

**BOŞLUK ORANI VE GEOMETRİSİNİN BETONUN BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ,
YÖKSEK DAYANIMLI BETONDA BOŞLUK YAPISI**

Saim AKYÖZ
Prof. Dr.
İstanbul Teknik Üniversitesi
İstanbul, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada betonun inelastik davranışını oluşturan çatlak yüzeyi alanına bağlamak amacıyla enerji dengesi teorisi yardımıyla matematik bir model geliştirilmiştir. Bu matematik model bizi, betonun basınç mukavemetinin, içerdiği yapısal boşluk oranının ve boşlukların geometrisini simgeleyen kılcalılık katsayısının bir fonksiyonu olduğu sonucuna götürmüştür.

1. GİRİŞ

1.1. Yüksek Nitelikli Beton Hakkında Genel Bilgiler

Beton heterogen ve boşluklu bir malzemedir. Kum ve iri agregayı bir arada tutan matris büyük oranda hidrate silikatlardan oluşmaktadır. Sertleşmiş çimento hamurundaki hacimsel toplam boşluk oranı $E/C=0,5$ için %25-30' dur. Bu boşluk hacmi iki şekilde ortaya çıkmaktadır: a) çimento jel boşlukları (bir kaç nanometre), b) hidratlar arasındaki kılcal boşluklar, hava boşlukları ve çatlaklar (>100 nanometre).

Betonun niteliğindeki zayıflık kılcal boşluk ve betonun işlenebilirliği için konan gereğinden fazla suya bağlanmaktadır. Bu iki olumsuz faktörleri aşağı çekmekle betonun niteliğinde önemli artışlar sağlanabilmektedir. Kılcal boşlukları küçültmek ve fazla suyu sonradan almak veya çimento tanelerini homogen bir şekilde dağıtan bir takım akışkanlaştırıcılarla su/çimento oranını düşürmek beton niteliğini arttırıcı yöntemlerdir.

Son yıllarda bazı yeni ürünler de ortaya çıkmıştır. Bunlar MDF çimentoları (Macro Defect Free, Makro boyutta kusursuz) ve DSP (Densified System Containing Homogeneously Aranged Ultrafine Particles). Birincisi içinde bir reçine bulundurur, ikincisi ise silis dumanı.

Su/çimento oranının azaltılmasıyla betonun basınç dayanımında artış olacağı 1897 (Féret) den beri bilinmektedir. Ancak betonun işlenebilirliğinin de basınç dayanımı kadar önemli olması nedeniyle akışkanlaştırıcılar, süperakışkanlaştırıcılar v.b. leri ortaya çıkana kadar uzun yıllar su/çimento oranını yeterince aşağılara indirmek mümkün olmamıştır. Bugün bazı akışkanlaştırıcılar aracılığıyla su/çimento=0,20 değerine indirmek olasıdır. Yapılan çalışmalarda akışkanlaştırıcılarla çimento hamurunun boşluk oranının %5' lere inmesi halinde mukavemetinin 200 MPa mertebesine çıktığı görülmektedir [1]. Taze çimento hamurunu 150°C sıcaklık ve 1020 MPa basınç altında sıkıştırarak boşluk oranını %2 mertebesine indirmek suretiyle basınç mukavemetinin 600 MPa' a çıktığı aynı kaynakta yer almaktadır.

Son yıllarda uygulamalarda çimentoya katılan silis dumanının (çimento tanesinden yaklaşık 100 kat daha ince) sertleşmiş çimento hamurunda oluşacak boşlukları incelttiği ve bunun sonucunda da hamurun basınç mukavemetinin 270 MPa kadar çıktığı gene aynı inceleme yazısında belirtilmektedir.

Elde edilen bu bulgulara göre çimento hamurunun niteliğini yükseltmek için iki yol karşımıza çıkmaktadır: kılcal boşluk oranını azaltmak ve/veya boyutlarını küçültmek.

