



TOZ KATKI TİPİNİN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN KIRILGANLIĞINA ETKİSİ

Kürşat Esat ALYAMAÇ* ve Ragıp İNCE†
Fırat Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ

ÖZET

Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB), sık donatılı dar ve derin kesitlere kendi ağırlığı ile yerleşen, herhangi bir vibrasyona gerek kalmadan sıkışan, dayanım veya dayanıklılık özellikleri ve performansları yüksek, çok akıcı kıvamlı özel bir beton türüdür. Bu özel beton türünün kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır. KYB'yi geleneksel betondan ayıran en önemli tasarım özelliği, karışımda kullanılan toz katkılarıdır. Toz katkıları süper akışkanlaştırıcı katkıları yardımıyla betonun taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri üzerine olumlu etkilerde bulunurlar. Bu çalışmada, silis dumanı gibi gerilme yığılmasını (SD), uçucu kül (UK) ve mermer tozu (MT) olmak üzere üç tip toz katkı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan karışımların toz katkı tipleri hariç tasarım özellikleri aynıdır. Geleneksel betonda dayanım arttıkça beton gevrek bir özellik göstermektedir. Yani betonun kırılma dayanımı arttıkça artmaktadır. KYB'de ise toz katkı tipinin betonun kırılma dayanımına nasıl etki edeceği merak edilmiştir. Bu özelliğin belirlenmesi için Boyut Etkisi Kanunu (BEK) kullanıldı. Beton basınç dayanımının belirlenmesi için standart küp numuneler ve boyut etkisi kanununun uygulanabilmesi için farklı boyutlarda giriş numuneler kullanıldı. Sonuç olarak, silis dumanı ve uçucu kül kullanılan betonların, mermer tozu kullanılan ve referans betona oranla daha sünek davrandığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kendiliğinden yerleşen beton, Boyut etkisi kanunu, Silis dumanı, Uçucu kül, Mermer tozu

GİRİŞ

Beton yüzyılı aşkın süredir tüm dünyada yapı malzemesi olarak kullanılmakta ve her geçen gün kullanım alanları artmakta ve yaygınlaşmaktadır. Portland çimentosunun imal edilmesiyle inşaat hayatına başlayan beton sektörü her geçen gün gelişmektedir. Kullanım alanı veya kullanılan yapıya göre betondan farklı performanslar beklenmektedir. Bu beklentiler ancak özel betonlarla karşılanabilmektedir.

Özel betonlar, farklı ihtiyaçlardan dolayı farklı yöntemlerle üretilirler. Özel beton çeşitlerini ihtiyaca göre artırmak teknolojinin de desteğiyle mümkündür. Bu çalışmada, günümüzde en çok kullanılan özel beton çeşitlerinden olan Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) konusu incelenmiştir.

Mühendislik yapılarında kullanılacak olan malzemelerin özelliklerini çok iyi bilmek gerekir. Bu özelliklerin en önemlilerinden biri de mekanik mukavemettir. Malzemelerin dayanımı, kullanıldıkları yapı birimi için yeterli olmalıdır. Özellikle sismik yüklemelere maruz beton/betonarme yapılarda göçme meydana gelmeden taşıyıcı sistemlerde yerleşen çatlak veya çatlaklar oluşabilen ve malzeme yumuşama adı verilen dayanım kaybına uğrayabilmektedir. Çatlamış bir yapı, ancak Kırılma Mekanizması Prensipleri kullanılarak gerçekçi bir şekilde analiz edilebilir. Kırılma Mekanizması

* Y.Doç.Dr., İnşaat Müh. Böl., E-posta: kealyamac@firat.edu.tr

† Doç.Dr., İnşaat Müh. Böl., E-posta: rince@firat.edu.tr

Bilimi malzemede varolan çentik, çatlak ve boşluk artıran kusurları ve bunlara bağlı olarak meydana gelen hasarları inceler. Betondaki malzemelerin ve özelliklerinin kırılma mekaniği üzerine ayrı ayrı etkisi olduğu bilinmektedir [1]. Bu çalışmada üretilen KYB'ler, kırılma mekaniği metodlarından Boyut Etkisi Kanunu kullanılarak analiz edilmiştir [2].

Sonuç olarak, kendiliğinden yerleşen betonlarda kırılma parametrelerinin sadece dayanıma değil toz katkı tipine de bağlı olduğu görülmüştür. Hatta toz katkı tipinin malzemenin kırılma özelliği üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında taze beton özellikleri ile kırılma arasında da paralel ilişki olduğu gözlenmiştir.

