

---

## KİMYASAL VE MİNERAL KATKILI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLAR

İ. Özgür YAMAN  
Yrd. Doç. Dr.  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat  
Mühendisliği Bölümü  
Ankara, Türkiye

Mustafa ŞAHMARAN  
Arş. Gör.  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat  
Mühendisliği Bölümü  
Ankara, Türkiye

### ÖZET

Kendiliğinden yerleşen betonlarda aranan özellikleri etkileyen önemli faktörlerden biri harçların taze özelliğidir. Bu nedenle kendiliğinden yerleşen betonların karışım hesaplarına harçların reolojik özellikleri üzerinde yapılan testler sonucunda karar verilmektedir. Bu testler ise karmaşık deney aletleri içerdiği için çoğunlukla yapılamamakta ve bunun yerine harçların işlenebilirliğini tahmin etmeye yarayan daha basit deneyler tercih edilebilmektedir. Bu çalışmada, iki farklı mineral katkı, iki farklı süperakışkanlaştırıcı katkı ve iki farklı viskozite iyileştirici katkı kullanılarak, kendiliğinden yerleşen harç üretilmiştir. Mineral katkı olarak, uçucu kül ve kalker tozu kullanılmıştır. Süperakışkanlaştırıcı katkı olarak polikarboksilik eter bazlı ve naftalin formaldehid bazlı olmak üzere iki farklı katkı kullanılmıştır. Viskozite iyileştirici katkı olarak ise mikroskobik silika bazlı ve yüksek moleküler ağırlıklı hidroksil polimer bazlı iki farklı katkı kullanılmıştır.

Bu deneysel çalışmada, yukarıda isimleri verilmiş mineral ve kimyasal katkıları değişik oranlarda kullanılarak 17 ayrı kendiliğinden yerleşen harç üretilmiştir. Tüm karışımlardaki toplam su miktarı eşit tutulmuştur. Harçların işlenebilirliklerinin tespiti için, yayılma testi ve mini V-hunisi deneyleri yapılmıştır. Ayrıca farklı

---

katkı maddelerinin betonun priz süresine etkilerini tespit edebilmek amacıyla tüm karışımların priz süreleri ölçülmüştür. Harçların sertleşmiş özelliklerini ölçmek amacıyla tüm karışımların 28 günlük basınç dayanımları ve birim ağırlıkları ölçülmüştür. Deney sonuçlarından gerek kimyasal gerekse mineral katkıların harçların priz sürelerini etkilediği gözlemlenmiştir. Özellikle uçucu kül kullanımı arttığında priz süresi diğer katkılarla karşılaştırıldığında önemli oranda artmaktadır. Kendiliğinden yerleşen harçlarda işlenebilirlik yönünden polikarboksilik bazlı süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıların naftalin formaldehid bazlı süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkılara göre daha etkili olduğu görülmüştür. Uçucu kül ve kalker tozu kullanımının kendiliğinden yerleşen harçlarda işlenebilirliği düzeltip, viskozite düzenleyici kimyasal katkılara olan gereksinimi ortadan kaldırdığı tespit edilmiştir. Fakat, kendiliğinden yerleşen harçlarda işlenebilirliği ve viskoziteyi düzenlemek amacıyla toplam bağlayıcı miktarının bir kısmının yerine mineral katkıların kullanılması, kimyasal katkılara oranla basınç dayanımlarında düşmelere neden olmaktadır.

## GİRİŞ

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) ilk olarak 1980'lerin ikinci yarısında, konvansiyonel betonlarda meydana gelen dayanıklılık problemlerini ortadan kaldırmak amacıyla, Japonya'da üretilmiştir [1]. Kendiliğinden yerleşen beton kendi ağırlığı altında vibrasyon gerektirmeden ve ayrışma olmaksızın yerleşen ve sıkışan beton olarak tanımlanmaktadır. Yapısal amaçla üretilen standart betonlara oranla kendiliğinden yerleşen betonun en önemli avantajları yüksek akıcılığı ve şekil değiştirme özelliğidir.