Çimento hamurunda yukarıda belirtilen özelliklerin yanında betonda, birde çimento hamuru ile agregas temas yüzeyindeki bağlanmanın niteliği betonun niteliğini etkilemektedir. Örneğin yük altındaki silis agregalı betonlarda çatlak agregayı dolandıktan sonra çimento hamurunda yoluna devam ederken kalker agregalı betonlarda çatlak agregayı dolanmadan agregas içinden geçerek çimento hamurunda ilerlediği görülmektedir. Yani kalker agregas ile çimento hamurunun aderansı diğerine göre daha üstündür.

Gerek çimento hamuru-agrega bağ dayanımının bağıl düşüklüğü, gerekse agreganın basınç dayanımının sınırlı olması (100~150 MPa) nedeniyle çimento hamurundaki boşluk oranı ne kadar aşağılara çekilirse çekilsin betonunun basınç mukavemeti 150 MPa civarında kalmaktadır.

1.2. Betonun Boşluk Oranını Basınc Mukavemetine bağlayan Formüller

Betonun basınç mukavemetini boşluk oranına bağlayan çok sayıda formül vardır. Örneğin Hansen, [2] bir çalışmada çimento hamuru içerisindeki boşlukları küresel varsayıp kesit azalttığı düşüncesiyle

$$R = R_0 (1-1,2 p^{2/3}) \quad (1.1)$$

şeklinde bir formül öne sürmüştür ve bir araştırmacının ampirik olarak çıkardığı

$$R = R_0 (1-p)^{2,7} \quad (1.2)$$

formül ile bir karşılaştırma yapmıştır. Watson [3] tarafından aynı amaçla yapılan bir çalışmada ise, kendisinin ampirik olarak elde ettiği

$$R = C \left[\frac{1-p}{p} - \frac{1-p_{cr}}{p_{cr}} \right] \quad (1.3)$$

formülü ile diğer araştırmacıların öne sürdüğü

$$\begin{aligned} \text{Balshin} & : R = R_0 (1-p)^A \\ \text{Ryskewitch} & : R = R_0 e^{-BP} \\ \text{Schiller} & : R = C \ln p_{cr}/p \end{aligned} \quad (1.4)$$

formüllerin bir karşılaştırması vardır. Son olarak Popovics [4] tarafından öne sürülen

$$R/R_0 = \left(1 - \frac{p}{p_{cr}}\right) \left(1 + 10 \cdot \frac{p}{p_{cr}}^\gamma\right)$$

formülü verebiliriz. Bu formüllerde, R basınç mukavemetini; p boşluk oranını; p_{cr} , R=0 durumuna karşı gelen boşluk oranını; R_0 , p=0 daki basınç mukavemetini ve de C, A, B, γ lar birer sabiti göstermektedir.

Bütün bu formüllerde boşluk geometrisini simgeleyen bir parametre bulunmadığı görülmektedir.

1.3. Betonun İnelastik Davranışı

Deneyler, bağlayıcı hamur yapısının betonun basınç altındaki davranışına önemli bir işlevi olduğunu ortaya koymuştur. Beton basınç gerilmeleri altında, belirli bir gerilme değerinden sonra çimento hamurunda var olan yapısal boşluklar (kürelimsi, kılcal, rötne çatlakları) civarında gerilme yığılmaları nedeniyle büyümeye başlar. Süreksizlik sınırı denen bu değerden sonra beton inelastik davranış gösterir (yük kaldırıldığında kalıcı şekil değiştirmeler olur). Çatlaklar giderek büyür ve çözülme sınırı denen bir gerilme değerine varıldığında betonda sürekli bir çatlak ağı oluşur. Bu değerden sonra betonun yük taşıması çatlak yüzeyleri arasındaki sürtünme ile sağlanır.

