



BETONUN KIRILMA PARAMETRELERİ İLE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİ

Ragıp İnce ve A. Tefvik Bildik

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ

ABSTRACT

Beton bir yapıyı kırılma mekaniğine göre analiz edebilmek için, önce kullanılan malzemenin kırılma parametrelerinin belirlenmesi gerekir. Betonun kırılma parametrelerini belirlemek için şartnameler ve araştırmacılar tarafından birçok lineer olmayan kırılma mekaniği modelleri önerilmektedir. Bu modeller kohezif ve eşdeğer elastik çatlak yaklaşımları olarak sınıflandırılmaktadır. Betonun kırılma mekaniğinde kiriş numuneler yaygın olarak kullanılmakla birlikte, küp ve silindir numuneler taşınabilirlik, hafiflik ve boyut etkisi çalışmalarında kolaylık sağlaması açısından bazı avantajlara sahiptir. Bu çalışmada farklı doz ve su/çimento oranları kullanılarak hazırlanan küp numuneler üzerinde kama-yarma deneyi yapılarak İki Parametrelili Kırılma Modeline göre betonun kırılma parametreleri tayin edilmiştir. Ayrıca aynı karışımlardan 150 mm lik küp numuneler üzerinde basınç ve yarma-çekme deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak betonun kırılma parametreleri ile basınç ve yarma-çekme mukavemetleri arasında bazı regresyon bağıntıları türetilmiştir.

ÖZET

To analyze a concrete structure according to the fracture mechanics, its fracture parameters are needed to be determined at first. Many non-linear fracture models have been proposed by design codes and investigators to determine fracture parameters of concrete. These models can be classified as the cohesive crack models and the effective crack models. Although the notched beam specimens have been commonly used in concrete fracture, there have been some advantages of the cubical/cylindrical specimens such as compactness and lightness. In this study, the wedge-splitting tests on cube specimens with different cement contents and water/cement ratios were performed for fracture models based on the two-parameter fracture model. In addition, the compressive strength values and the splitting strength values on cubes with 150 mm of these mixes were determined. Consequently, some relationships based on regression between the fracture parameters and the strength properties of concrete were derived. The results of the split-cube tests look viable and very promising.

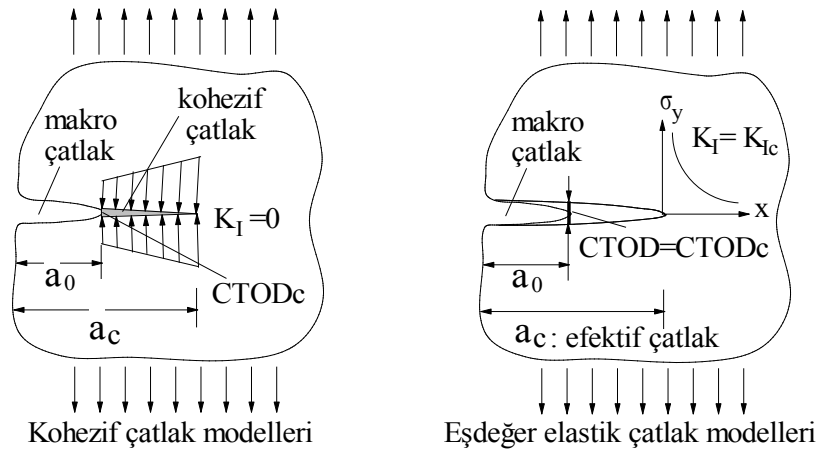
GİRİŞ

Beton ve betonarme yapıların göçme analizi için birçok lineer ve lineer olmayan yaklaşımlar kullanılmaktadır. Ancak özellikle sismik yüklemelere maruz beton/betonarme yapılarda göçme meydana gelmeden taşıyıcı sistemlerde yerleşen çatlak veya çatlaklar oluşabilmekte ve malzeme yumuşama adı verilen mukavemet kaybına uğrayabilmektedir. Çatlamış bir yapı, ancak kırılma mekaniği prensipleri kullanılarak gerçekçi bir şekilde analiz edilebilir.

