

## EĞİLME ETKİSİNDEKİ YÜKSEK PERFORMANSLI BETONARME KESİTLERDE GERİLME BLOĞU PARAMETRELERİ

Selim PUL, Metin HÜSEM, Ertekin ÖZTEKİN

**Özet -** Yüksek performanslı beton konusunda bir çok araştırma yapılmış olmasına rağmen bu betonun özellikleri henüz geleneksel betonunki kadar belirlenebilmiş değildir. Yönetmeliklerde beton yapıların projelendirilmesi için kullanılmakta olan bağıntı ve hükümlerin bir çoğu basınç dayanımı yaklaşık 40MPa'a kadar olan betonlar üzerinde yapılmış olan deneylerden elde edilen verileri temel almaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, eğilme etkisindeki yüksek performanslı betonarme elemanların hesabı için yüksek performanslı betonların eşdeğer dikdörtgen gerilme dağılım parametreleri gerçek  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrileri kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüksek performanslı betonlar için hesaplanan dikdörtgen gerilme bloğu parametrelerinin deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğunu ve yüksek performanslı betonarme elemanların hesabında kullanılabileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler -** Yüksek Performanslı Beton, Gerilme-Şekildeğiştirme Modeli, Hognestad Modeli, Modifiye Hognestad Modeli, Basınç Dayanımı, Dikdörtgen Gerilme Bloğu Parametreleri

**Abstract -** Despite so many researches have been performed on high performance concrete, the properties of this concrete could not determined as well as those of the ordinary concrete. There have been a lot of equations and rules in the codes which are used in the design of concrete structures. They are obtained from experimental studies made on concrete that have compressive strength of less than about 40 MPa. It is not exactly known that they could be used in the design of structures constructed by using high performance concrete. Therefore in this study, stress-strain and equivalent block parameters were obtained from experimental stress-strain diagrams for calculation of high performance reinforced concrete beams in flexure. The conclusions obtained from this study showed that calculations of high performance concrete which obtained from

determined rectangular stress block parameters are closer to experimental results. So, this model and parameters can be use in calculations of high performance reinforced concrete members.

**Keywords -** High Performance Concrete, Stress-Strain Model, Hognestad's Model, Modified Hognestad's Model, Compressive Strength, Rectangular Stress Block Parameters.

### I. GİRİŞ

Betonarme, kendisini oluşturan malzemelerin kalitesindeki artışa paralel olarak gelişmiş ve bugün yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesi haline gelmiştir. Artan ihtiyaçlara paralel olarak bazı katkı maddelerinin betonda kullanılmaya başlamasıyla bugün "yüksek performanslı beton" diye tanımlanan ve dayanımı 100MPa'ı aşan betonlar artık kolayca üretilebilmektedir. Dolayısıyla, bu betonlar öngerilmeli beton ve betonarme yapılarda, özellikle yüksek yapılarda, kullanım alanı bulmuş ve bu tür yapılarda projelendirme kriterlerini değiştirmeye zorlayan bir hale gelmiştir. Bu nedenle bu çalışmada, eğilme etkisindeki betonarme elemanların beton basınç bloğunu tanımlayan parametreler, deneysel  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrilerinden yararlanılarak, belirlenmeye çalışılmıştır.

Yüksek performanslı betonun tanımı, zamana, kullanıldığı bölgeye ve yaygın olan üretim teknolojisine göre değişmektedir. Örneğin, 1950'li yıllarda standart silindir beton numunelerinin karakteristik basınç dayanımı 34MPa olan betonlar "yüksek performanslı beton" olarak tanımlanmaktaydı. 1960'lı yıllarda ise ABD'de silindir dayanımı 41MPa ile 52MPa arasında olan betonlar ticari amaçlı olarak üretilmiştir. 1970'lerin ilk yıllarında ise bu betonların basınç dayanımı 60MPa'a kadar ulaşabilmiştir. Yakın geçmişte ise basınç dayanımı 80MPa ile 100MPa arasında değişen yüksek performanslı beton, yekpare prefabrike ve ön gerilmeli beton yapılarda kullanılmaya başlanmıştır. Çok yüksek dayanımlı

agregalar kullanarak üretilen betonlarda ise 250MPa'lık dayanıma ulaşılabilmektedir [1,2,3,4].

