

BETONUN KIRILMA MEKANIĞI: TASARIMDA KULLANILAN MEKANİK ÖZELİKLER İLE KIRILMA PARAMETRELERİ ARASINDAKİ BAĞINTILAR

Yılmaz AKKAYA(*), Fikret BAYRAMOV(**), Mehmet Ali TAŞDEMİR(***)

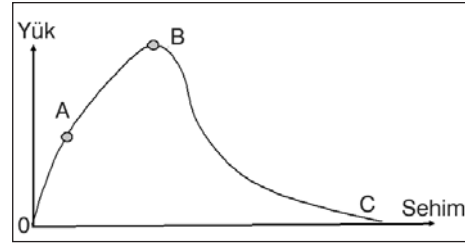
1. GİRİŞ

Betonun kırılma mekaniği depreme dayanıklı binalar, savunma amaçlı yapılar, reaktörler, iklim ve çevre koşullarının etkisinde yıpranmaya maruz binalar gibi ekonomik açıdan maliyeti yüksek yapılar için oldukça büyük bir öneme sahiptir. Bu tür yapılarda göçmenin nasıl, nereden ve hangi koşullarda oluşacağı, varolan bir çatlağın hangi şartlar altında kararlı veya kararsız bir şekilde ilerleyeceği kırılma mekaniği bilim dalının konularıdır. Bu amaçla Lineer Elastik Kırılma Mekaniğinin (LEKM) betona ilk uygulaması 1960'lı yıllarda yapılmasına rağmen betonun yarı gevrek ve heterojen bir malzeme olması nedeniyle betonun kırılma parametrelerinin LEKM ile elde edilemeyeceği görülmüştür. Bu nedenle, daha sonraki yıllarda LEKM modifiye edilerek Nonlineer Kırılma Mekaniği modelleri oluşturulmuştur.

Betonun kırılma parametrelerinin ve kırılma mekanizmasının daha iyi anlaşılması için öncelikle betonun nasıl bir malzeme olduğunu anlamak gerekmektedir. Bu çalışmada önce betonun malzeme davranışı, iç yapısı ve mekanik davranışı arasındaki ilişki incelenecek, daha sonra kırılma parametreleri tanıtılacaktır. Betonun kırılma süreci bölgesi ve şekil değiştirme kapasitesi değerlendirilecek ve betonda enerjinin nasıl yutulduğu toklaşma mekanizmaları ile beraber incelenecektir.

2. BETONDA KIRILMA SÜRECİ

Beton, yük altında olmasa bile içinde boşluklar ve mikroçatlaklar bulunan heterojen ve yarı gevrek bir malzemedir ve düşük yükler altında lineer elastik bir davranış gösterir (O-A arası, Şekil 1). Bu bölgede gerilmeler ve şekil değiştirmeler orantılı olarak artar ve yük kalktığında şekil değiştirmeler de kalkar. Yük arttırıldığında, elastik sınır geçilir (A noktası), betonun içindeki mikroçatlaklar ve boşluklar aktif



Şekil 1 - Betonun Eğilme Yükleme Altındaki Davranışı.
O -A Noktaları Arasında Lineer Davranış A-B Noktaları Arasında Nonlineer Bölge. B-C Noktaları Arasında Şekil Değiştirme Yumuşaması

hale gelir ve yük- sehim eğrisi lineerliğini kaybeder. Özellikle agrega-çimento hamuru arayüzeyindeki boşluk ve mikroçatlaklar büyür ve betonda kalıcı şekil değiştirmeler meydana gelir. Oluşan bu çatlaklar enerji harcadığı için yük - sehim eğrisi nonlineer bir şekilde artış gösterir (A-B arası, Şekil 1). Bu bölgede mevcut çatlakların büyümesinin yanı sıra yeni çatlaklar da oluşmaya başlar.

Meydana gelen şekil değiştirmeler, tepe yükü civarında (B noktası) kırılmanın gerçekleşeceği düzlemde birikmeye başlar (şekil değiştirme yerleşmesi). Çatlaklar ilerlemeye devam ettikçe şekil değiştirmeler artar ve yük taşıma kapasitesi azalır. Böylece çatlaklar adım adım ilerleyerek betonun yük taşıma kapasitesinin aniden sıfıra düşmesini engeller, ve tepe yükü sonrasında betona tokluk kazandırır. B-C noktaları arasında kalan bu bölgede şekil değiştirme yumuşaması görülür. Bu nedenle beton, yarı gevrek bir malzeme kabul edilir.