Kırılma mekaniği temelde, malzemede var olan çentik, çatlak ve boşluk gibi gerilme yoğunluğunu arttıran kusurları ve bunlara bağlı olarak meydana gelen hasarları inceler. İlk olarak Griffith [1] tarafından temeli atılan Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) teorisi, 1960'lı yılların başında Kaplan [2] tarafından betona uygulanmıştır. Ancak daha sonra yapılan deneysel çalışmalar, LEKM kanunlarının beton için yetersiz olduğunu göstermiştir [3]. Bu amaçla birçok araştırmacı tarafından teknolojik ve nümerik alanlardaki gelişmelere paralel olarak, lineer olmayan kırılma mekaniği yaklaşımları geliştirilmiştir [4-9].

Bu yaklaşımlar temelde, çatlamış bir beton kesitte gerilme transferini mümkün kılan, kırılma süreci bölgesinin varlığını dikkate alırlar. Yapı şartnameleri ve LEKM tarafından ihmal edilen bu bölge, metallerde plastik bölgenin yanında çok küçük olmasına rağmen, betonda 100 mm'nin üzerinde değerler alarak büyük yer işgal eder [4]. Diğer taraftan bu bölgedeki gerilmeler, metallerdeki plastik bölgeden farklı olarak sabit kalmayıp azalmaktadır (Şekil 1). Bu davranışı karakterize etmek için LEKM'nin aksine lineer olmayan kırılma mekaniği yaklaşımları betonu modellemek için en az iki parametre kullanırlar.

Betonun kırılma modelleri kohezif çatlak modelleri (Fiktif Çatlak Modeli [4], Çatlak Bant Modeli [5]) ve eşdeğer elastik çatlak yaklaşımları (İki Parametrelili Model [6], Efektif Çatlak Modeli [7], Boyut Etkisi Modeli [8] ve Çift-K Modeli [9]) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü gibi, kohezif çatlak yaklaşımları, kırılma süreci bölgesini çatlak ucunda azalan ve çatlığa basınç yapan bir gerilme bloğu ile modellerken, eşdeğer elastik çatlak yaklaşımları efektif bir çatlak uzunluğu kullanarak modellemektedir.



Şekil 1. Betonda kullanılan lineer olmayan modeller

Betonun kırılma mekaniğinde yaygın olarak kiriş numuneler kullanılmakla birlikte son zamanlarda taşınabilirlik ve hafiflik özelliklerinden dolayı küp ve silindir numunelerin kullanımı da artmıştır. Bu çalışmada, farklı beton karışımları için betonun kırılma parametreleri kama-yarma deneyi kullanılarak, betonun kırılma mekaniğinde popüler bir metot olan İki Parametrelili Model'e göre elde edilmiştir. Ardından kırılma parametreleri ile betonun basınç ve yarmada-çekme mukavemetleri arasında bazı formüller elde edilmiştir.

BETONUN KIRILMA MEKANİĞİNDE KAMA YARMA NUMUNELERİ

Beton bir yapıyı kırılma mekaniğine göre analiz edebilmek için ilk önce kullanılan malzemenin kırılma parametrelerinin belirlenmesi gerekir. Betonun kırılma parametrelerinin tayininde yaygın olarak çentikli üç noktalı eğilme numuneleri kullanılmaktadır. Bunun en önemli sebebi kirişlerin metallerde standart deney numunesi olarak yaygın kullanımıdır. Bununla birlikte son zamanlarda yarma tipi numunelerin betonun kırılma malzeme

parametrelerinin tayininde kullanılması üzerine birçok çalışma yapılmıştır [10-17]. Kompakt numunelerin, hafiflik ve kırılma parametrelerinin hesabında numune ağırlığının ihmal edilebilecek seviyede olması gibi bazı avantajları vardır:

Betonun kırılma mekaniğinde, küp ve silindir numuneler üzerine yapılan deneyler: 1) Kama-Yarma ve 2) Yarmada-çekme olmak üzere iki kategoride incelenmektedir. Kama-Yarma deneyleri ilk olarak kohezif çatlak modelleri için geliştirilmiş olmakla birlikte, efektif çatlak yaklaşımlarında uygulanması da mümkün olabilmektedir. Yarmada-çekme numuneleri ise, temelde betonun çekme dayanımının indirekt olarak tayininde kullanılmıştır. Bununla birlikte 20 yılı aşkın bir sürede yarmada-çekme numuneleri betonun kırılma mekaniğinde kullanılmaktadır [12-17].