Yüksek performanslı betonların, yüksek dayanımlı agrega ve çimento, su, mineral ve kimyasal katkı malzemeleri kullanılarak üretilbildiği, bu üretimde ise kimyasal katkı olarak süper akışkanlaştırıcılar, mineral katkı maddeleri olarak da, çimento tanelerinden daha küçük ve puzolanik özellikte silis dumanı, kalker unu, uçucu kül gibi katkı maddelerinin kullanıldığı bilinmektedir.

## II.GERİLME-ŞEKİLDEĞİŞTİRME MODELİNİN BELİRLENMESİ

### II.1 Deneysel Çalışma

İTÜ Yapı ve Malzeme Laboratuvarı'nda sekiz seri yüksek performanslı beton üzerinde yapılan deneyler sonucunda bu betonlara ait gerilme-şekildeğiştirme modeli elde edilmiştir[5]. Granit agrega ile üretilen ( $d_{max}=16mm$ ) bu betonlara ait ortak granülometrik bileşim Tablo 1'de, mekanik özellikler ve karışım oranları ise Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 1. Agrega granülometrik bileşimi

| Granülometrik sınıflar (mm) | Topl. Kütlenin yüzdesi |
|-----------------------------|------------------------|
| 0 - 0,25                    | 8                      |
| 0,25 - 0,50                 | 7                      |
| 0,50 - 1,0                  | 7                      |
| 1,0 - 2,0                   | 10                     |
| 2,0 - 4,0                   | 15                     |
| 4,0 - 8,0                   | 23                     |
| 8,0 - 16,0                  | 30                     |

Tablo 2. Üretilen betonların mekanik özellikleri ve karışım oranları

| Seri | $f_c$ (MPa) | $E_c$ (MPa) | $10^3 \epsilon_{cu}$ (mm/mm) | Agrega (kg/m <sup>3</sup> ) | Su (kg/m <sup>3</sup> ) | Çimento* (kg/m <sup>3</sup> ) | S/Ç** | SD (kg/m <sup>3</sup> ) | SAK*** (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------|-------------|-------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------|-------------------------|-----------------------------|
| H1   | 60          | 33500       | 2.40                         | 1704                        | 193                     | 500                           | 0.35  | 50                      | 11                          |
| H2   | 66          | 35200       | 2.45                         | 1716                        | 187                     | 500                           | 0.34  | 50                      | 11                          |
| H3   | 70          | 36000       | 2.55                         | 1730                        | 182                     | 500                           | 0.33  | 50                      | 11                          |
| H4   | 75          | 37500       | 2.60                         | 1769                        | 165                     | 500                           | 0.30  | 50                      | 16                          |
| H5   | 81          | 38000       | 2.80                         | 1796                        | 154                     | 500                           | 0.28  | 50                      | 16                          |
| H6   | 84          | 39400       | 2.55                         | 1809                        | 149                     | 500                           | 0.27  | 50                      | 22                          |
| H7   | 89          | 40700       | 2.70                         | 1821                        | 143                     | 500                           | 0.26  | 50                      | 22                          |
| H8   | 94          | 43000       | 2.75                         | 1835                        | 138                     | 500                           | 0.25  | 50                      | 22                          |

\* PÇ-42.5      \*\* Su / (çimento+silis dumanı)      \*\*\* Sikament-FF

toplam basınç kuvveti ve bu kuvvetin uygulama noktası deneysel çalışmalarda ile aynı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Hognestad [6]'ın geleneksel betonun  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisi için önerdiği model;

$$\sigma_c = f_c \left[ \frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{cu}} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

ifadesiyle verilmektedir. Bu ifadede  $2\epsilon_c / \epsilon_{cu}$  yerine  $k(\epsilon_c / \epsilon_{cu})$  ve  $(\epsilon_c / \epsilon_{cu})^2$  yerine de  $(k-1)(\epsilon_c / \epsilon_{cu})^2$  yazılırsa, yüksek performanslı beton için  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisini temsil eden (1) nolu ifade aşağıdaki gibi değiştirilmiştir olmaktadır:

$$\sigma_c = f_c \left[ k \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}} - (k-1) \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Bu ifadede,  $60MPa \leq f_c \leq 94MPa$  için;

$$k = 2 - \frac{f_c - 40}{70} \quad (3)$$

olarak alınmaktadır. CEB[8] de  $\epsilon_{cu}$  için önerilen eşitlik deneysel çalışma sonuçlarına göre aşağıda verildiği gibi yeniden düzenlenmiştir[7]. ( $60 MPa \leq f_c \leq 94 MPa$ )