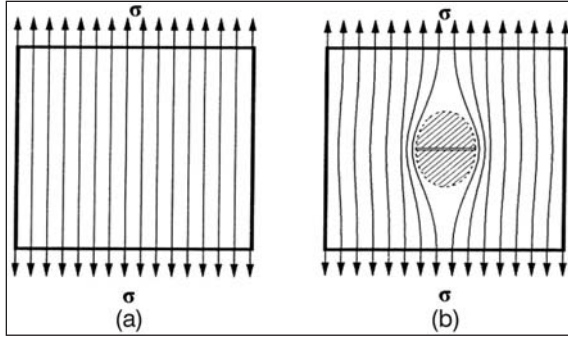
3. KIRILMA MEKANIĞI VE BETON

Kırılma mekaniği kısaca, bir çatlağın çevresindeki gerilmeleri ve şekil değiştirmeleri inceleyen bir bilim dalıdır. Betonun malzeme özellikleri (agrega hacmi, agrega boyut dağılımı, su/ çimento oranı gibi), çatlak oluşması ve yayılması üzerinde önemli etkilere sahiptir ve beton mekanik davranışı kırılma mekaniği ile incelenebilir. Örneğin, yüksek muka-

(*) Y. Doç. Dr., (**) Y. Müh., (***) Prof. Dr.,
İTÜ, İnşaat Fakültesi, İstanbul

vemetli beton daha kırılğan ve gevrek bir malzemedir. Lif katkılı betonlarda çatlak oluşuktan sonra lifsiz betonlara kıyasla toklukta artış gözlenmektedir. Laboratuvar numunesi boyutlarına sahip bir betonun kırılması ile gerçek boyutlarda bir beton elemanın kırılması da birbirinden farklıdır. Bu nedenlerle, farklı malzeme özelliklerine ve boyutlara sahip betonların kırılması, kırılma mekaniği parametreleri ile incelemeye modelleme yapılabilir.

Yük altında bulunan ve içinde boşluk içeren bir malzemede, süreksizlik nedeniyle boşluk ucunda gerilme yığılması meydana gelir (Şekil 2). Yükleme nedeniyle meydana gelen gerilme akımı çatlak etrafını dolanmak zorunda kaldığından çatlak ucunda gerilme yığılmasının artmasına, çatlak alt ve üst yüzlerinde ise gerilme gevşemesine (taranmış alan) neden olmaktadır. LEKM'ne göre, çatlak ucunda meydana gelen bu gerilme yığılması çatlak keskinleştikçe sonsuza gitmektedir.

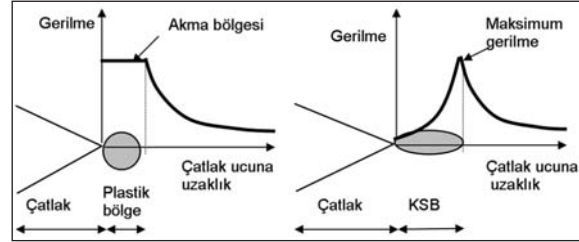


Şekil 2 - (A). Yük Altında Çatlak veya Boşluk İçermeyen Bir Malzemede Gerilme Akımı. (B) Çatlak veya Boşluk gibi Süreksizlik İçeren Bir Malzemede Meydana Gelen Gerilme Akımı ve Süreksizlik Ucunda Meydana Gelen Gerilme Yığılmaları.

Gevrek malzemelerde çatlakların ilerlemesini ve kırılmayı tanımlamak için sadece bir malzeme parametresi, kırılma tokluğu (K_{IC}) yeterlidir. Malzemenin kırılma tokluğu önceden çatlak içeren farklı geometrilerle sahip numunelerle deneysel olarak hesaplanabilmektedir. Örneğin, çentikli kiriş numuneler üzerinde uygulanan üç noktalı eğilme deneyinde çatlak yayılmaya başlayıncaya kadar kiriş numuneye yük uygulanmakta ve maksimum yük elde edildikten sonra kullanılan numunenin boyutlarına ve yükleme durumuna bağlı olarak K_{IC} hesaplanmaktadır (Karihaloo, 1995). LEKM, sertleşmiş çimento hamuru gibi gevrek malzemelere uygulanabilmektedir.