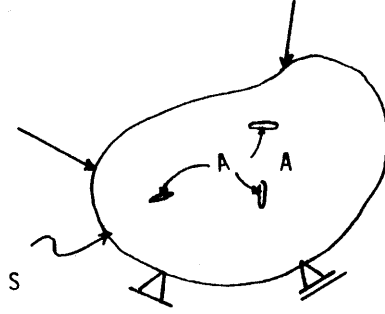
Betonun yukarıda açıklanan kırılma mekanizması ilk kez Brandtzaeg [5] tarafından farkedilmiştir. Aradan uzun bir süre geçtikten sonra Jones [6], taş yapılı malzemelerde ve bu arada betonda ses hızını ölçmek suretiyle artan gerilmeler altında çatlakların gelişmesini incelemiştir. Bu tarihten beri betonun inelastik davranışı pek çok araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Oktar'ın [7] betonun inelastik davranışını, mikro yapısına göre incelediği doktora çalışmasında geniş bir kaynak listesi de yer almaktadır.

2. AMAÇ

Bu çalışmanın asıl amacı betonun inelastik davranışın büyüyen çatlak yüzeyi alanına bağlamak olmuştur. Buradan hareketle mikro-yapı (boşluk geometrisi) gözönüne alınarak enerji dengesi teorisi [8], ve de parabolik gerilme-deformasyon ilişkisi ile betonun inelastik davranışını mikro yapıya bağlayan matematik bir model kurulmuştur. Bu matematik modelden betonun basınç mukavemetini yapısal boşluk oranı ve geometrisini simgeleyen kılcallık sabitine bağlayan bir formül elde edilmiştir.

3. ENERJİ DENGESİ TEORİSİ

Dış yükler altında dengede ve içinde dış yükler arttıkça büyüyen çatlakları içeren gevrek bir cismi göz önüne alalım.



Şekil - 1

Cismin termodinamik dengesi

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dV}{dt} + \frac{dT}{dt} + \frac{dD}{dt} \quad (3.1)$$

denklemleri ile verilir [8]. Burada t zamanı, U dış kuvvetlerin yaptığı işi, V depo edilmiş geri dönen işi (elastik iş) T kinetik enerjiyi ve D geri dönmeyen toplam enerjiyi (yüzey enerjisi, plastik şekil değiştirme işi, viskoz disipatif enerji) göstermektedir.

$S(t)$ ile cismin toplam yüzey alanını gösterirsek

$$S(t) = S_0 + A(t) \quad (3.2)$$

olur. $A(t)$ çatlak yüzeyi alanını, S_0 ise çatlak yüzeyi dışında kalan, zamanla değişmeyen yüzey alanını göstermektedir. Tüm D disipatif enerjisi, gelişen çatlakın komşuluğunda oluşmaktadır. Bu nedenle

$$\frac{dD}{dt} = \frac{dD}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = \frac{dD}{dA} \cdot \frac{dA}{dt} = \gamma_F \frac{dA}{dt} \quad (3.3)$$

dır [8]. Burada $dD/dA = \gamma_F$, birim çatlak alanı oluşturmak için gerekli enerjidir ve kırılma enerjisi denir. γ_F , yüzey enerjisinden farklı olup

onun 10^3 katı civarındadır.

Kuvvet belli bir değerde değişmez tutulduğunda, çatlaklar ilerlemiyorsa, sistem yarı durgun veya yarı kararlıdır denir ve $dT/dt=0$ olur. (3.1) denklemi bu durumda

$$\frac{dU}{dA} \frac{dA}{dt} = \frac{dV}{dA} \frac{dA}{dt} + \frac{dD}{dA} \frac{dA}{dt} \quad (3.4)$$

şeklinde yazılır ve (3.3) denklemi ile de

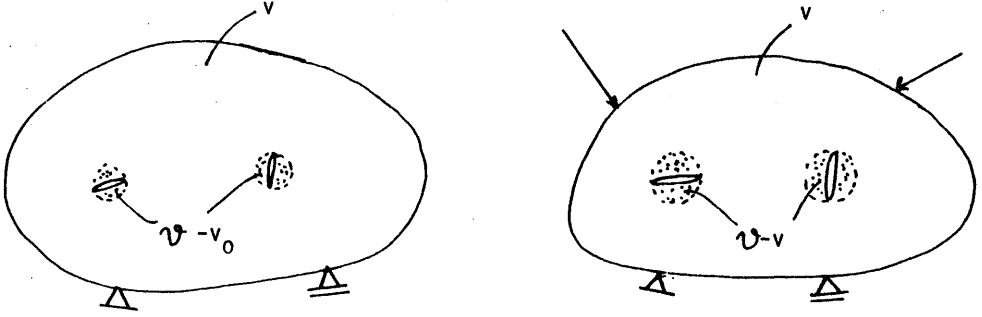
$$\frac{d}{dA} (U-V) = \gamma_F \quad (3.5)$$