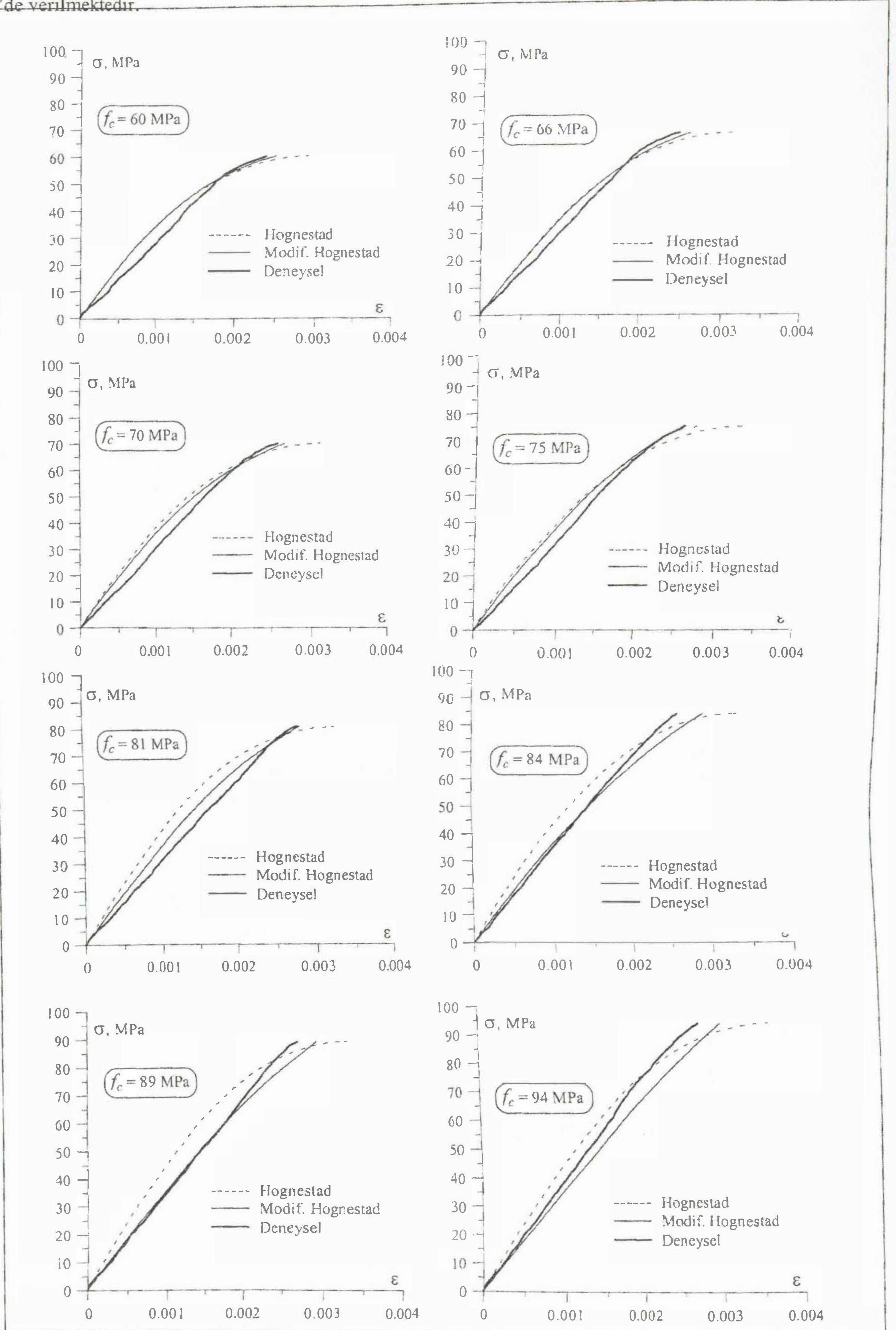
$$\epsilon_{cu} = [2.2 + 0.015(f_c - 40)]10^{-3} \quad (4)$$

Yüksek performanslı betonun  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisinin geleneksel betonunkinden çok daha doğrusal olduğu bilinmektedir.