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON (KYB)

Kendiliğinden Yerleşen Beton, sık donatılı dar ve derin kesitlere kendi ağırlığı ile yerleşen, herhangi bir vibrasyona gerek kalmadan sıkışan, dayanım veya dayanıklılık özellikleri ve performansları yüksek, çok akıcı kıvamlı özel bir beton türüdür.

KYB karışımının normal betondan en büyük farkı, toz katkıları ve süper akışkanlaştırıcı (SA) kimyasal katkıları kullanılmasıdır. Kullanılan bu malzemelerle, taze betona kendiliğinden yerleşebilirlik, sertleşmiş betona ise yüksek performans özellikleri kazandırılmaya çalışılır [3]. Normal beton (geleneksel beton) ile KYB'nin karışım oranları bakımından karşılaştırılması Şekil 1 de görülmektedir. Karışım oranları ülke ve bölge farklılıkları gösterebilmektedir. Bu farklılığın nedeni ise kullanılan toz malzeme ve agrega tipi olarak ifade edilebilir.

Geleneksel (normal) betondan farklı olarak taze haldeki KYB'den; akıcılık, geçiş kabiliyeti (sık donatılı dar kesitlerden), doldurma kabiliyeti ve ayrışma direnci özellikleri beklenmektedir.



Şekil 1: Kendiliğinden Yerleşen Beton Karışım Kompozisyonu

BETON VE BETONARME YAPILARDA BOYUT ETKİSİ

Aynı geometriye sahip beton numuneler üzerinde yapılan bir çok deneysel araştırma, numune boyutunun artması ile nominal dayanımın azaldığını ortaya koymuştur. Bu olay, beton ve betonarmenin kırılma mekaniğinde boyut etkisi olarak adlandırılır ve günümüz tasarım şartnamelerinin büyük ölçüde faydalandığı, elastisite ve plastisite gibi klasik sürekli mekanik teoriler ile açıklanamaz.

Griffith, boyutları mikron mertebesinde olan cam lifler üzerinde yapmış olduğu deneylerde, cam liflerin mukavemetinin yaklaşık olarak elastisite modülünün % 10 u civarında olduğunu tespit etmiştir [4]. Ancak normal boyutlardaki cam levhalar için dayanımın böyle olmadığını gören Griffith, aradaki farkın cam levhalar üzerindeki çentik uçlarındaki gerilme yığılmalarından kaynaklandığını gözlemlemiştir. Daha sonra Weibull hiçbir malzemenin kusursuz olamayacağı görüşünden hareket

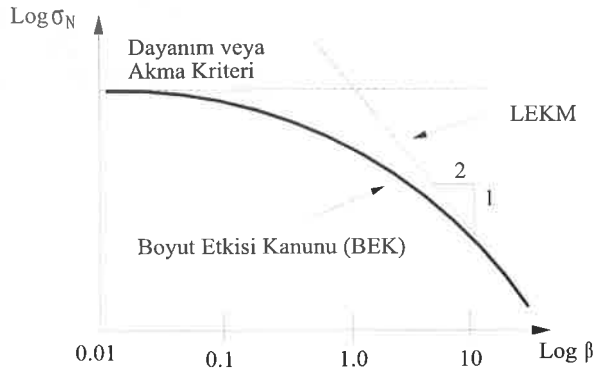
ederek, "en zayıf bağ" kavramına dayanan istatistiksel tabanlı ilk boyut etkisi teorisini geliştirmiştir. Ancak Weibull'ın teorisi 1980 li yıllara kadar her türlü mühendislik sistemlerinin tasarımında emniyet faktörünü tayin etmek amacıyla yaygın olarak kullanılmakla birlikte, yapılan deneysel çalışmalar teorisinin, beton gibi yarı-gevrek malzemelere tam olarak uymadığını ortaya koymuştur [5-7]. Bu amaçla betonun mekanik davranışına uygun deterministik boyut etkisi yaklaşımları geliştirilmiştir [8-9].