denklemi elde edilir. (3.5) in entegrasyonu

$$U-V = \gamma_F (A-A_0) = \gamma_F A_0 \left(\frac{A}{A_0} - 1 \right) \quad (3.6)$$

denklemini verir. Burada A_0 , $U=V=0$ iken cismin içindeki yapısal çatlak yüzeyi alanıdır.

Taşdemir ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalar [9,10], basınç etkisinde, betondaki çatlak ilerlemesi olayında, çatlak yüzeylerinin birbirinden açılması şeklindeki (Mod I) in dominant olduğunu, çatlak yüzeyleri üzerinde makaslama şeklindeki (Mod II) nin (Mod I) in yanında ihmal edilebileceğini göstermektedir. Bu durumda $\mathcal{U}$ ile betonun toplam hacmini v ile de belli bir gerilme durumundaki çatlakların civarı dışındaki kalan ve gerilme alanı içeren hacmi gösterirsek, çatlak civarında kalan belirli bir hacim, hemen hemen gerilme alansız durumda olacaktır [11] (bu bölgede $\sigma_{ij}=0$ dır). v_0 : v nin başlangıçtaki değerini, yani betona kuvvet uygulanmadan önce gerilme alanı oluşabilecek hacmi gösterebilir. 0 halde $\mathcal{U}-v_0$ ile $\mathcal{U}-v=H$ sırasıyla betonun kuvvet uygulanmadan ve kuvvet



Şekil - 2

uygulandıktan sonraki gerilme alansız hacimleri gösterecektir. (Şekil-2). Belli bir yükleme durumunda toplam çatlak yüzeyi alanı A ile bu çatlak yüzeyi civarında oluşan gerilme alansız H hacmi arasında μ bir sabiti göstermek üzere

$$A^{3/2} = \mu H = \mu(\sigma - v) \quad (3.7)$$

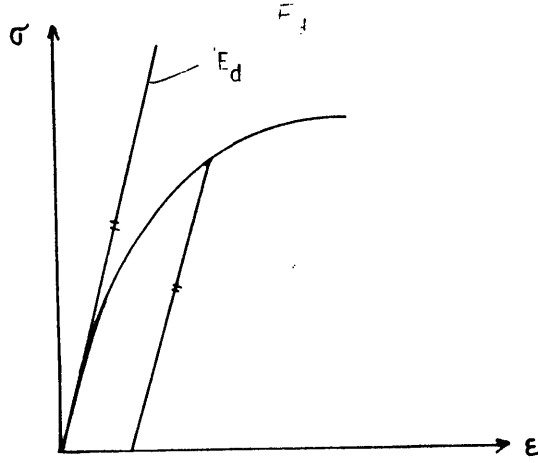
geometrik ilişkisi yazılabilir. Buradan hemen

$$A/A_0 = \left(\frac{\sigma - v}{\sigma - v_0} \right)^{2/3} \quad (3.8)$$

elde edilir.

4. EKSENEL BASINÇ

Betonun eksenel basınç altında gerilme deformasyon diyagramını gözönüne alalım (Şekil-3). Beton numunesinin görünen hacmi $\mathcal{U}$ ise, dış kuvvetlerin yaptığı iş