Kama-yarma numunelerinin ilk çıkış noktası metallerin kırılma parametrelerinin tayininde kullanılan standart kompakt-çekme numunesidir (Şekil 2a). Daha sonra Hillemeier ve Hilsdorf [18] tarafından beton numunelerde kullanılabilecek ve daha stabil olan kama-yarma numuneleri geliştirilmiştir. Burada numune üzerine açılan iki delik içinden geçirilen iki yatak üzerine monte edilen rulmanlar sayesinde yükleme yapılmıyordu. Günümüzde betonun kırılma mekaniğinde çok popüler olan kama-yarma numuneleri Brühwiler ve Wittmann [11] tarafından Şekil 3'te detaylandırıldığı gibi üç noktalı eğilme numunelerinin kompakt şekli olarak geliştirilmiştir. Bu tip numunelerin lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) bağıntıları aşağıda tanımlandığı gibi kompakt çekme numuneleri ile aynı alınmaktadır.

Kama-yarma numunelerinde gerilme şiddet çarpanı aşağıda tanımlanan denklemle belirlenebilir :

$$K_I = \frac{P_H}{b\sqrt{d}} \frac{(2 + \alpha)(0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)}{(1 - \alpha)^{3/2}} \quad (1)$$

Burada Şekil 3 de belirtildiği gibi b numune genişliği, d numune boyutu ve $\alpha=a/d$ relatif çatlak boyudur. P_H kamaya gelen yatay kuvvet bileşeni Şekil 3d den aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$P_H = \frac{1 - \mu \tan \theta}{2(\mu + \tan \theta)} P_V \approx \frac{P_V}{2 \tan \theta} \quad (2)$$

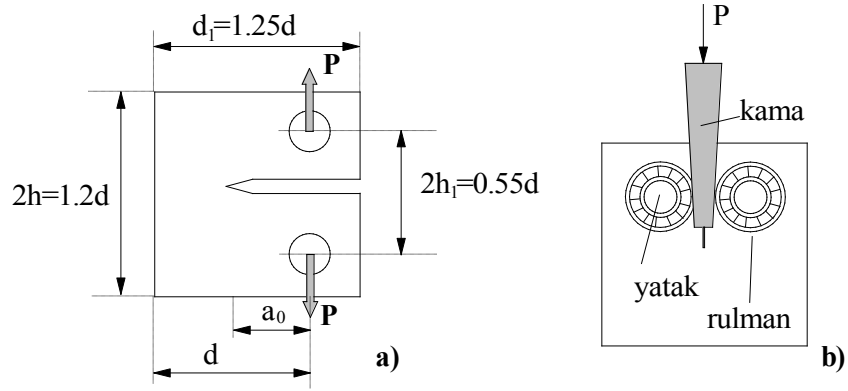
Burada P_V numuneye uygulanan düşey yük, μ rulman ile kama arasındaki sürtünme katsayısı ve θ kama açısıdır. $\theta=15^\circ$ için sürtünme etkileri ihmal edilebileceğinden yaklaşık ifade kullanılabilir. Kırılma parametrelerinin hesabında kullanılan diğer önemli büyüklük çatlak ağzı açılımı deplasmanı değeridir. Kama-yarma numuneleri için bu değer aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$CMOD = \frac{P}{bE'} \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^2 (2.163 + 12.219\alpha - 20.065\alpha^2 - 0.992\alpha^3 + 20.609\alpha^4 - 9.9314\alpha^5) \quad (3)$$