Metalik bir malzemede ise kırılma öncesinde akma oluşacağı için

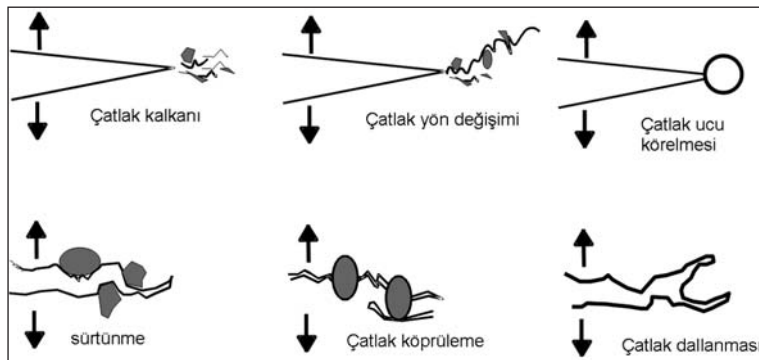
çatlak ucunda meydana gelen gerilme artışı sonsuza gitmez ve akmanın görüldüğü plastik bir bölge oluşur (Şekil 3a). Beton gibi yarı gevrek bir malzemede de çatlak ucunda önemli oranda kalıcı şekil değiştirmeler meydana gelir. Oluşan gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin orantılı olmadığı bu bölgeye Kırılma Süreci Bölgesi (KSB) adı verilir. Meydana gelen şekil değiştirmeler ve mikroçatlaklar enerji yutar ve çatlak ucunda meydana gelen gerilme azalarak sonsuza gitmesi engellenir (Şekil 3b).



Şekil 3 - (A) Sünek Bir Malzemede Çatlak Ucunda Meydana Gelen Gerilme Durumu ve Plastik Bölge, (B) Yarı Gevrek Bir Malzemede Çatlak Ucunda Meydana Gelen Gerilme Durumu ve Kırılma Süreci Bölgesi

Betonda meydana gelen kırılma süreci bölgesinin büyüklüğünden dolayı LEKM'in uygulanamayacağı bir çok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur (Shah ve Ouyang, 1992). Böyle bir bölgenin varlığı betonda meydana gelen toklaşma mekanizmalarına bağlıdır. Agregalar, boşluk ve mikroçatlaklar içeren bir malzeme olan betonda, çatlak ilerleyişi bir takım mekanizmalar tarafından engellenir ve betonda tokluk artışına neden olur (Şekil 4).

Çatlak ucundaki agregaların çatlak ilerlemesini engelleyerek çatlak kalkını görevini yapması, çatlakın agregalara rasgelerek yön değiştirmesi, agregaların birbirlerine sürtünerek çatlakın ilerlemesini engellemesi, agregaların çatlakın bir tarafından diğer tarafına yük aktarımında bulunması, çatlak ucuna rasgelen boşlukların çatlak ucu keskinliğini azaltması veya çatlakın dallanmasına neden olması gibi mekanizmalar betonda tokluk artışına neden olur.



Şekil 4 - Betonda Tokluk Artışına Neden Olan Mekanizmalar.

Birçok araştırmacı betonda çatlak ucunda meydana gelen ve enerji harcanmasına neden olan bu bölge ile ilgili incelemelerde bulunmuşlardır. Bu bölgenin boyutları betonun türüne ve beton yapının boyutlarına bağlıdır. Bu bölgenin uzunluğu çimento hamurunda 5-15 mm, harçta 100-200 mm, yüksek dayanımlı betonda 150-300 mm, normal dayanımlı betonda 200-500 mm ve baraj betonu gibi bir kütle betonunda 700 mm civarındadır (Karihaloo, 1995).

Bu tür mekanizmalar nedeniyle betonun kırılmasının tek bir parametre ile belirlenemez. Dolayısıyla LEKM'in bir çatlağın ilerlemesi için ortaya koyduğu çatlak ucundaki gerilme yığılmalarını ifade eden kırılma tokluğu (gerilme şiddet çarpanının kritik değeri) parametresi, betonda bir çatlağın hangi şartlar altında ilerleyeceğinin tahmini konusunda yetersiz kalmaktadır.

4. BETONUN KIRILMA MEKANİĞİ İLE İLGİLİ MODELLER

Betondaki kırılma parametrelerinin saptanması için Nonlineer Kırılma Mekanikine dayanan yöntemler geliştirilmiştir. Betonun kırılma enerjisi ve karakteristik boyu CEB-FIP 90 Model Code (1991) tarafından hazırlanan model kodlarda da yer almakta ve tasarımda kullanılmaktadır. Betonun kırılma parametreleri ile gevrekliğinin saptanması için bilinen başlıca üç model vardır. Bunlar: a) Fiktif Çatlak Modeli (FÇM) (Hillerborg, 1976), b) Boyut Etkisi Modeli (Bazant, 1984), c) İki Parametrelili Modeldir (Jenq ve Shah, 1985). Her bir model betonun gevrekliğinin bir ölçüsünü vermektedir.