Bazant, pik yükte çatlakın ilerlemesi sonucu serbest kalan şekil değiştirme enerjisi ile çatlama beton yüzey tarafından absorbe edilen enerji arasındaki basit denge bağıntısını boyut analizi yardımı ile kurarak kendi adı ile anılan, Boyut Etkisi Kanununu (BEK) geliştirmiştir. Lineer olmayan kırılma mekaniğinin temeli olarak kabul edilen kanun, aynı geometriye sahip benzer numunelerde, nominal dayanım (σ_N) ile karakteristik boyut (d) arasındaki ilişkiyi,

$$\sigma_N = Bf'_t (1 + \beta)^{-1/2} \quad , \quad \beta = \frac{d}{d_0} \quad (1)$$

şeklinde tanımlamaktadır. Burada f'_t , betonun çekme dayanımı ve B, d_0 ampirik sabitlerdir. Bu ampirik sabitler, İfade (1) üzerine yapılan bir dizi dönüşümden sonra en küçük kareler yönteminin uygulanması ile bulunabilir [10].

İfade (1) de, β gevreklik sayısı olup kırılmanın şeklini belirler. Şekil 2 de görüldüğü gibi, $\beta < 0.1$ olduğu değerlerde, σ_N sabit bir değere asimptot olur. Bu durumda dayanım kriteri geçerli olur ve malzemede sünek kırılma gözlemlenir. Numune boyutunun çok büyük olduğunda ($\beta > 10$) nominal dayanım, $d^{-1/2}$ ile orantılıdır. Bu durumda Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) kriteri geçerli olur ve malzeme gevrek tarzda kırılır. Bununla beraber uygulamadaki mühendislik yapıları, bu iki limit durum arasında kalmaktadır. BEK, dayanım kriteri ile LEKM arasında bir geçiş eğrisini temsil etmektedir ($0.1 \leq \beta \leq 10$).



Şekil 2: Yarı-Gevrek Malzemeler İçin Boyut Etkisi Kanunu (BEK)

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ANALİZ

Deneysel çalışmalarda, Elaziğ Çimento Fabrikası'ndan alınan CEM I 42.5 N tipi çimento kullanılmıştır. En büyük agrega çapı ($d_{\text{enbüyük}}$) 16 mm olan, Elaziğ İli Palu İlçesi Yöresine ait nehir agregası kullanılmıştır.

Karışımlarda, 3. nesil süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı, karışım suyuna eklenerek kullanılmıştır. Kimyasal katkı miktarı, üretici tavsiyesi ve deneme karışımları sonucu çimento miktarının %2'si olarak belirlenmiştir.

Mineral katkı olarak deneylerde kullanılan silis dumanı (SD) Antalya Eti Elektrometalürji A.Ş. Tesisleri'nden, uçucu kül (UK) Tunçbilek Termik Santrali'nden, mermer tozu (MT) ise Elazığ Bayraklar Mermer A.Ş.'den temin edilmiştir. Silis dumanı, uçucu kül ve mermer tozunun genel özellikleri Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1: Toz Katkıların Genel Özellikleri

Özellikler	Silis Dumanı	Uçucu Kül	Mermer Tozu
SiO ₂ (%)	91	58.82	9.45
Al ₂ O ₃ (%)	0.58	19.65	-
Fe ₂ O ₃ (%)	0.24	10.67	3.23
CaO (%)	0.71	2.18	-
MgO (%)	0.33	3.92	-
SO ₃ (%)	-	0.48	-
CaCO ₃ (%)	-	-	86.35
Kızdırma kaybı (%)	1.84	0.91	-
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2.04	2.25	2.71
Özgül Yüzey (cm ² /g)	-	3812	4467
45µm geçen	%98 < 45µm	-	-

Deneylerde kullanılan karışım oranları, mutlak hacim yöntemi kullanılarak ve EFNARC 2005 standardı kuralları dikkate alınarak hazırlandı. Bu çalışmada, çimento miktarları 350 kg/m³ olarak seçildi. Bunların karışım oranları Tablo 2 de verildi. Karışım oranları, deneme karışımları yardımıyla belirlendi. Silis dumanının çok ince taneli olmasından dolayı karışımın su ihtiyacı, uçucu kül ve mermer tozu kullanılan karışımlara oranla daha yüksek olmaktadır.