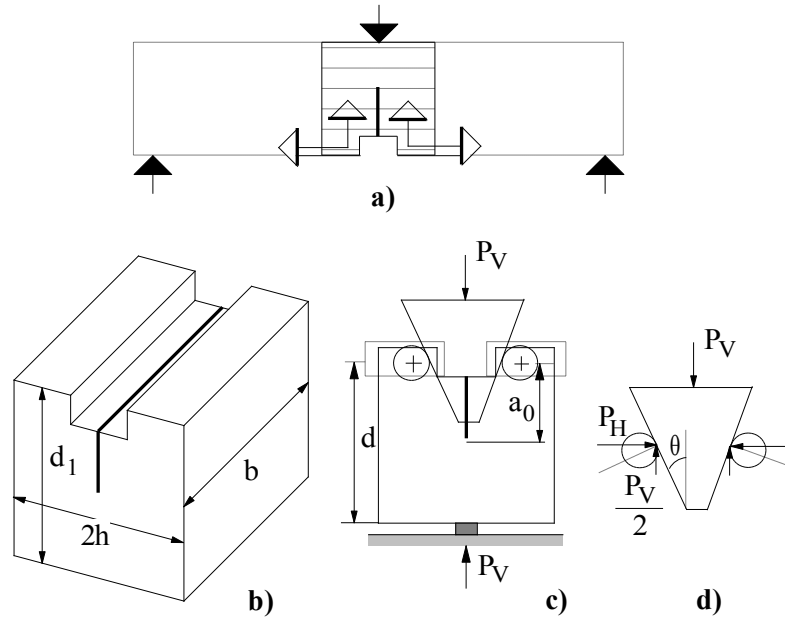
Burada E' malzemenin elastisite modülüdür. Diğer önemli LEKM bağıntısı çatlak ucu açılımı değeri kiriş numunelere benzer olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\frac{COD(y)}{CMOD} = \sqrt{\left(1 - \frac{y}{a}\right)^2 + (1.081 - 1.149\alpha) \left[\frac{y}{a} - \left(\frac{y}{a}\right)^2 \right]} \quad (4)$$

Burada y değeri, açılım değerinin hesaplandığı nokta ile numunenin geometrik merkezi arasındaki düşey mesafedir.



Şekil 2. a) Standart kompakt-çekme numunesi b) Kama-yarma deneyi



Şekil 3. Kama-yarma deneyi a) Kompakt bir kiriş numunesi olarak kama-yarma numunesi b) Numune detayı c) Yükleme d) Kama kuvvetleri

DENEYSEL ÇALIŞMA

Betonun kırılma mekaniği üzerine yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, kırılma parametreleri üzerinde basınç mukavemeti, su/çimento oranı, maksimum agrega çapı ve agrega tipinin etkili olduğu tespit edilmiştir [19-21]. Bu çalışmada 150 mm.'lik küplerden oluşturulan kama-yarma numuneleri farklı doz ve su/çimento oranlarında hazırlanan iki farklı çentik boyu için test edilmiştir. Bu amaçla maksimum agrega çapı 16 mm. olan beton numuneler üretilmiştir. Aynı zamanda özdeş mukavemet tayini için yine 150 mm.'lik küplerden basınç ve yarmada-çekme numuneleri dökülmüştür. Numuneler bir gün kalıpta, ardından 28 gün suda bekletilmiş ve deney günü sudan çıkarılarak test edilmiştir. Küp numunelere ait malzeme özellikleri, çatlak geometrileri ve kırılma yükleri Tablo 1'de verilmiştir. Çizelge 1'de s/ç su/çimento oranı, f_c betonun silindir basınç mukavemeti, f_{sp} betonun yarmada çekme mukavemeti, a_0 başlangıç çentik boyu ve P_V numunelerin kırılma yüküdür. Şekil 3'teki karakteristik boyut tüm numunelerde $d=140$ mm.'dir. Numuneler 100 kN kapasiteli hidrolik yük-kontrollü preste kırılmıştır. Numunelerin kırılma yüklerine 3 dk. $\pm$ 30 sn.'de erişilmiştir.