a. Fiktif Çatlak Modeli

Hillerborg (1976) tarafından önerilen bu modelde çatlak ucundaki kırılma süreci bölgesi, bir taraftan diğer tarafına yük aktarabilen bir çatlak uzantısı olarak düşünülür. Çentikli kiriş numuneler üzerinde üç noktali eğilme deneyi yapılarak yük - toplam şekil değiştirme eğrisi elde edilir. Bu eğriden elastik şekil değiştirmeler çıkarıldığında, yük - çatlak genişliği eğrisi bulunur. Bu eğri altında kalan alandan da kırılma enerjisi hesaplanır (RILEM TC 50-FMC). Bulunan parametre sayısal analizde kullanılabilen, uygulaması kolay bir yöntemdir. Ancak kiriş ortasındaki sehimin ölçülmesi gerektiğinden ve yük sıfır olana kadar hassas biçimde ölçmek güç olduğundan deneysel zorluklar içerir. Kırılma enerjisi gibi bir tek parametre, hesaplanması da bir sakıncadır.

Bulunan kırılma enerjisi yardımıyla hesaplanan karakteristik boy (l_{ch}) yeni çimento esaslı kompozitlerinin mikro çatlaklara karşı tasarımında başarılı biçimde kullanılmaktadır (Bache, 1986). Karakteristik boy nominal dayanımı, kırılma modunu ve çatlak büyümesini (çatlak modelini) kontrol etti-

ğinden, beton karışımının tasarımında göz önüne alınabilir.

b. Boyut Etkisi Modeli

Bu model, Bazant ve Kazemi (1990) tarafından önerilmiştir. Model için en az üç farklı boyutta geometrik olarak benzer ve orantılı çentik boyutlarına sahip kirişlerde üç noktali eğilme deneyi uygulanır (RILEM TC 89-FMT). Bu deneylerden tepe yükü elde edilerek iki adet kırılma parametresi bulunur. Bunlardan birincisi kritik enerji salıverilme hızı, G_f (kırılma tokluğu), ikincisi de kırılma süreci bölgesi uzunluğu, c_f 'tir. Bu parametreler, boyut etkisi-tepe yükü ilişkisini ifade eden denklemlerin deney sonuçları ile regresyonu yapılarak bulunan empirik katsayılar yardımıyla hesaplanır. Sadece tepe yükü bulunarak iki parametre hesaplanabildiği için avantajlı bir yöntemdir. Ancak üç farklı boyutta numune üzerinde deney gerektirmektedir.

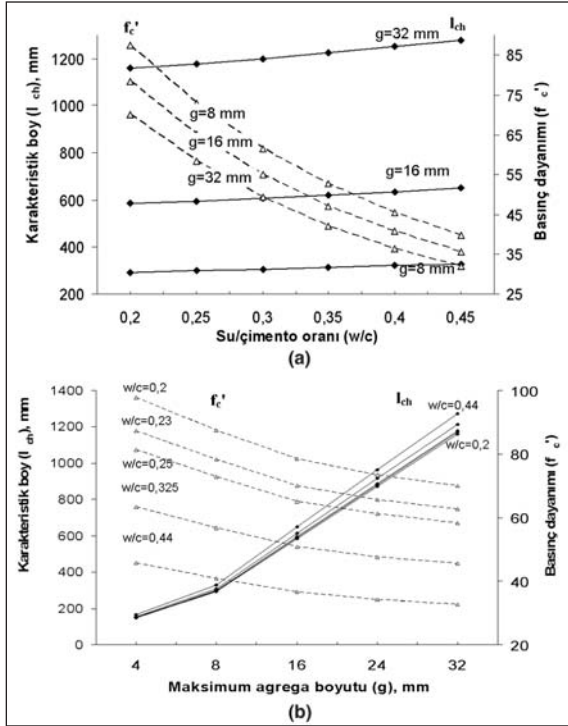
c. İki Parametrelili Model

Jeng ve Shah (1985) tarafından önerilen bu modelde farklı boyutlu numuneler kullanılmasına gerek yoktur. Çentikli kirişte üç noktali eğilme deneyi uygulanarak, yük - çatlak genişliği eğrisinin tepe yükü noktasında yükleme - boşaltma yapılır. Başlangıçtaki yük - çatlak genişliği ilişkisini ifade eden eğiminin yükleme - boşaltma ile nasıl azaldığı hesaplanır. Buradan etkin çatlak uzunluğu yardımıyla iki adet kırılma parametresi hesaplanır (RILEM TC 89-FMT, 1990). Bu parametreler gerilme şiddet çarpanının kritik değeri, K_{IC} ve çatlak ucu açılma deplasmanının kritik değeri $CTOD_c$ 'dir. Sadece bir tip deney numunesi gerektirmesi ve kırılmayı ifade eden iki parametre hesaplanabilmesi, bu yöntemin avantajları arasındadır. Ancak model, yükleme - boşaltma sırasında yük - çatlak genişliği ilişkisinin hassas bir şekilde ölçülmesini gerektirmektedir.