KYB'lerde yüksek akışkanlığın sağlanabilmesi için yaygın yöntem iri agrega miktarının sınırlandırılması ve uygun özellikte harç kullanılmasıdır. Aynı yöntem harç içindeki kum oranının harç hacminin %40'ıyla sınırlandırıldığı kendiliğinden yerleşen harçlar (KYH) için de geçerlidir. Buna ek olarak süperakışkanlaştırıcılarla beraber daha düşük su çimento oranlarında yüksek akışkanlıklar elde edilmektedir [2]. KYB ya da KYH'larda ayrışmayı engellemek ve viskoziteyi arttırmak için viskozite düzenleyici katkıların kullanımı da gerekebilmektedir [3]. Harçlar KYB'nin işlenebilirlik özelliklerinin temelini oluşturmakta ve bu özellikler KYH'ların incelenmesiyle değerlendirilebilmektedir [4]. KYH'ların özelliklerinin değerlendirilmesinin KYB tasarımının bütünleşik bir parçası olduğu belirtilmektedir [5].

---

Kimyasal katkıların ve yüksek dozajda portland çimentosunun sıklıkla kullanılması nedeniyle KYB'nin dezavantajlarından bir tanesi yüksek maliyetidir. KYB'nin yüksek maliyetinin azaltılması için karışımlara mineral katkıların eklenmesi yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Mineral katkıları portland çimentosunun bir kısmının yerine kullanıldığında, özellikle mineral katkı endüstriyel bir yan ürün ya da atıksa maliyet azalacaktır. Uçucu kül gibi bazı mineral katkıların betonun işlenebilirliğini, dayanıklılığını ve uzun dönem özelliklerini iyileştirebileceği bilinmektedir [7]. Bu nedenle KYB'de mineral katkıların kullanımı sadece KYB'lerin maliyetini düşürmeyip aynı zamanda uzun dönem performansını da iyileştirecektir.

### AMAÇ

Bu çalışmanın amacı mineral ve kimyasal katkıların KYH'ların özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu nedenle iki farklı mineral katkı, iki farklı süperakışkanlaştırıcı katkı ve iki farklı viskozite iyileştirici katkı kullanılarak, kendiliğinden yerleşen harç üretilmiştir. Mineral katkı olarak, uçucu kül ve kalker tozu kullanılmıştır. Süperakışkanlaştırıcı katkı olarak polikarboksilik eter bazlı ve naftalin formaldehid bazlı olmak üzere iki farklı katkı kullanılmıştır. Viskozite iyileştirici katkı olarak ise mikroskobik silika bazlı ve yüksek moleküler ağırlıklı hidroksil polimer bazlı iki farklı katkı kullanılmıştır. Mineral katkıları sadece ikili karışım olarak değil (bir mineral katkının portland çimentosunun belirli bir kısmının yerini alması) üçlü karışımlar şeklinde de kullanılmıştır. Tüm karışımlardaki toplam su miktarı eşit tutulmuştur. Harçların işlenebilirliklerinin tespiti için, yayılma testi ve mini V-hunisi deneyleri yapılmıştır. Ayrıca farklı katkı maddelerinin harçların priz süresine etkilerini tespit edebilmek amacıyla tüm karışımların priz süreleri ölçülmüştür. Harçların sertleşmiş özelliklerini ölçmek amacıyla tüm karışımların 28 günlük basınç dayanımları ve birim ağırlıkları ölçülmüştür.

### DENEYSSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmada PÇ 42.5 tipi çimento kullanılmıştır. Mineral katkı olarak yüksek kireçli uçucu kül (UK) ve kireçtaşı tozu (KT) kullanılmıştır. Çimentonun ve mineral katkıların fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. KYH üretimlerinde iki farklı süperakışkanlaştırıcı (SA) ve iki farklı viskozite düzenleyici

kimyasal katkı (VDK) kullanılmıştır. Kimyasal katkıların özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir. Deneysel çalışmada ince aģega olarak dere kumu kullanılmıştır. İnce aģeganın gradasyonu elek analiziyle belirlenip sonuçları Çizelge 3’te verilmiştir.