Çizelge 1. Numunelerin malzeme özellikleri, kırılma yükleri ve kırılma parametreleri

Doz (kg/m ³)	s/ç	f_c (MPa)	f_{sp} (MPa)	a_0 (mm)	P_{v1} (kN)	P_{v2} (kN)	K_{Ic}^s (MPa√m)	$CTOD_c$ (mm)
248	0.79	22.3	2.95	50	2.89	2.88	0.761	0.0128
				80	1.39	1.29		
250	0.73	29.6	3.16	50	3.35	3.11	0.816	0.0103
				80	1.62	1.47		
350	0.55	40.0	3.74	50	3.68	3.90	1.060	0.0161
				80	1.49	1.92		
350	0.52	44.7	3.87	50	4.00	3.68	1.123	0.0178
				80	1.67	1.69		
467	0.43	51.1	4.50	50	4.03	3.91	1.352	0.0256
				80	1.49	1.69		
493	0.41	57.2	4.79	50	4.54	4.44	1.420	0.0230
				80	1.93	1.83		

SONUÇLARIN ANALİZİ

Deney sonuçları, betonun kırılma mekanizminde popüler bir metot olan iki parametrelili modele [6] göre analiz edilmiştir. Bu kırılma modeli, beton bir yapıda, gerilme şiddet çarpanı K_I (burada sadece Mod I durumu dikkate alınmaktadır) ve çatlak ucu açılımı $CTOD$ değerleri, kritik gerilme şiddet çarpanı K_{Ic}^s ve kritik çatlak ucu açılımı $CTOD_c$ olan kritik değerlerine eriştiğinde göçmenin meydana geldiğini kabul etmektedir.

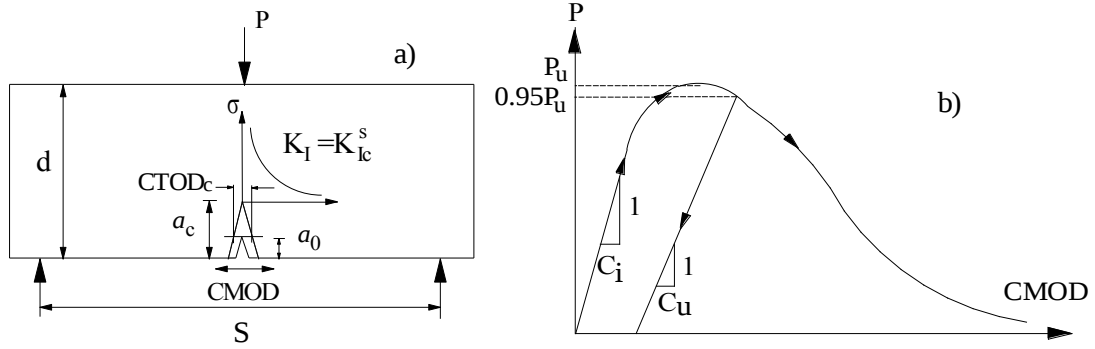
Yaklaşım, bu parametreleri deneysel olarak iki yolla belirlemektedir. Bunlar, komplians [6] ve pik-yük metodudur [14-17]. Birinci yöntemde kırılma parametreleri, kapalı devre deney ekipmanı kullanılarak, Şekil 4'te görüldüğü gibi çentikli bir üç noktalı eğilme numunesinin Yük-Çatlak Ağız Açılımı (P-CMOD) ilişkisinden faydalanarak hesaplanır.

İkinci yaklaşımda, birincisine nazaran daha düşük kapasiteli bir deney ekipmanına gerek duyulmasına rağmen, ya aynı boyutta farklı çentik boylu ya da farklı boyutta aynı relatif çentik boyuna sahip en az iki numunenin pik yük değerinin belirlenmesi gereklidir. Bu yöntemde betonun lineer olmayan kırılma parametreleri, lineer olmayan bir denklem takımının çözümüyle bulunmaktadır ve kendi içerisinde bir istatistik analiz içermektedir [22]. Sonuç olarak $K_{Ic}^s - CTOD_c$ ilişkisinden İfade (5) de tanımlanan standart sapmanın minimum olduğu değerden kırılma parametreleri hesaplanabilir.