Şekil - 3

$$U = \left\{ \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon \right\} V \quad (4.1)$$

olur. Geri dönen elastik V işi

$$V = \left\{ \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E_{et}} \right\} V \quad (4.2)$$

olur. Burada E_{et} etkin elastiklik modülü olup (E_d) dinamik elastiklik modülünden biraz küçüktür. Ancak burada yapılacak matematik işlemlerde bu farkın etkisi ihmal edilebileceği için $E_{et} \approx E_d$ alınacaktır. Bu durumda (3.5), (4.1) ve (4.2) denklemleri göz önüne alınarak

$$\int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon - \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E_d} = \gamma_F \frac{A_0}{A} \left(\frac{A}{A_0} - 1 \right) \quad (4.3)$$

elde edilir. Betonun σ - ϵ diyagramını çok iyi bir yaklaşımla $\sigma = R(\epsilon/\epsilon_m)^{2-\epsilon/\epsilon_0}$ Voelmy parabolü ile gösterilebileceğine göre (4.3) ve (3.8)

denklemleri yardımıyla bir takım hesaplar sonunda

$$\gamma_F a_0 [(1/(1-v_0/\gamma))^{2/3}-1] = 5/12 R \epsilon_0 \quad (4.4)$$

denklemini elde edilir. Burada a_0 birim hacimdeki yapısal çatlak yüzeyi alanı yoğunluğunu göstermektedir. (3.4) denkleminde

$$R = \frac{12}{8} \gamma_F \frac{a_0}{\epsilon_m} [(1/(1-v_0/\gamma))^{2/3}-1] \quad (4.5)$$

basınç mukavemeti elde edilir. Öte yandan betonun kırılma anında $\epsilon = \epsilon_m$ ve $a = a_m$ olur. a_m kırılma anında oluşan çatlak yüzeyi alanı yoğunluğudur. (3.8) denklemini bu durumda

$$\frac{a_0}{a_m} = (1 - \frac{v_0}{\gamma})^{2/3} \quad (4.6)$$

olur. Yapılan çalışmalar, kırılma anındaki birim deformasyonla çatlak yüzeyi alanı yoğunluğu arasında bir paralelliğin varolduğunu göstermektedir [12]. Burada, bu paralelliğin n bir sabit olmak üzere

$$\epsilon_m = n a_m \quad (4.7)$$

şeklinde olduğunu varsayıp, (4.7) yi (4.5) de yerine koyacak olursak

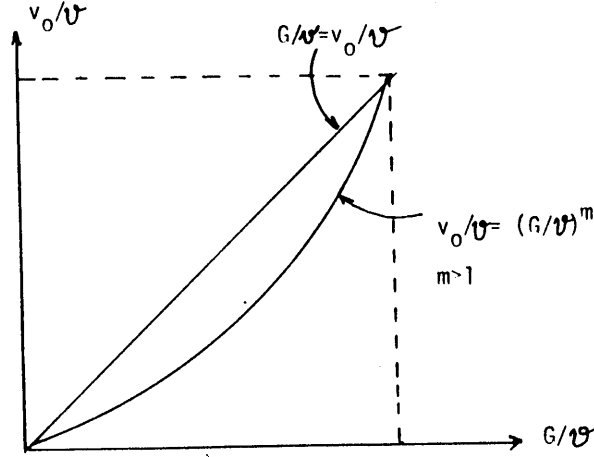
$$R = M [1 - (1 - \frac{v_0}{\gamma})^{2/3}] \quad (4.8)$$

elde edilir. Burada $M = \frac{12}{5} \frac{\gamma_F}{n}$ dır.

Yapısal tüm boşlukların dışında kalan hacmi G ile gösterelim. $1 \geq G/\gamma \geq v_0/\gamma$ olur. Öte yandan $G/\gamma = 0$ da $v_0/\gamma = 0$ ve $G/\gamma = 1$ de $v_0/\gamma = 1$ olduğu düşünülürse

$$v_o/v = (G/v)^m, \quad m \geq 1 \quad (4.9)$$

yazılabilir (Şekil-4).