**Çizelge 1. Çimento, uçucu kül ve kireçtaşı tozu özellikleri**

<i>Kimyasal Özellikler (%)</i>	<b>Portland Çimentosu (PÇ)</b>	<b>Uçucu Kül (UK)</b>	<b>Kireçtaşı Tozu (KT)</b>
CaO	61.94	11.34	54.97
SiO <sub>2</sub>	18.08	49.55	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.58	13.34	0.17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.43	8.51	0.05
MgO	2.43	4.10	0.64
SO <sub>3</sub>	2.93	1.70	0.00
K <sub>2</sub> O	0.99	1.99	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.18	3.08	0.00
LOI	4.4	2.74	43.66
<b><i>Fiziksel Özellikler</i></b>			
Özgül Ağırlık	3.09	2.01	2.70
Özgül Yüzey (Blaine) (cm <sup>2</sup> /g)	3030	2420	Belirlenemedi

Bu çalışmada biri kontrol ve 16 tanesi de mineral ve kimyasal katkı içeren toplam 17 adet KYH üretilmiştir. Kontrol karışımı herhangi bir mineral ya da kimyasal katkı olmaksızın sadece çimento, kum ve su içermiştir. Su bağlayıcı oranı (s/b) 0.40 olarak seçilmiş ve toplam bağlayıcı içeriği yapılan ön işlenebilirlik deneyleri sonucunda 650 kg/m<sup>3</sup> olarak sabitlenmiştir. Mineral katkı içeren karışımlarda toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça %15 ve %30’u oranında UK ve/veya KT içeren KYH üretilmiştir. Aynı anda iki mineral katkı içeren üçlü karışımlar (UK+KT+PÇ) da hazırlanmıştır. Karışımların içerikleri isimlerinden anlaşılabilir şekilde tanımlanmışlardır. Örnek olarak “SA1-UK2” karışımı SA1 ve %30 UK değişimi, “SA2-UK1-KT1” karışımı SA2, %15 UK değişimi ve %15 KT değişimi içermektedirken “SA2” karışımı hiç mineral katkı içermeyip sadece kimyasal katkı olarak SA2’yi içermektedir.

Bütün karışımlarda aynı karışım süreci uygulanmıştır. Süreç bütün bağlayıcı maddelerin ve kumun bir dakika boyunca ASTM C 109’de tarif edilen standard karıştırıcıda karıştırılmasıyla başlamıştır. Sonra suyun dörtte üçü eklenmiş ve karıştırma işlemi bir dakika daha devam etmiştir. Daha sonra önceden suyun

kalaniyla karıştırılmış olan kimyasal katkı eklenmiş ve harç üç dakika daha karıştırılmıştır. Çizelge 4’de harçların karışım oranları verilmiştir.

**Çizelge 2. Kimyasal katkıların özellikleri**

Kimyasal Katkı Tipi	Adı	Özgül Ağırlık	pH	Katı Madde (%)	Ana Bileşen
Süper Akışkanlaştırıcı	SA1	1.08	5.7	40	Polikarboksilik eter
	SA2	-	-	100	Melamin formaldehid
Viskozite düzenleyici	VDK1	1.20	5.8	20	Mikroskobik silica
	VDK2	1.20	7.7	-	Hidroksil polimer

**Çizelge 3. İnce agrega gradasyonu**

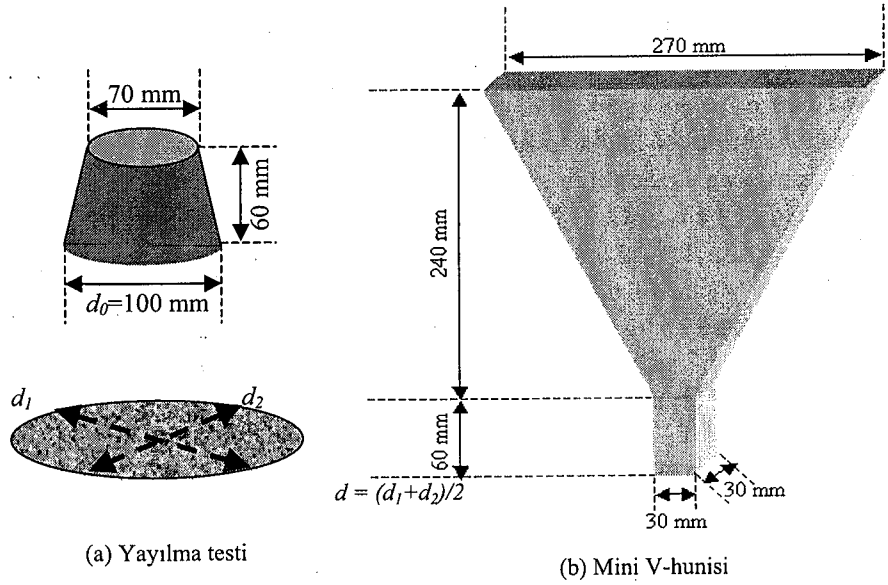
Elek No	Elekten Geçen	
	İnce Agrega	ASTM C-33 Gradasyon Sınırı
3/8" (9.5mm)	100	100
No.4 (4.75mm)	99.73	95-100
No.8 (2.36mm)	88.73	80-100
No.16 (1.18mm)	66.02	50-85
No.30 (600µm)	38.07	25-60
No.50 (300µm)	15.10	10-30
No.100 (150µm)	5.10	2-10

Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, harçların işlenebilirliklerinin tespiti için, yayılma testi ve mini V-hunisi deneyleri yapılmıştır. KYH’lar için yayılma testi EFNARC (European Federation of National Trade Associations) tarafından tarif edilmiştir (Şekil 1). Bu testte üstten kesik huni şeklindeki kalıp düz bir plakanın üzerinde yerleştirilir, harçla doldurulur ve yukarı çekilir. Daha sonra harcın çapı birbirine dik iki yönde ölçülüp bunların ortalaması son çap olarak adlandırılır. Yayılma testi sırasında bütün karışımlarda olası ayrışma ve terleme problemlerinin tespiti için gözle muayene yapılmış hiçbir karışımda ayrışma ve terlemeye rastlanmamıştır. KYH için mini V-hunisi testi de EFNARC tarafından tarif edilmiştir (Şekil 1). Bu testte huni tamamen harçla doldurulur ve alttaki kapak açılarak harcın akmasına izin verilir. Harcın akışı tabandaki kapağın açılmasıyla tepeden bakıldığında tabandan ışığın görülmesi arasında geçen zamandır.

Ayrıca farklı katkı maddelerinin betonun priz süresine etkilerini tespit edebilmek amacıyla tüm karışımların ilk ve son priz süreleri ASTM C 403’e göre ölçülmüştür. Karışımların 28 günlük basınç dayanımının tespiti için sıkıştırma olmaksızın (kontrol karışımı hariç) altı adet 5 cm’lik küpler hazırlanmıştır. Numuneler deney gününe kadar  $21 \pm 2$  °C de ve %95±5 rutubet ortamında bekletilmiştir.

Çizelge 4. KYH üretiminde kullanılan malzeme karışım miktarları

Karışım No	Kullanılan Malzeme Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )								
	PÇ	UK	KT	Kum	Su	SA1	SA2	VDK1	VDK2
Kontrol	650	0	0	1,298	260	0	0	0	0
SA1	650	0	0	1,298	260	9.75	0	0	0
SA1-VDK1	650	0	0	1,298	260	9.75	0	9.75	0
SA1-VDK2	650	0	0	1,298	260	9.75	0	0	1.3
SA1-UK1	550	100	0	1,272	260	9.75	0	0	0
SA1-UK2	450	200	0	1,246	260	9.75	0	0	0
SA1-KT1	550	0	100	1,286	260	9.75	0	0	0
SA1-KT2	450	0	200	1,273	260	9.75	0	0	0
SA1-UK1-KT1	450	100	100	1,260	260	9.75	0	0	0
SA2	650	0	0	1,298	260	0	9.75	0	0
SA2-VDK1	650	0	0	1,298	260	0	9.75	9.75	0
SA2-VDK2	650	0	0	1,298	260	0	9.75	0	1.3
SA2-UK1	550	100	0	1,272	260	0	9.75	0	0
SA2-UK2	450	200	0	1,246	260	0	9.75	0	0
SA2-KT1	550	0	100	1,286	260	0	9.75	0	0
SA2-KT2	450	0	200	1,273	260	0	9.75	0	0
SA2-UK1-KT1	450	100	100	1,260	260	0	9.75	0	0



Şekil 1. KYH'larda işlenebilirlik deneyleri

## DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

### TAZE HARÇLARIN ÖZELLİKLERİ

Çizelge 5’de KYH karışımlarının taze durumdaki ölçülen özellikleri verilmiştir. Bu çizelge ortalama yayılma çapı, mini V-hunisinden akma süresi, ilk ve son priz zamanlarını içermektedir. Parantez içerisindeki değerler ilk ve son priz sürelerinin kontrol karışımına göre % değişimini vermektedir.