Yüksek performanslı beton için Hognestad [6]'ın önerdiği model üzerinde bazı düzenlemeler yapılmıştır. Bu düzenlemeler,  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisinin altında kalan alan,

Bu yüzden, (3) nolu ifadeyle hesaplanan  $k$  sayısı yardımıyla bu doğrusallık (2) nolu ifadeyle sağlanmaya çalışılmıştır. Hognestad'ın önerdiği ve yeniden

düzenlenen  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrileri, deneysel eğrilerle birlikte,  
Şekil 1'de verilmektedir.



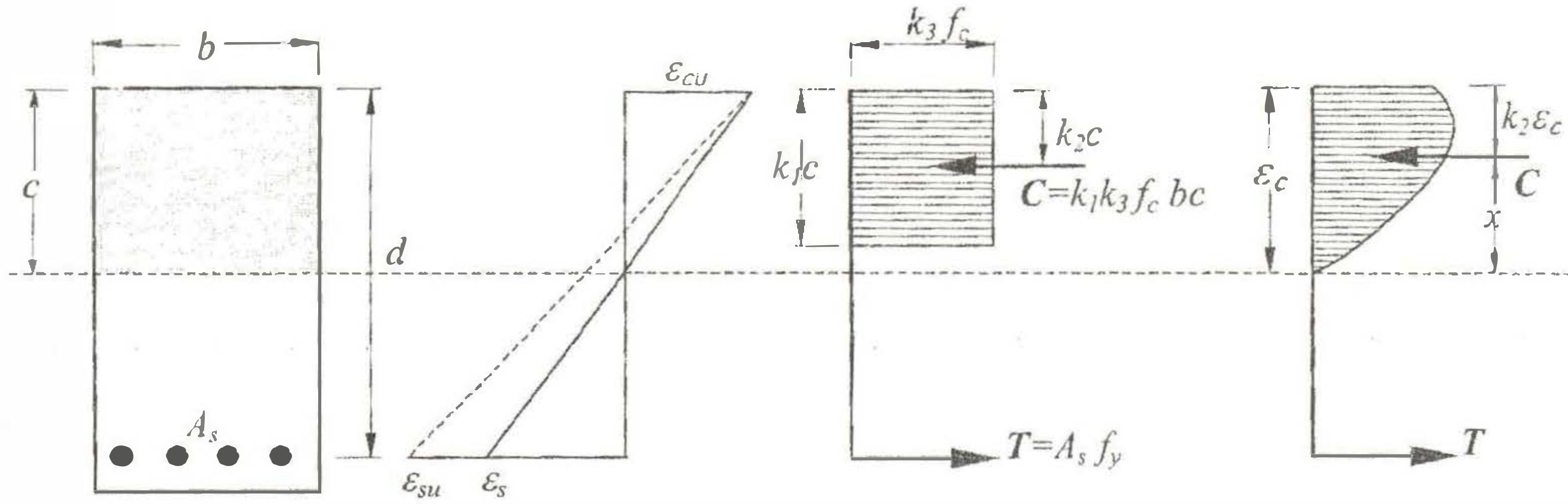
Şekil 1. Yüksek performanslı betonlara ait karşılaştırmalı  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrileri

### III. GERİLME BLOĞU PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Eğilme etkisindeki bir betonarme kesitin basınç bölgesindeki gerilme dağılımının merkezi basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrisi gibi olduğu bilinmektedir. Ancak betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisini bir çok değişken etkilediği için tek ve kesin bir gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin önerilmesi mümkün olmamaktadır. Betonarme hesaplarda yazılacak denge denkleminde, basınç gerilmesi dağılımının geometrisinden daha çok, bu dağılımın altında kalan alan ve bu alanın ağırlık merkezinin yeri önem taşımaktadır. Bu yüzden aynı alanı ve ağırlık merkezini verecek ve hesaplamalarda da büyük kolaylık sağlayacak, TS500 [9] ve ACI318 [10] ve tarafından da önerilen, en basit gerilme dağılım modeli olan, dikdörtgen gerilme dağılımının kullanılması bu çalışmada da tercih edilmektedir(Şekil 2).

