Cement and Conc. Comp., 23, 485-493.

- Bai, J., Wild, S. ve Sabir, B.B., 2003. Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC-PFA-MK binder compositions exposed to synthetic seawater. *Cement and Concrete Research*, 33, 353–362.
- Barness, P., Bensted, J., 2001. “Structure and Performance of Cements”, Second Edition. CRC Press, 584s, London.
- Brooks, J.J., Johari, M.A., 2001. Effect of metakaolin on creep and shrinkage on concrete. *Cement and Conc. Comp.*, 23, 495-502.
- Caldarone, M.A., Gruber, K.A., Burg, R.G., 1994. High-Reactivity Metakaolin : A new generation mineral admixture. *Concrete International, ACI*, 16(11), 37-40.
- CAN/CSA A23.2 25A, 1994. Standard test method for detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars. Canada.
- Ferraza, E., Andrejkovičová, S., Velosac A.L., Silvad, S.A., Rochab, F., 2014. Synthetic zeolite pellets incorporated to air lime-metakaolin mortars: Mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 69, 243–252.
- Figueiredo, C.P., Santos, F.B., Cascudo, O., Carasek, H., Cachim, P., Velosac, A., 2014. The role of metakaolin in the protection of concrete against the deleterious action of chlorides. *IBRACON Structures and Materials Journal*, 7(4), 685-708.
- Gruber, K. A., Ramlochan, T., Boddy, A., Hooton, R. D., & Thomas, M.D.A., 2001. Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin. *Cement & Concrete Composites*, 23, 479–484.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Karaoğlu, S., Mermerdaş, K., 2012. Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. *Constr. Build. Mater.* 34, 120–130.
- Khatib, J.M., Clay, R.M., 2004. Absorption characteristics of metakaolin concrete. *Cement & Concrete Research*, 4, 19-29.
- Khatib, J.M., Hibbert, J.J., 2005. Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin. *Construction and building materials*, 19, 460-472.
- Kim, H.S., Lee, S.H., Moon, H.Y., 2007. Strength properties and durability aspect of high strength concrete using Korean metakaolin. *Construction and building materials*, 21, 1229-1237.
- Mermerdaş, K., Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Özturan, T., 2012. Strength development of concretes incorporated with metakaolin and different types of calcined kaolins. *Constr. Build.Mater.* 37, 766–774.
- Poon, C.S., Kou, S.C, Lam, L., 2006. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and building materials*, 20, 858-865.
- Ramezaniyanpour A.A., Bahrami Jovein H., 2012. Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes. *Construction and Building Materials*, 30, 470–479.
- Qian, X., Li, Z., 2001. The relationship between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin. *Cem. Con.Res.* 31(11), 1607-1611.
- Ramlochan, T., Thomas, M.D.A., Hooton, R.D., 2003. The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature. Part I: Expansive behaviour. *Cement and Concrete Research*, 33, (6), 807-814.
- Sabir, B.B., Wild, S., Bai, J., 2001. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 23, 441-454.
- Shorky, H., Kotkata, M.F., Abo-el-Enein, S.A., Morsy, M.S., 2013. Flexural strength and physical properties of fiber reinforced nano metakaolin cementitious surface compound. *Constr. Build. Mater.* 43, 453–460.
- Siddique, R., Kalus, J., 2009. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review”, *Applied Clay Science*, 43, 392-400.
- Tevrizci M.M., 2010. Metakaolin Katkılı Harçların Bazı Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 192s, İzmir.
- Wild, S., Khatib, J.M. and Jones, A., 1996. Relative strength pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised MK. *Cement & Concrete Research*, 26, 1537–1544.
- Yazıcı, Ş., Arel, H.Ş., Anuk, D., 2014. Influences of Metakaolin on the Durability and Mechanical Properties of Mortars. *Arab J Sci Eng.* 39, 8585–8592.