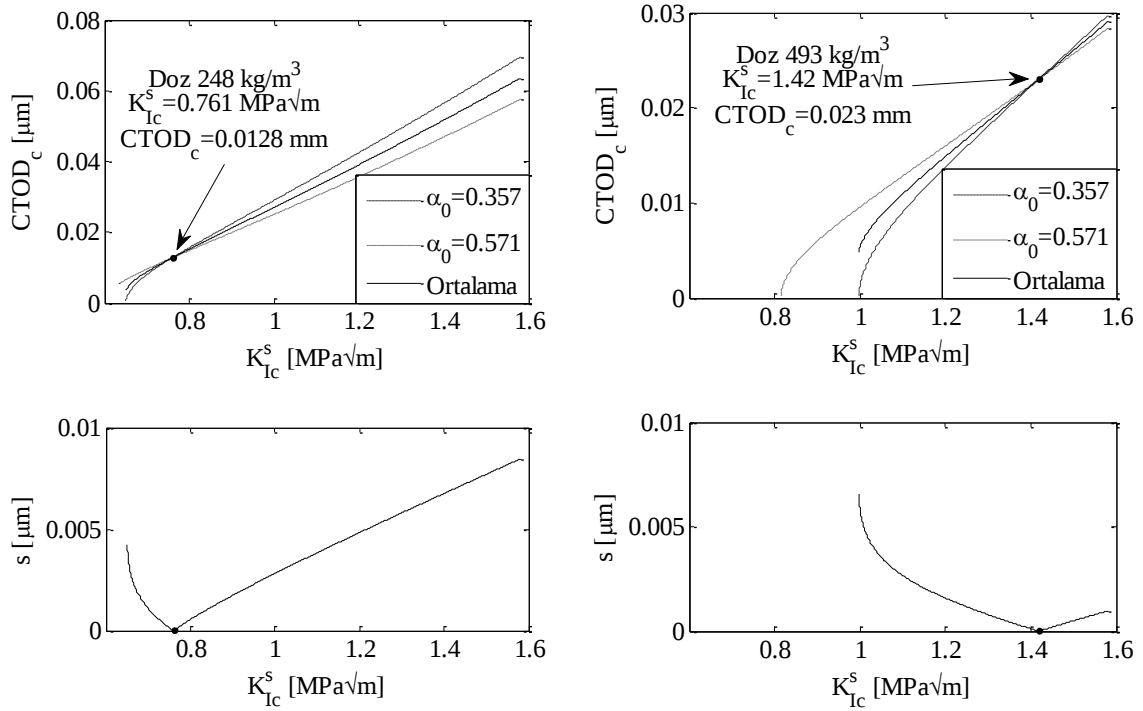
$$s(K_{Ic}^s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{CTOD_c} - CTOD_{ci})^2}{n-1}} \quad (5)$$

Bu çalışmada kırılma parametrelerinin tespiti için Pik-Yük metodu kullanılmıştır. Pik-yük metodu analizi Şekil 5'te, Çizelge 1'deki ilk ve son seri için detaylandırılmıştır. $CTOD$ değerlerinin hesabında İfade (3) deki betonun elastisite modülü [MPa], ACI-318 [23] den aşağıda verilen şekliyle hesaplanmıştır.

$$E = 4730\sqrt{f_c} \quad (6)$$



Şekil 4. İki parametrelili modelde kırılma parametrelerinin tayini
a) çentikli üç noktali eğilme numunesi b) tipik bir P-CMOD diyagramı.