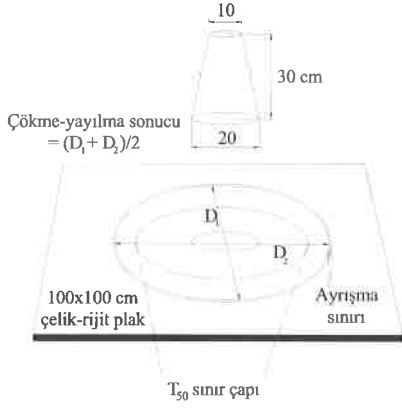
Tablo 2 Beton karışım oranları

Seri Adı	C (kg/m ³)	Toz (kg/m ³)	Toz (%)	C+T	Katkı (%)	W/C	W/ (C+T)	Çakıl (kg/m ³)	Kum (kg/m ³)
SD	350	100	22	450	2	0.60	0.47	785	785
UK	350	100	22	450	2	0.60	0.47	792	792
MT	350	100	22	450	2	0.60	0.47	802	802
REF	350	0	22	450	2	0.60	0.60	825	825

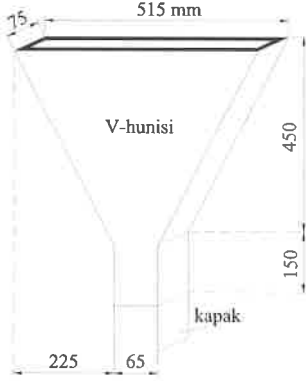
Her seri karışım, 3 adet 50×50×150 mm çentikli kiriş, 3 adet 50×100×300 mm çentikli kiriş, 3 adet 50×200×600 mm çentikli kiriş, 3 adet 50×400×1200 mm çentikli kiriş (bxdxL) çentikli kiriş (a:çentik derinliği) ve 3 adet standart 150×150×150 mm küp numuneden oluştu (Şekil 3). Taze betonun, doldurma kabiliyetini ölçmek amacıyla çökme-yayıma (T50) (Şekil 4) ve V-hunisi deneyi (Tv) (Şekil 5), geçiş kabiliyetini ölçmek amacıyla L-kutusu deneyi (h1/h2) (Şekil 6) ve ayrıca ayrışma direnci deneyleri (SG) yapılmıştır.



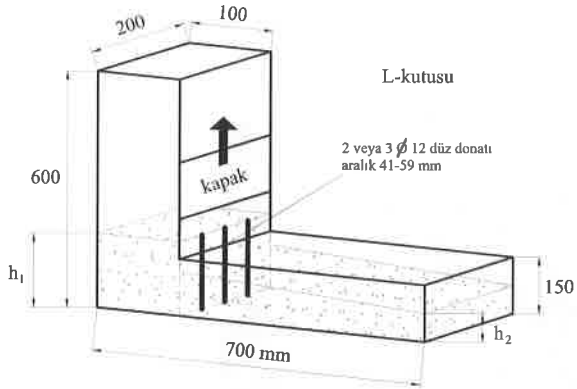
Şekil 3: SD Serisinin Boyut Etkisi Numuneleri



Şekil 4: Çökme Yayılma Deneyi



Şekil 5: V-Hunisi Deneyi



Şekil 6: L-Kutusu Deneyi

Tablo 3 de verilen EFNARC 2005 limitleri dikkate alınmıştır. Tablo 4 de ise KYB'lerin deney sonuçları verilmiştir. REF serisi referans betonunu ifade etmektedir ve bu seri normal beton olarak üretildi.

Tablo 3: Kendiliğinden Yerleşen Taze Beton Kullanışlı Deney Limit Sınırları

Sınıf	Yayılma çapı d (cm)	Yayılma süresi T_{50} (s)	V-hunisi T_v (s)	L-kutusu (%)	Segregason SG (%)
1	55-65	≤ 2	≤ 8	≥ 0.8	≤ 20
2	66-75	> 2	9-25	≥ 0.8	≤ 15
3	76-85	-	-	-	-