5. MEKANİK ÖZELLİKLER İLE KIRILMA PARAMETRELERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLER

Betonun kırılma parametrelerine etki eden etkenler arasında su/çimento oranı, maksimum agrega boyutu, agrega tipi ve agrega konsantrasyonu sayılabilir.

Basınç dayanımı (f'_c) ve karakteristik boyun (l_{ch}), su/çimento oranı ve maksimum agrega boyutu ile değişimi Şekil 5'de görülmektedir. Su/çimento oranındaki artma ile betonun gevrekliğinin bir ölçüsü olan karakteristik boy artış göstermekte, basınç dayanımı ise azalmaktadır. Karakteristik boyun su/çimento oranına az duyarlı olduğu, basınç dayanımının ise beklendiği gibi su/çimento oranından daha çok etkilendiği de görülmektedir. Maksimum agrega boyutunun artmasıyla birlikte karakteristik boyda belirgin artış olduğu, buna karşılık basınç

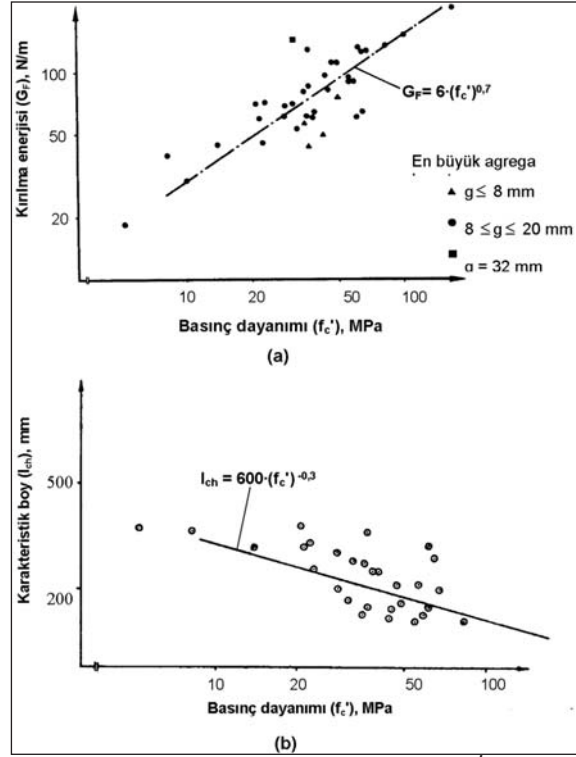


Şekil 5 - (A) Karakteristik Boy ve Basınç Dayanımının Su/Çimento Oranındaki Değişime Duyarlılığı (B) Karakteristik Boy ve Basınç Dayanımının Maksimum Agrega Boyutundaki Değişime Duyarlılığı (Bayramov ve Diğ., 2001).

dayanımında ise hafif azalma olduğu görülmektedir. Böylece, beton basınç dayanımının değişimi karakteristik boyun değişimi ile ters orantılıdır. Buradan betonun dayanımı arttıkça daha gevrek bir davranış sergilediği görülmektedir.

Agreganın maksimum boyutu arttıkça, çimento hamuru-agrega arayüzündeki gerilmeler de artmakta ve böylece arayüzeyde kırılmalar meydana gelmektedir. Maksimum agrega boyutu küçük olan beton karışımlarında ise agregaların yüzey alanı daha fazla olduğundan arayüzeyde oluşan gerilmeler daha azdır. Bundan dolayı, maksimum agrega boyutu düşük olan betonlarda kırılma agrega-matris arayüzeyinde değil matris içinde olur. Maksimum agrega boyutu büyük olan betonlarda ise çatlak, agrega etrafını tur atacağı için, yolu daha dolaylıdır ve kırılma enerjisi daha fazladır (Rao ve Prasad, 2002).