Şekil - 4

(4.9) eşitliği (4.8) denkleminde yerine konacak olursa

$$R = M \{1 - [1 - (G/v)^m]^{2/3}\} \quad (4.10)$$

elde edilir. $1 - G/v = p$ boşluk oranı olduğuna göre (4.10) denkleminde

$$R = M \{1 - [1 - (1-p)^m]^{2/3}\} \quad (4.11)$$

elde edilir. Bu denklemde M , $p=0$ haline karşı gelen en büyük basınç mukavemeti olmaktadır. m ise (Şekil-4) den de görüleceği gibi yapısal boşlukların geometrisi ne bağlı bir parametredir. Örneğin küresel boşluk halinde bu boşluğun civarında gerilme alansız bölge olmadığı için $G/v = v_o/v$ dir ve $m=1$ olur. Boşluklar küresellikten uzaklaştıkça m de 1 değerinden büyük değerler almaya başlar ve basınç mukavemeti azalır. Kısaca betonun basınç mukavemeti (p) boşluk oranının ve boşluğun geometrisini simgeleyen (m) nin fonksiyonudur. Bu iki değişkenin büyümesi basınç mukavemetini azaltmaktadır.

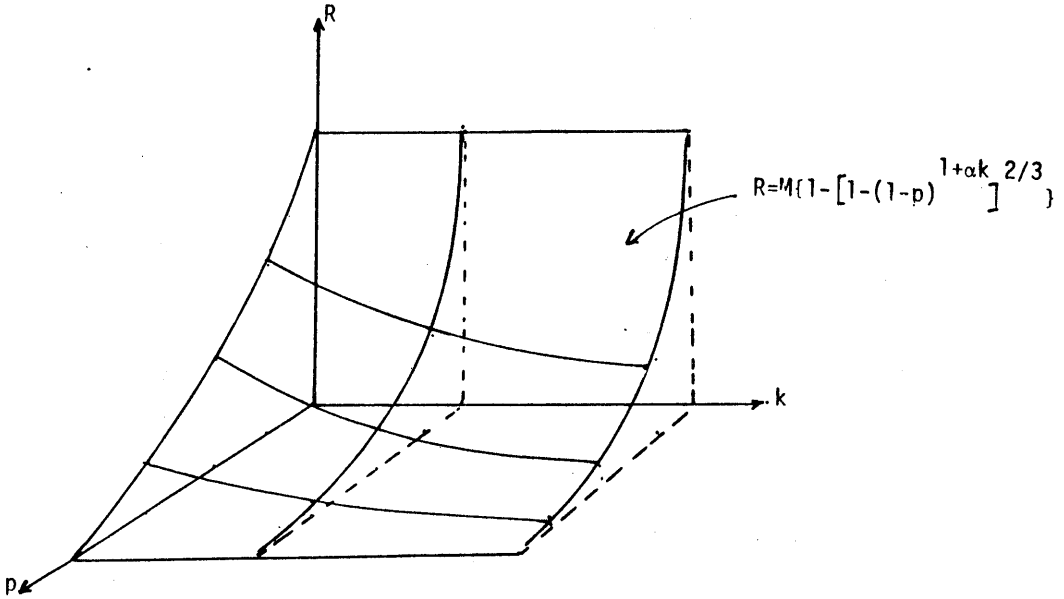
Boşluk geometrisi betonun fiziksel bir büyüklüğü olan kılcallık sabiti ile belirtilebilir. Bu amaçla m ile k kılcallık sabiti arasında en basit bir denklemle

$$m = 1 + \alpha k \quad (4.12)$$

şeklinde doğrusal bağıntının var olduğunu varsayabiliriz. Bu durumda (4.11) denklemi

$$R = M \{1 - [1 - (1-p)^{1+\alpha k}]^{2/3}\} \quad (4.13)$$

Şeklini alır. Böylece betonun basınç mukavemeti deneysel olarak belirlenebilen iki fiziksel büyüklüğün (p ve k nın) fonksiyonu olarak ifade edilmiş olur (Şekil-5).