Çizelge 5’de görüldüğü üzere kimyasal katkıların kullanılmasıyla harçların ilk priz zamanı kontrol karışımına göre %35 ile %55 arasında uzatılmıştır. Son priz zamanı da görece olarak daha az derecede de olsa uzamıştır. Mineral katkıların dikkate alındığında ise UK kullanımını hem ilk hem de son priz zamanlarını belirgin şekilde artırmıştır. Genel olarak uçucu kül gibi, bütün puzolanların priz zamanını arttırdığı geçmiş çalışmalardan da bilinmektedir.[6]. Böyle belirgin bir gecikmenin nedeni puzolanların inceliği ve içeriğiyle yakından ilgilidir. KT ise ilk ve son priz zamanlarını fazla etkilemese de KT miktarındaki artışın priz zamanlarını azalttığı gözlenmiştir. Üçlü karışımlar (UK+PÇ+KT) incelendiğinde ise UK’ün yanında KT katkısının kullanılması hem ilk hem de son priz zamanlarında UK’lü karışımlara göre belirgin azalmalara neden olmuştur.

Çizelge 5. Taze harçların özellikleri

Karışım No	Çap (santimetre)	Mini V-hunisi (sn)	Priz Süresi (dk)	
			İlk	Son
Kontrol	10.0	Akış olmadı	333 (0)	583 (0)
SA1	23.0	5.0	502 (51)	687 (18)
SA1-VDK1	22.5	3.3	479 (44)	676 (16)
SA1-VDK2	23.0	4.5	475 (43)	667 (14)
SA1-UK1	24.5	4.1	632 (90)	904 (55)
SA1-UK2	26.5	3.2	791 (138)	1052 (80)
SA1-KT1	25.0	3.5	525 (58)	743 (27)
SA1-KT2	26.0	2.7	482 (45)	658 (13)
SA1-UK1-KT1	27.0	1.8	574 (72)	755 (30)
SA2	20.5	4.8	451 (35)	641 (10)
SA2-VDK1	21.5	5.6	487 (46)	646 (11)
SA2-VDK2	20.0	6.8	515 (55)	733 (26)
SA2-UK1	22.5	4.4	653 (96)	895 (54)
SA2-UK2	26.0	2.9	687 (106)	1023 (75)
SA2-KT1	24.5	9.3	467 (40)	703 (21)
SA2-KT2	24.8	4.0	469 (41)	634 (9)
SA2-UK1-KT1	24.5	3.6	565 (70)	841 (44)

Kimyasal ve mineral katkıları içeren KYH'ların akma özellikleri yine Çizelge 5'den görülmektedir. Yalnızca kimyasal katkıları harçlar incelendiğinde, polikarboksilik eter bazlı (SA1) ile melamin formaldehid bazlı (SA2) karşılaştırıldığında, SA1'in daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, her iki VDK'nın da SA1 ile beraber kullanıldığında etkili olduğu ve viskoziteyi düzenleyerek mini V-hunisindeki akışı hızlandırdıkları görülmüştür. Mineral katkıları karışımlar incelendiğinde ise UK ve KT içeren karışımların sadece PÇ ile yapılan KYH'lara göre daha iyi akıcılık ve şekil değiştirebilme özelliği gösterdiği görülebilir. İlave olarak UK ve KT miktarlarının artırılması karışımların işlenebilirliğini artırmıştır. PÇ'si yerine daha hafif mineral katkıları kullanılması karışımdaki toplam hamur hacmini artırarak, agrega tanelerinin ara yüzündeki sürtünmeyi azaltıp işlenebilirliği artırır. Ayrıca UK parçacıklarının küresel şekli ve inceliği işlenebilirlik üzerinde olumlu etkiye sahiptir [8]. Çizelgeden tespit edilen bir başka gözlem ise mini V hunisi testi sonucunda elde edilen süreler göre, KT'nin viskoziteyi olumlu UK'e göre daha fazla etkilediğidir. Harçtaki KT miktarının artırılması sonucunda, KYH'nin mini V-hunisinden boşalma süresinin azaldığı görülmüştür.

### SERTLEŞMİŞ HARÇLARIN ÖZELLİKLERİ

Çizelge 6'da KYH sertleşmiş özellikleri verilmektedir. Sertleşmiş harçlar üzerinde 28 günlük basınç dayanımları ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Bu çizelgeden görüleceği gibi KYH üretiminde mineral katkıları kullanıldığı zaman basınç dayanımlarında düşüş gerçekleşmektedir. Ayrıca mineral katkı miktarı arttıkça dayanımlardaki azalma daha da artmaktadır. UK'nin puzolanik özelliği bilinmektedir. Ancak, UK inceliğinin yetersizliği nedeniyle, UK içeren KYH'ların 28 günlük basınç dayanımlarının kontrol karışımına göre daha düşük olduğu görülmektedir. KT'nin ise karışımlarda dolgu malzemesi ve viskozite düzenleyici mineral katkı olarak kullanılmasından dolayı basınç dayanımına fazla katkısı beklenmemiştir.