Bu çalışmada yüksek performanslı betonların kesit hesaplarına ait gerilme şekildeğiştirme parametrelerini elde etmek için yeni bir gerilme-şekildeğiştirme bloğu oluşturulmuştur.

Elde edilen gerilme-şekildeğiştirme bloğu yardımıyla yüksek performanslı betonarme kesitlerin basınç bölgesindeki gerilme dağılımını belirlemek için (2) nolu bağıntıyla belirlenen gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan, ve ağırlık merkezinin hesaplanması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamındaki yüksek performanslı betonları temsil eden gerilme-şekildeğiştirme bağıntısının  $\epsilon_c$ 'ye göre integre edilmesiyle gerilme-şekildeğiştirme eğrisi altında kalan alan  $F_a$ , (6) nolu bağıntı ile hesaplanır[4]. Ağırlık merkezi ise Şekil 3'de verildiği gibi,  $\sigma-\epsilon$  eğrisi  $\Delta\epsilon_c=10^{-5}$  birim uzunluğunda yamuk şeklindeki alanlara bölünerek belirlenmiştir.



Şekil 2. Deneysel ve eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğu ile doğrusal birim şekildeğiştirme dağılımı [11]

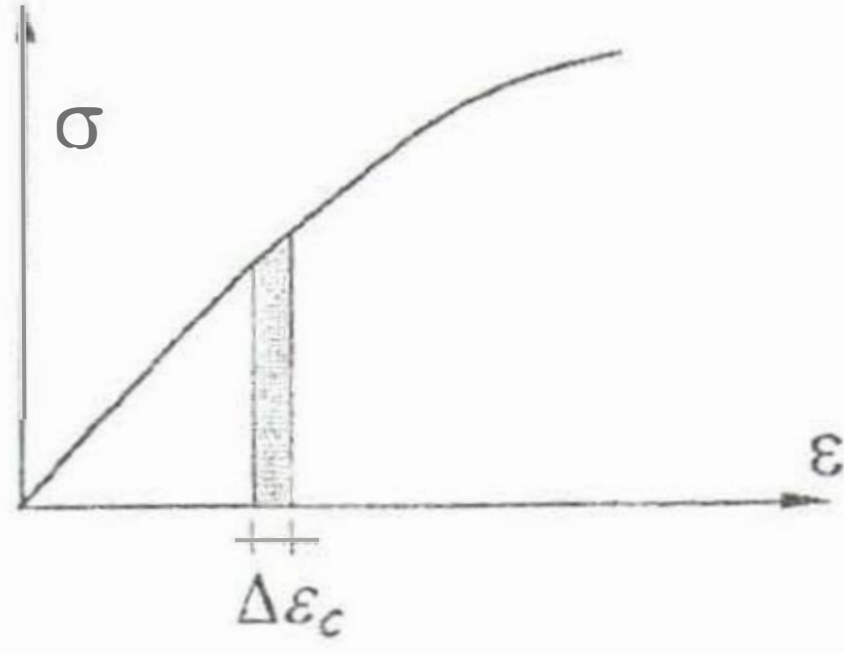
Geleneksel betonarme kirişler için TS500[9] ve ACI318[10]'de verilen hesap yöntemi, yüksek performanslı betonlar için de geçerli olabilmektedir. Ancak dikdörtgen gerilme bloğunu tanımlayan  $k_1$ ,  $k_2$  ve  $k_3$  parametrelerinin yüksek performanslı betonlar için yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. Bazı yönetmelik ve araştırmacılar tarafından bu parametreler için önerilen bağıntılar Tablo 3'te verilmektedir.

$$F_a = \int_{\epsilon_c=0}^{\epsilon_{cu}} f_c \left[ k \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}} - (k-1) \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}} \right)^2 \right] d\epsilon_c \quad (5)$$

$$F_a = f_c \left( k \frac{\epsilon_c^2}{2\epsilon_{co}} - (k-1) \frac{\epsilon_c^3}{3\epsilon_{co}^2} \right) \quad (6)$$