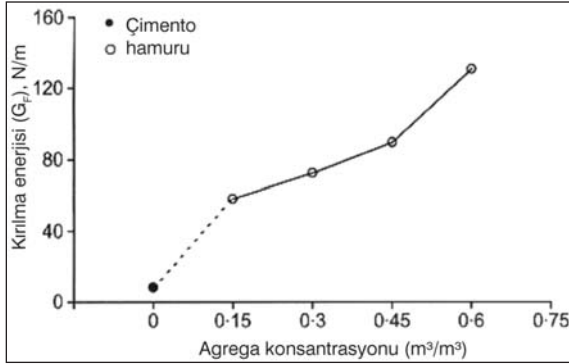
Şekil 6'da ise beton basınç dayanımı (f_c') arttıkça kırılma enerjisinin (G_F) arttığı ve karakteristik boyun (l_{ch}) azaldığı görülmektedir. Ancak burada, çok yüksek dayanımlı betonlarda kırılma enerjisinin belli bir değerden sonra sabit kalarak artmadığını vurgulamak gerekir. Araştırmalar sonucunda betonun basınç dayanımı, su/çimento oranı, maksimum agrega boyutu, betonun yaşı ve çentik boyunun



Şekil 6 - (a) Kırılma Enerjisi - Basınç Dayanımı İlişkisi, (b) Karakteristik Boy - Basınç Dayanımı İlişkisi (Hilsdorf ve Brameshuber, 1991).

kırılma enerjisine etki eden parametreler olduğu ortaya konulmuştur.

CEB-FIP Model Code 1990 (1991), su/çimento oranının ve betonun yaşının basınç dayanımı ile doğrudan ilişkili olması nedeniyle kırılma enerjisinin tahmininde basınç dayanımı ve maksimum agrega boyutu göz önüne alınmaktadır. CEB-FIP Model Code 1990 (1991)'a göre basınç dayanımı ve maksimum agrega boyutundaki artışla kırılma enerjisinin de arttığı kabul edilse de, kırılma enerjisi basınç dayanımı ile her zaman artmayabilir. Yüksek dayanımlı betonlarda düşük su/bağlayıcı oranı matris ve agrega arasındaki bağ kuvvetini arttırdığından ve daha az enerji yutan düzgün kırılma yüzeyine yol açtığından basınç dayanımının değişimi kırılma enerjisini açıkça yansıtamaz (Yan ve diğerleri, 2001). Yüksek dayanımlı betonlarda kırılma enerjisinin kırılma süreci bölgesinden etkilendiği ortaya konulmuştur (Taşdemir, 1995; Taşdemir ve diğerleri, 1995; Taşdemir ve diğerleri, 1999). Silis dumanı içeren betonlarda silis dumanı içermeyen betonlara oranla basınç ve yarma çekme dayanımlarında belirgin artışın olduğu görülmüştür. Buna karşın, CEB-FIP Model Code 1990 (1991)'in yaklaşımının aksine kırılma enerjisi, basınç dayanımı arttıkça, azalmaktadır. Karakteristik boy ise beklendiği gibi, basınç mukavemeti arttıkça, azalmakta ve malzeme daha gevrek davranış sergilemektedir.



Şekil 7 - Betonda Kırılma Enerjisinin (GF) Agregat Konsantrasyonu ile Değişimi (Taşdemir ve Karihaloo, 2001).

Şekil 7’de ise agregat konsantrasyonu arttıkça betonun kırılma enerjisinin arttığı görülmektedir. Bu şekilde kullanılan değerler Taşdemir ve Karihaloo (2001) tarafından mezo-mekanik bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Daha sonra aynı araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışmalarda bu eğilimi doğrulamıştır (Bayramov ve diğerleri, 2003). Yine aynı araştırmacılar agregat konsantrasyonu arttıkça karakteristik boyun arttığını göstermişlerdir. Böylece gevrek bir matrise (çimento hamuruna) belirli bir granulometriye sahip agregat katarak daha tok, rijit ve sünek bir kompozit (yarı-gevrek bir beton) elde edilmekte ve bu özelliklerin agregat konsantrasyonu arttıkça arttığı anlaşılmaktadır.