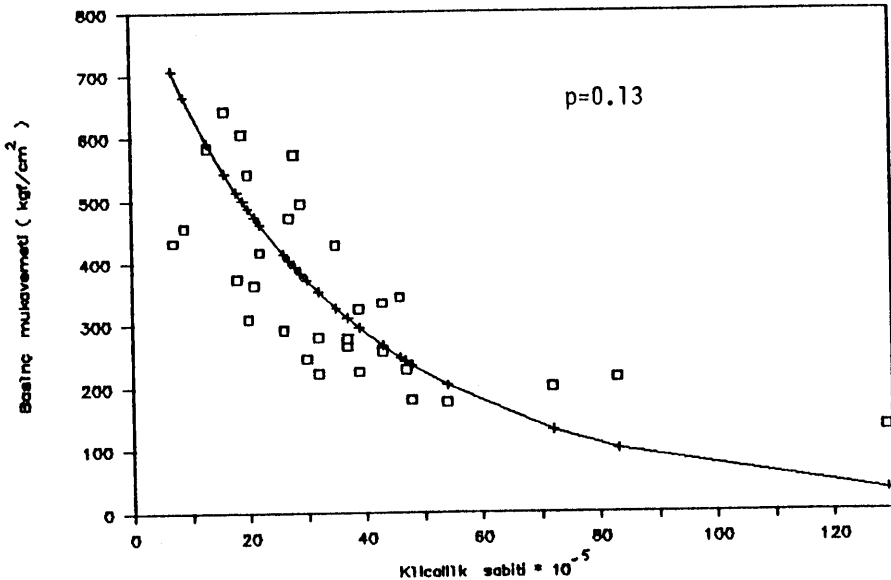


Şekil - 5

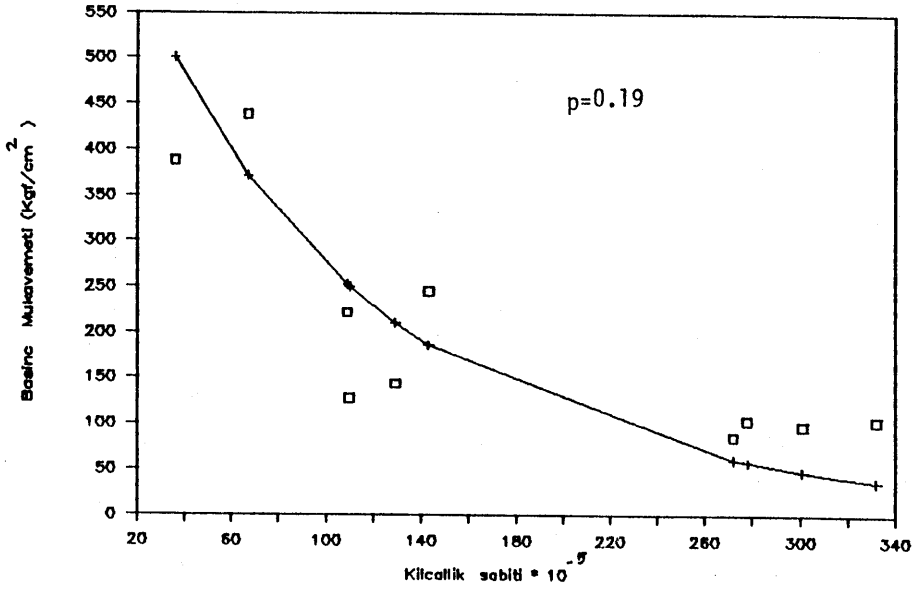
5. SABİTLERİN ELDE EDİLiŞİ

Uyan [13], beton ve harçlarda kılcallık olayını incelerken değişik granülometrik birleşim ve dozajlarda beton üretilmiş ve bunların 28 ve 90 günlük basınç mukavemetlerini, boşluk oranlarını ve kılcallık sabitlerini saptamıştır.