Tablo 4: KYB'lerin Taze ve Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

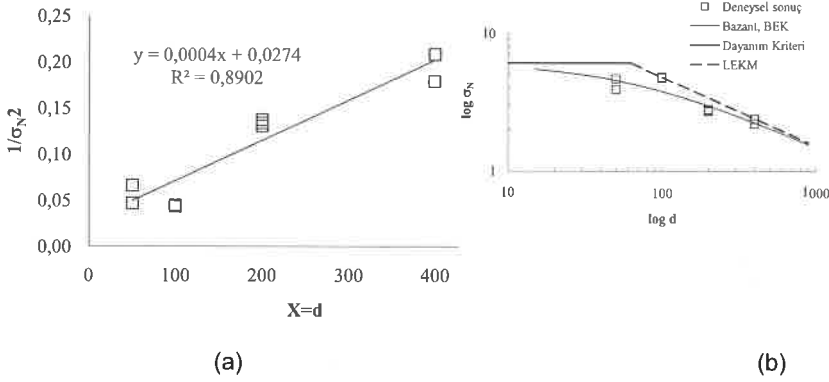
Seri Adı	T_{50} (s)	Yayılma (cm)	SG (%)	h_1/h_2 (%)	T_v (s)	f_c (MPa)	R
SD	1.0	56	0	0.87	2.6	54.1	47
UK	1.3	66	10	0.88	4.8	46.3	46
MT	1.6	66	7	0.92	6.2	45.3	45
REF	-	[13-15]	-	-	-	36.4	42

Bu çalışmada, boyut etkisi numuneleri, laboratuvar imkânları ve ACI 446'da açıklanan kiriş numunelerdeki sürtünme etkisinin daha küçük olması durumu dikkate alınarak, $s/d = 2.5$ (s: mesnet açıklığı) olan kiriş numuneler olarak seçildi [11]. Bu çalışmada sadece $d_{enbüyük} = 16$ mm KYB ile boyut etkisi numuneleri oluşturulmuştur. Numuneler hazırlanırken boyut değişim aralığı 1:8 esas alınmış, relatif çentik boyu $\alpha = 0.2$ olarak seçilmiş ve tüm çalışmalarda olduğu gibi çentik önceden yerleştirilmiştir. Boyut etkisi numunelerinin kırılma yükleri Tablo 5 de verilmiştir.

Tablo 5: Boyut Etkisi Numuneleri Kırılma Yükleri ve Geometrik Özellikleri

Seri Adı	a (mm)	b (mm)	d (mm)	L (mm)	P_u^1 (kN)	P_u^2 (kN)	P_u^3 (kN)
SD	10	50	50	150	3100	-	2600
	20	50	100	300	-	6400	6300
	40	50	200	600	7200	7300	7400
	80	50	400	1200	-	11700	12600
UK	10	50	50	150	3200	3200	3000
	20	50	100	300	5700	6000	5600
	40	50	200	600	6800	6900	7900
	80	50	400	1200	-	10600	10600
MT	10	50	50	150	3600	3300	3700
	20	50	100	300	4400	4500	4900
	40	50	200	600	6900	7000	7100
	80	50	400	1200	9600	9800	9800
REF	10	50	50	150	2800	2400	2800
	20	50	100	300	4400	4000	4200
	40	50	200	600	7000	7300	-
	80	50	400	1200	9300	9100	9500

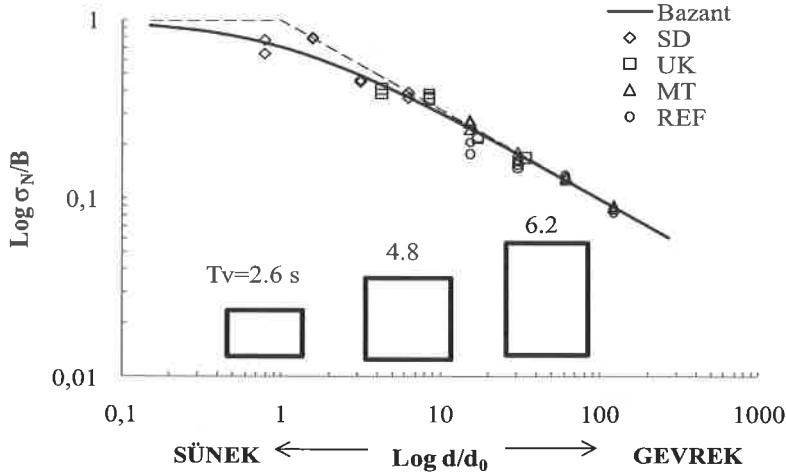
Bazant'ın Boyut Etkisi Kanunu (BEK) kullanılarak, deney sonuçları analiz edilmiştir. Silis dumanı (SD) kullanılarak oluşturulan deney serilerinin analiz sonucu Şekil 7 de örnek olarak verilmiştir. Deney sonuçlarının tamamı kullanılarak tek bir boyut etkisi grafiği elde edilerek farklı toz katkılarına sahip KYB'lerin kırılma özellikleri incelenmiştir (Şekil 8).