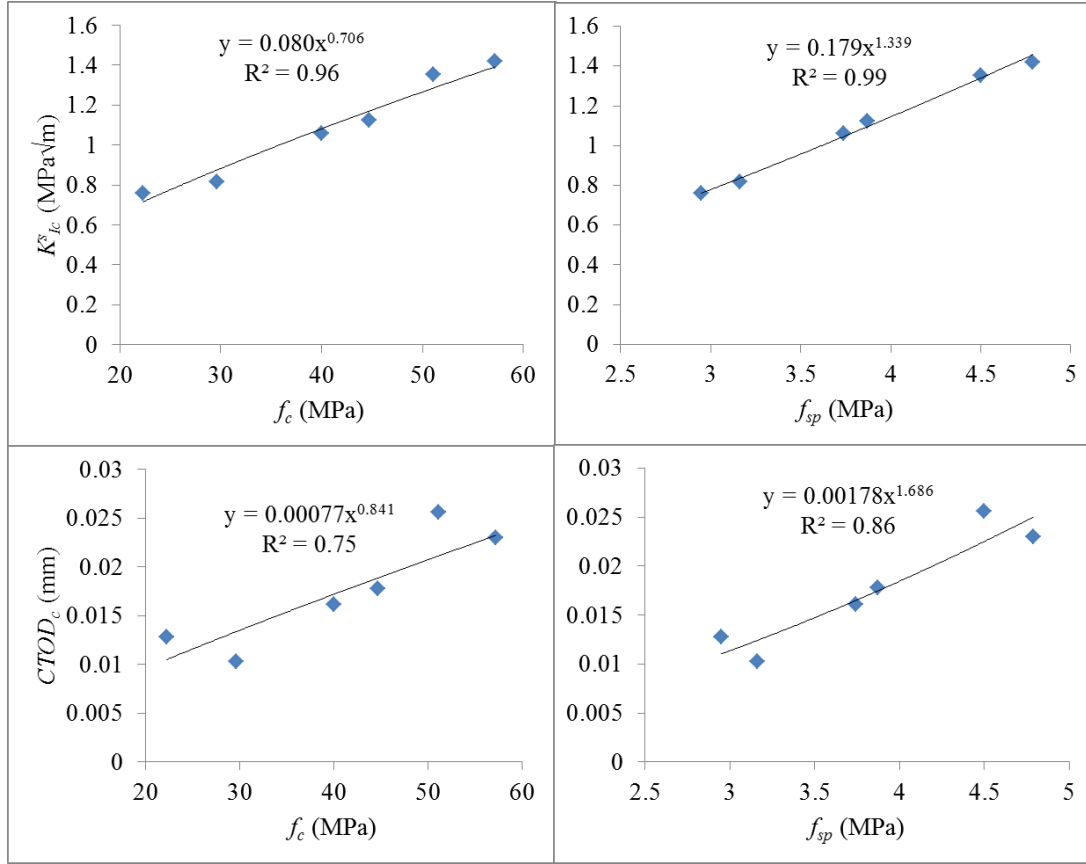


Şekil 5. Pik-Yük Metoduna göre analiz sonuçları

Pik-yük metoduna göre elde edilen kırılma parametreleri toplu olarak Çizelge 1'in son iki sütununda verilmiştir. Şekil 6'da iki parametrelili kırılma modelinin kırılma parametreleri (K_{Ic}^s ve $CTOD_c$) ile betonun iki önemli mukavemet parametresi (f_c ve f_{sp}) arasındaki regresyon tabanlı ilişkiler verilmiştir. Buna benzer bir çalışma yüksek mukavemetli betonlar için sadece basınç mukavemeti dikkate alınarak John ve Shah [21] tarafından yapılmıştır. Burada ise metot, normal mukavemetli betonlara uygulanmış ve ilave olarak yarma-çekme mukavemeti de dikkate alınmıştır.

SONUÇLAR

Sunulan çalışmada kama-yarma deneyi kullanılarak eşdeğer elastik çatlak yaklaşımlarına göre betonun kırılma parametreleri tayin edilmiş ve betonun iki önemli sertleşmiş beton özelliği olan basınç mukavemeti ve yarma-çekme mukavemeti arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:



Şekil 6. Betonun kırılma parametreleri ile basınç ve yarma-çekme mukavemeti ilişkileri

- 1) Çentikli küp numuneler üzerinde yapılan kama-yarma deneyinde numuneler, kırıslara nazaran daha kompakt ve hafif olduğundan deneyleri gerçekleştirmek daha kolay olmaktadır. Bu durum özellikle boyut etkisi çalışmalarında ön plana çıkmaktadır.
- 2) Şekil 6'da görüldüğü gibi K_{Ic}^s ile mekanik mukavemet arasında yüksek korelasyon elde edilmiş, fakat $CTOD_c$ korelasyonunun nispeten daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun $CTOD_c$ parametresinin ölçüm hassaslığına aşırı miktarda bağlı olduğundan kaynaklandığı söylenebilir. Bu sebeple Pik-yük metodu geliştirilmiştir.
- 3) Yapılan istatistiksel analizler sonucunda, kırılma parametreleri ile yarma-çekme arasındaki ilişkinin basınç mukavemetiyle olan ilişkiyle karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, betonun kırılmasında çekme modunun (Mod I) daha etkin olması ile açıklanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] A.A. Griffith, The phenomena of rupture and flow in solids, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A221 (1920) 163-198.
- [2] M.F. Kaplan, Crack propagation and the fracture of concrete, *Journal of ACI*, 58 (1961) 591-610.
- [3] C.E. Kesler, D.J. Naus, J.L. Lott, Fracture mechanics its applicability to concrete, *The Society of Material Science*, 4 (1971) 113-124.
- [4] A. Hillerborg, M. Modeer, P.E. Petersson, Analysis of crack formation and growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, 6 (1976) 773-782.