*Çizelge 6. Sertleşmiş harçların özellikleri*

Karışım No	Birim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )		Dayanım (MPa)	
	Ortalama	Varyasyon (%)	Ortalama	Varyasyon (%)
Kontrol	2188	1.2	44.4	11.2
SA1	2246	0.6	50.9	13.2
SA1-VDK1	2236	1.3	52.8	2.9
SA1-VDK2	2242	1.1	49.4	6.7
SA1-UK1	2228	0.7	51.5	4.2



SA1-UK2	2195	0.6	34.4	8.4
SA1-KT1	2247	1.5	40.3	1.7
SA1-KT2	2254	0.7	44.8	7.3
SA1-UK1-KT1	2205	1.5	40.1	3.9
SA2	2210	3.9	53.8	6.8
SA2-VDK1	2133	2.0	46.7	1.8
SA2-VDK2	2192	1.5	39.7	10.5
SA2-UK1	2118	0.4	40.7	1.4
SA2-UK2	2132	0.7	38.7	3.4
SA2-KT1	2134	0.9	37.4	12.0
SA2-KT2	2245	2.9	40.9	4.9
SP3-FA1-LP1	2232	1.2	38.0	14.0

## SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmadan elde edilebilecek sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- KYH'nin işlenebilirliği temel olarak kullanılan SA tipine bağlıdır. Bu çalışmada polikarboksilik eter bazlı SA, işlenebilirlik test sonuçlarından görüldüğü üzere daha iyi sonuçlar vermiştir.
- Mineral katkıların kullanılması KYH'ların işlenebilirlik özelliklerini iyileştirmiştir. UK ve KT kullanımının harçların işlenebilirlik özelliklerinin iyileştirilmesinde VDK'lara iyi birer alternatif olabileceklerini göstermişlerdir.
- Mineral katkıların kimyasal katkılara karşı bir dezavantajı çimentonun bir kısmı mineral katkıyla değiştirildiğinde ortaya çıkan dayanım kaybıdır.
- Bir mineral katkının bazı olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için başka bir mineral katkı birlikte üçlü karışım oluşturacak şekilde eklenebilir. Bu çalışmada UK-KT karışımları priz zamanlarını belirgin şekilde iyileştirdiği gözlemlenmiştir.
- KYH'ların işlenebilirliğinin iyileştirilmesinde mineral katkıların inceliği tek parametre değildir. Mineral katkılardaki pürüzsüz yüzey özellikleri ve parçacıkların küresel şekilleri de KYH karışımlarının işlenebilirlik özelliklerinin iyileştirilmesinde önemlidir.

---

## KAYNAKLAR

1. Ozawa K., and Maekawa, K., "Development of high performance concrete based on durability design of concrete structure", *Proceeding of the Second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2)*, Vol.1, pp. 445-450, January 1989.
2. Okamura, H., and Ozawa, K., "Mix-design for self-compacting concrete", *Concrete Library, JSCE*, Vol no. 25, pp.107-120, June 1995.
3. Lachemi, M., Hossaina, K.M.A., Lambrosa V., Nkinamubanzib, P., and Bouzoubaa, N., "Performance of new viscoelastic modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste", *Cem Concr Res* 34 (2004) pp. 185–193.
4. Domone, P.L. and Jin, J., "Properties of mortar for self-compacting concrete", *Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp. 109-120, Stockholm, September 1999.
5. EFNARC (European Federation of National Trade Associations), *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, EFNARC Association, UK, February 2002.
6. Erdoğan, T.Y., *Admixture for Concrete*, METU Press, Ankara, Turkey, 1997.
7. A. Bilodeau, V. M. Malhotra, "High-volume fly ash system: Concrete solution for sustainable development", *ACI Mater. J.* 97 (2000), pp. 41–48.
8. S. Wei, Y. Handong, Z. Binggen, "Analysis of mechanism on water-reducing effect of fine ground slag, high-calcium fly ash, and low-calcium fly ash", *Cem. Concr. Res.* 33 (2003), pp. 1119–1125