Şekil 7: SD Deney Serisinin Grafikleri a) Lineerizasyon b) BEK'in Uygulanışı

Herhangi bir beton numunenin kırılma özellikleri incelenirken genellikle sertleşmiş beton özellikleri dikkate alınır. Bu çalışmada kırılma özelliği ile hem sertleşmiş hem de taze beton özellikleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Sonuç olarak, kırılma ile sertleşmiş beton arasında yakın bir ilişki olduğu gibi kırılma ile taze beton özellikleri arasında da yakın ilişki olduğu görülmüştür. V-hunisi akış süresi arttıkça betonun daha gevrek davranması tüm seriler için geçerlidir.

Kendiliğinden yerleşen sünek bir beton elde edilmek istenirse, uçucu kül veya silis dumanının toz katkı olarak kullanılması ve v-hunisi akış süresinin kısa olacak şekilde beton karışımının ayarlanması yerinde bir yaklaşım olacaktır.



Şekil 8: KYB'lerde Toz katkı-Tv-Kırılma İlişkisi

SONUÇLAR

Beton üretimi yapılacak bölge koşulları, kendiliğinden yerleşen beton içerisinde kullanılacak toz katkı tipini belirlemede etkin rol oynamaktadır. Toz katkı tipindeki çeşitlilik doğal olarak üretilen betonun özelliklerine de yansımaktadır. Bu çalışma, üretilecek betonların kırılma özelliklerinin önceden tahmin edilmesinde bir referans noktası olabilmesi açısından önemlidir.

Yapılan analizler sonucunda toz katkı, v-hunisi geçiş süresi ve kırılma ilişkisinden de görülmüştür ki, SD ve UK katkılı betonlar sünek, mermer tozu katkılı ve referans betonlar gevrek davranmaktadır. Öyle ise sünek beton isteniyorsa mümkün olduğunca silis dumanı veya uçucu kül kullanılmaya çalışılmalıdır.

Sertleşmiş beton özelliği olan kırılma ile taze beton özelliği olan v-hunisi geçiş süresi arasında belirgin bir ilişki yani, sünek davranışta Tv 'nin küçük, gevrek davranışta Tv 'nin büyük değerler aldığı tespit edilmiştir. Aynı toz katkıyı kullanarak, farklı kırılma özelliklerine sahip betonlar elde etmek mümkündür. Bunun için taze beton özelliklerinin değiştirilmesi yeterli olacaktır.

Sonuç olarak, toz katkı tipini dikkate almadan, sadece sertleşmiş beton özelliği ile KYB'lerin kırılma özelliklerini ifade etmek yeterince doğru olmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] İnce, R. and K. E. Alyamaç, *Determination of fracture parameters of concrete based on water-cement ratio*, Indian J of. Engng.& Mater. Sci., 15(1), 14-22, 2008.
- [2] Alyamaç, K. E., *Kendiliğinden Yerleşen Betonların Lineer Olmayan Kırılma Mekanikliği Prensipleriyle İncelenmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2008.
- [3] Alyamaç, K. E. and İnce, R., *A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders*, Construction and Building Materials, Vol. 23, pp. 1201-1210, 2009.
- [4] Griffith, A. A. *The phenomena of rupture and flow in solids*, Phil. Trans. Roy. Soc. London A221,163-198, 1920.
- [5] Weibull, W. *A Statistical Theory of the Strength of Materials*, Royal Swedish Inst. for Engng. Res, Stockholm, 1939.
- [6] Bazant, Z. P. and Xi, Y., *Statistical size effect in concrete structures: nonlocal theory*, Report No. 89-12/B623s, Center For Advanced Cement-Based Materials, Northwestern University, Evanston, IL, 1990.
- [7] Bazant, Z. P., *Size effect*, Int. Journal of Solids and Structures, 37, 69-80, 2000.
- [8] Bazant, Z. P. *Size effect in blunt fracture: concrete, rock and metal*, ASCE J. Engng. Mech, 110, 518-535, 1984.
- [9] Kim, J. K. and Eo, S. H., *Size effect in concrete specimens with dissimilar initial cracks*, Magazine of Concrete Res., 42, 233-238, 1990.
- [10] Bazant, Z. P. and Pheppier, P. A., *Determination of fracture energy properties from size effect and brittleness number*, ACI Mater. J., 84, 463-480, 1987.
- [11] ACI-446.1R, *Fracture mechanics of concrete: concepts, models, and determination of material properties*, Detroit, 1990.