- [5] Z.P. Bazant, B.H. Oh, Crack band theory for fracture concrete, *Materials and Structures (RILEM)*, 16 (93) (1983) 155-157.
- [6] Y.S. Jenq, S.P. Shah, A two-parameter model for concrete, *Journal of Engineering Mechanics- ASCE*, 111 (1985) 1227-1241.
- [7] P. Nallathambi, B.L. Karihaloo, Determination of the specimen size independent fracture toughness of plain concrete, *Magazine of Concrete Research*, 38 (1986) 67-76.
- [8] Z.P. Bazant, M.T. Kazemi, Determination of fracture energy, process zone length, and brittleness number from size effect with application to rock and concrete, *International Journal of Fracture*, 44 (2) (1990) 111-131.
- [9] S. Xu, H.W. Reinhardt, Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part I: Experimental investigation of crack propagation, *International Journal of Fracture*, 98 (1999) 111-149.
- [10] M.A. Modeer, *A fracture mechanics approach to failure analyses of concrete materials*. Report TVBM-1001, Division of Building Materials, University of Lund, Sweden, 1979.
- [11] E. Brühwiler, F.H. Wittmann, The wedge splitting test, a method of performing stable fracture tests, *Engineering Fracture Mechanics*, 35 (1990) 117-126.
- [12] C. Rocco, G.V. Guinea, J. Planas, M. Elices, *The effect of the boundary conditions on the cylinder splitting strength*, in: F.H. Wittmann Editor, *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, (FRAMCOS-2), Aedificatio Publishers, Freiburg, 1995: s. 75-84.
- [13] T. Tang, S.P. Shah, C. Ouyang, Fracture mechanics and size effect of concrete in tension, *ASCE Journal Structural Engineering*, 118 (1992) 3169-3185.
- [14] T. Tang, C. Ouyang, S.P. Shah, A simple method for determining material fracture parameters from peak loads. *ACI Materials Journal*, 93(2) (1996) 147-157.
- [15] R. Ince, Determination of concrete fracture parameters based on two-parameter and size effect models using split-tension cubes. *Engineering Fracture Mechanics* 77 (2010) 2233-2250.
- [16] R. Ince, Determination of concrete fracture parameters based on peak-load method with diagonal split-tension cubes, *Engineering Fracture Mechanics*, 82 (2012) 100-114.
- [17] R. Ince, Determination of the Fracture Parameters of the Double-K Model Using Weight Functions of Split-Tension Specimens, *Engineering Fracture Mechanics*, 96 (2012) 416-432.
- [18] B. Hillemeier, H.K. Hilsdorf, Fracture mechanics studies on concrete compounds, *Cement and Concrete Research*, 7 (1977) 523-536.
- [19] Z.P. Bazant, E. Becq-Giraudon, Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard, *Cement and Concrete Research*, 32 (2002) 529-556.
- [20] R. Ince, Prediction of fracture parameters of concrete by artificial neural networks. *Engineering Fracture Mechanics*, 71 (2004) 2143-2159.
- [21] R. Ince, Artificial Neural Network-Based Analysis of Effective Crack Model in Concrete Fracture. *Fatigue and Frac of Engng Mater and Struct*, 33(9) (2010) 595-606.
- [22] R. Ince, Application of the Peak-Load Method to CT and WS Tests for Determining Nonlinear Fracture Parameters of Concrete, *Universal Journal of Fracture Mechanics*, 2 (2014) 39-51.
- [23] ACI-318. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*. Detroit, 1989.
- [24] Y.S. John, S.P. Shah, Fracture mechanics analysis of high strength concrete, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 1(4) (1989) 185-98.