Her ne kadar betonarme tasarımında betonun çekme dayanımı ihmal edilse de sayısal modellemelerde dürabiliteye bağlı çatlamaya karşı riski önlemede çekme şekil değiştirme kapasitesinin art-

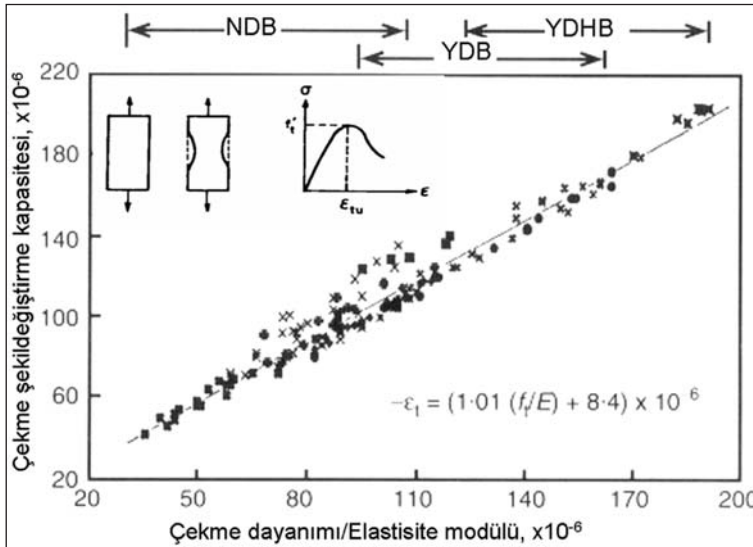
tırılması önemlidir. Şekil 8’de görüldüğü gibi şekil değiştirme kapasitesi yüksek dayanımlı betonlarda daha yüksektir (Taşdemir ve diğ., 1996; Taşdemir ve diğ., 1998). Ayrıca basınç yüklemesi altındaki bir betonda en yüksek gerilmeye kadar yutulan bağıl enerji basınç dayanımındaki artış ile azalmaktadır. Öte yandan basınç dayanımı arttıkça “yarılma çekme dayanımı/ basınç dayanımı” oranı azalmaktadır. Diğer bir deyişle basınç dayanımı arttıkça beton gevrek bir davranış sergilemektedir (Taşdemir ve diğerleri, 1998). Dış yükler altında gevrek davranış sergileyen yalın betona sünek davranış kazandırmak için çelik veya sentetik lif donatılı betonlar günümüzde endüstriyel zeminler, tüneller ve bazı prefabrik elemanlar başta olmak üzere yaygın uygulama alanı bulmaktadır (Akkaya ve diğerleri, 2000).

6. SONUÇLAR VE TASARIM İÇİN DÜŞÜNCELER

Beton, yapı mühendisliğinde çok yaygın biçimde kullanılan bir malzeme olduğundan mühendislerin çatlak başlama ve yayılmasına etki eden etkenler hakkında yeterli bilgiye sahip olmaları gerekmektedir. Bu bilgi özellikle çatlamış betonarme yapıların sayısal analizi ve buna ek olarak malzeme özellikleri (kırılma parametreleri) için gereklidir.

Heterojen ve yarı-gevrek bir malzeme olması dolayısıyla, betonun kırılma süreci gerilme şiddet faktörünün kritik değeri veya kırılma tokluğu gibi tek bir kırılma parametresi ile yeterli derecede tanımlanamamaktadır. Betonda mevcut olan toklaşma mekanizmaları nedeniyle LEKM uygulanmamaktadır. Betonda önceden varolan çatlak veya çentik önündeki kırılma süreci nedeniyle mikroçatlaklar oluşmakta ve şekil değiştirme yumuşaması biçiminde bir davranış görülmektedir. Bu nedenle beton için nonlineer kırılma mekaniği modelleri geliştirilmiştir.

Nonlineer kırılma mekaniği modelleri yardımıyla betonda kırılma parametreleri belirlenebilir ve seçilen malzeme özellikleri ile kırılma parametreleri arasındaki ilişkiler bulunabilir. Örneğin, su/çimento oranının artması ile kırılma enerjisi ve basınç dayanımı azalmakta, karakteristik boy ise artmaktadır. Basınç dayanımı arttıkça karakteristik boy azalmakta ve malzeme daha gevrek bir kırılma göstermektedir. Betonun kırılma enerjisi ve karakteristik boyu



Şekil 8 - Ölçülen Çekme Şekil Değiştirme Kapasitesi ile “Çekme Dayanımı/Elastisite Modülü” Arasındaki Bağını (Ndb: Normal Dayanımlı Beton, Ydb: Yüksek Dayanımlı Beton, Ydhb: Yüksek Dayanımlı Hafif Beton) (Taşdemir ve Diğerleri, 1996).

maksimum agrega boyutuna bağlıdır. Maksimum agrega boyutu arttıkça, kırılma enerjisi ve karakteristik boy artmakta, basınç dayanımı ise düşmektedir.