Bu çalışmanın sayısal sonuçlarından yararlanmak amacıyla yapılan incelemede 31 adet değişik tür betonun boşluk oranlarının $0,11 \leq p \leq 0,15$ arasında yığıldığı ve ortalama olarak 0,13; 10 adet diğer bir grup betonun da $0,17 \leq p \leq 0,21$ arasında yığıldığı ve ortalama olarak 0,19 olduğu saptanmıştır. Her bir grup için ayrı ayrı kılcallık sabiti-basınç mukavemeti $\{(k,R)\}$ noktaları k-R eksen takımında işaretlenmiştir. Bilgisayarda deneme yanılma yöntemi ile (4.13) denkleminde karşı gelen k-R eğrisi, işaretlenmiş noktalar arasından en küçük hatayla geçecek şekilde denklemdaki M ve α değişmezleri bulunmuştur. Bu değişmezler birinci grup betonlar için $M=1200 \text{ kgf/cm}^2$, $\alpha=0,17 \times 10^{-5}$ (Şekil-6), ikinci grup betonlar için $M=1100 \text{ kgf/cm}^2$, $\alpha=0,04 \times 10^{-5}$ (Şekil-7) dir. Her iki grup için M, yani en büyük basınç mukavemeti birbirlerine çok yakındır. Kılcallık ile ilgili değişmezi ise oldukça farklıdır. Bu farklılık acaba ikinci grup betonların sayılarının azlığından mı yada boşluk oranı arttıkça ($p=0,19$) kılcallığın azalmasından mı ileri gelmektedir? sorusu ile karşı karşıya geldiğimizi görmekteyiz. Bu sorunun yanıtını burada eldeki verilerle vermek mümkün değildir.



Şekil-6



Şekil-7

6. SONUÇ

Bu çalışmada betonun basınç mukavemetini, sertleşmiş çimento hamurundaki boşluk oranı kadar, boşluk geometrisinin de etkilediği gerçeği [7], matematik bir modelle ortaya konmuş ve bu çalışmanın [13] deney sonuçlarıyla da kanıtlanmıştır. Böylece betonun basınç mukavemetini sadece boşluk oranına bağlayan formüllerin yetersiz olduğu anlaşılmış olmaktadır. Ayrıca yapısal boşluk oranını azaltmak kadar onları küreleştirmenin de betonun basınç mukavemetini önemli derecede arttıracak anlaşılmaktadır.

7. KAYNAKLAR

- [1] Moranville, M.-Regourd, "Microstructure des bétons à hautes performances", Les Bétons à hautes performances Du Matériau à L'ouvrage, Presses de l'école Nationale des Ponts et Chaussées.
- [2] Hansen, C.T., "Cracking and fracture of concrete and cement paste", Causes, Mechanism and Control of Cracking in Concrete, Acı Publication Sp.20, 1968.

- [3] Watson, K.L., "A simple relationship between the compressive strength and porosity of hydrated portland cement" Cement and Concrete Research, Vol.11, 1981.
- [4] Popovics, S., "A hypothesis concerning the effects of macroporosity on mechanical properties of concrete", SEM/RILEM International Conference on Fracture of Concrete and Rock, Huston, Texas, 1987.
- [5] Brandtzaeg, A., "Faillure of a material composed of non isotropic elements", Detkgl, Norske (Trodhjem), Vid. Sels, Skrifter No.2, 1927.
- [6] Jones, R., "A method of studying the formation of cracks in a material subjected to stresses", British Journal of Applied Physics, London, 3, 1952, No.7.
- [7] Oktar, O.N., "Bağlayıcı hamurun yapısının betonun kısa süreli inelastik davranışındaki etkisi", Doktora Tezi, İTÜ İnş. Fak., 1977.
- [8] Erdoğan, F., "Crack propagation theories", Fracture, by Liebowitz, Academic Press, Vol.2, 1968.
- [9] Taşdemir, M.A., Maji, A.K., and Shah, S.P., "Crack propagation in concrete under compression", Journal of Engineering Mechanics, Vol.116, No.5, 1990.
- [10] Maji, A.K., Taşdemir, K.A., and Shah, S.P., "Mixed mode crack propagation in quasi brittle materials", In press, Engineering Fracture Mechanics, 1990.
- [11] Knott, J.F., "Fundamental of fracture mechanics", Buttworth, London, 1973.
- [12] Taşdemir, M.A., "Taşıyıcı hafif agregalı betonların elastik ve elastik olmayan davranışı", Doktora Tezi, İTÜ İnş. Fak., 1982.
- [13] Uyan, M., "Beton ve harçlarda kılcallık olayı", Doktora Tezi, İTÜ İnş. Fak., 1974.