Son yıllarda gerek deney tekniklerinde gerekse bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler yüksek dayanımlı-yüksek performanslı betonlar alanındaki ilerlemeye önemli bir ivme kazandırmıştır. İstenilen kırılma enerjisine sahip, diğer bir deyişle, istenilen süneklikte, istenilen servis ömrüne sahip betonları tasarlamak, çeşitli modeller kullanarak mekanik özellikleri ve kırılma parametrelerini hesaplamak ve deneyle gerçekleştirmek günümüzde mümkündür. Böylece, gelecekte beton alıcısı sadece basınç dayanımını değil, kırılma enerjisini, şekil değiştirme kapasitesini, en büyük agrega boyutunu, agrega hacim oranı gibi parametreleri bildirerek beton talep edebilecektir.

KAYNAKLAR

Akkaya, Y., Peled, A., Shah, S.P., 2000, "Parameters Related to Fiber Length and Processing in Cementitious Composites", *Materials and Structures*, RILEM, 33, 515-524.

Bache, H. H., 1986. In *Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete*, Wittmann, F.H., Ed. Elsevier Science Publishers: Amsterdam, 577-586.

Bayramov, F., Mestanzade, N., Taşdemir, C., Taşdemir, M.A., 2001. Çimento Esaslı Kompozit Malzemelerin Optimum Tasarımı, XII. Ulusal Mekanik Kongresi, Konya Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 10-14 Eylül, 157-168.

Bayramov, F., Taşdemir, M. A., Karihaloo, B.L., 2003, *Effect of Aggregate Volume Fraction on the Fracture Properties of Concrete*, (yayınlanmamış bir çalışma).

Bazant, Z.P., Kazemi, M.T., 1990, *Determination of Fracture Energy, Process Zone Length, and Brittleness Number from Size Effect with Application to Rock and Concrete*, *International Journal of Fracture*, 44, 111-131.

Hillerborg, A., Modeer, M., Peterson, P. E., 1976. *Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements*, *Cement and Concrete Research*, 6, 773-782.

Hilsdorf, H. K., Brameshuber, W., 1991. *Code-type Formulation of Fracture Mechanics Concepts for Concrete*, *International Journal of Fracture*, 51, 61-72.

Jenq, Y., Shah, S. P., 1985. *Two Parameter Fracture Model for Concrete*, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 11(10), 1227-1241.

Karihaloo, B. L., 1995. *Fracture Mechanics and Structural Concrete*, Longman Group Ltd., Essex, England.

Rao, G.A., Prasad, B. K. R., 2002. *Fracture Energy and Softening Behavior of High-Strength Concrete*, *Cement and Concrete Research*, 32, 247-252.

Shah, S. P., Ouyang, C., 1992, *Measurement and Modelling of Fracture Processes in Concrete*, in *Materials Science of Concrete*, Scalny, J. (Ed.), The American Ceramic Society, Ohio, 3, 243-270.

Taşdemir, C., 1995. *Agrega-Çimento Hamuru Arayüzeyi Mikroyapısının Yüksek Mukavemetli Betonların Kırılma Parametrelerine Etkisi*, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Taşdemir, C., Grimm, R., Taşdemir, M.A., König, G., 1995. *Microstructural Effects on the Brittleness of High Strength Concretes*, in *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, Wittmann, F.H.(Ed.), Aedificatic Publishers, Freiburg, 1, 125-134.

Taşdemir, M. A., Karihaloo, B.L. 2001. *Effect of Aggregate Volume Fraction on the Fracture Parameters of Concrete: A Meso-Mechanical Approach*, *Magazine of Concrete Research*, 53(6), 405-415.

Taşdemir, M. A., Lydon F.D., Barr, B.I.G., 1996, *The Tensile Strain Capacity of Concrete*, *Magazine of Concrete Research*, 48, 211-218.

Taşdemir, M. A., Taşdemir, C., Akyüz, S., Jefferson, A.D., Lydon, F.D., Barr, B.I.G., 1998. *Evaluation of Strains at Peak Stresses in Concrete: A Three-Phase Composite Model Approach*, *Cement and Concrete Composites*, 20, 301-318.

Taşdemir, C., Taşdemir, M. A., Mills, N., Barr, B.I.G., Lydon, F.D., 1999. *Combined Effects of Silica Fume, Aggregate Type, and Size on Post Peak Response of Concrete in Bending*, *ACI Materials Journal*, 96, 74-83.

Yan, A., Wu, K.-R., Zhang, D., Yao, W., 2001. *Effect of Fracture Path on the Fracture Energy of High-Strength Concrete*, *Cement and Concrete Research*, 31, 1601-1606.