Tablo 3. Dikdörtgen gerilme bloğu parametreleri

| Referans                  | $k_1 (=2k_2)$                                 | $k_3$   |
|---------------------------|---|---|
| TS500 [9] ve ACI318 [10]  | $1.09-0.008f_c$ ( $0.85 \geq k_1 \geq 0.65$ ) | 0.85  |
| EC2 [12]                  | $0.9-f_c/500$                                 | 0.85  |
| CSA94 [13]                | $0.97-0.0025f_c \geq 0.67$                    | $0.85-0.0015f_c \geq 0.67$                    |
| NZS95 [14]                | ACI318 ile aynı                               | $1.07-0.004f_c$ ( $0.85 \geq k_3 \geq 0.75$ ) |
| Attard ve Steward [15]    | $1.0948f_c^{-0.091} \geq 0.67$                | $0.6470f_c^{0.0324} \geq 0.58$                |
| İbrahim ve MacGregor [16] | $0.95-f_c/4000 \geq 0.70$                     | $0.85-f_c/800 \geq 0.725$                     |
| Bing, ve diğ. [17]        | ACI318 ile aynı                               | $0.85-0.004(f_c-55) \geq 0.75$                |
| Azizinamini, ve diğ. [18] | ACI318 ile aynı                               | $0.85-0.0073(f_c-69) \geq 0.6$                |



Şekil 3.  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisinin yamuk alanlara bölünmesi

Bu çalışmada kullanılan dikdörtgen gerilme bloğu modelini tanımlayan parametreler aşağıdaki bağıntılar ile hesaplanmaktadır;

$$k_2 = (\epsilon_c - x) / \epsilon_c \quad (7)$$

$$k_1 = 2 k_2 \quad (8)$$

$$k_3 = F_a / f_c k_1 \epsilon_c \quad (9)$$

Burada  $x$ , Şekil 2'den de görüleceği gibi, ağırlık merkezinin orijine olan uzaklığıdır. Herhangi bir kesitte tarafsız eksen derinliği  $c$  'nin hesabı için daha önce de belirtildiği gibi basit eğilme etkisindeki kesitin içerisindeki birim şekildeğiştirme dağılımının doğrusal olduğu varsayımı yapılmaktadır (bkz Şekil 2). Bu da tarafsız eksen derinliği olan  $c$  'nin;

$$c = \epsilon_c d / (\epsilon_c + \epsilon_s) \quad (10)$$

bağıntısıyla hesaplanabileceğini göstermektedir. Burada beton ve donatı şekildeğiştirmelerinin  $1 \times 10^{-5}$ 'lik adımlarla artırılmak suretiyle tarafsız eksen derinliğinin iterasyonla hesaplandığını belirtmek uygun olmaktadır. Ayrıca bu çalışmada 7, 8 ve 9 nolu bağıntılarla verilen dikdörtgen gerilme bloğu parametreleri, basınç dayanımı 60 MPa ile 94 MPa arasında olan yüksek performanslı betonlar için hesaplanmıştır. Bu parametreler ile beton basınç dayanımı arasında yapılan regresyon analizi sonucunda aşağıda verilen bağıntılar elde edilmiştir.

$$k_1 = -0.0012 f_c + 0.805 \quad (11)$$

$$k_3 = -0.002 f_c + 0.964 \quad (12)$$

$$k_1 k_3 = -0.0024 f_c + 0.762 \quad (13)$$

Bu bağıntılarda,  $k_1$ ,  $k_3$ , ve  $k_1 k_3$  için hesaplanan korelasyon katsayıları sırasıyla 0.990, 0.985 ve 0.999 dur. Şekil 5'te ise, bu çalışmada ortaya konulan ve diğer bazı yönetmelik ve araştırmacılar tarafından önerilen dikdörtgen gerilme bloğu parametrelerinin karşılaştırılması verilmektedir.

#### IV. SONUÇLAR

Bu çalışma, yüksek performanslı betonarme kiriş hesaplarının yapılabilmesi için uygun  $\sigma$ - $\epsilon$  ve eşdeğer gerilme dağılım modeli parametrelerini, söz konusu betonun deneysel  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrilerinden yararlanılarak, belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmadan çıkartılabilecek bazı sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

- Basit eğilme etkisindeki geleneksel betonarme elemanlar için kullanılan gerilme dağılım parametrelerinin yüksek performanslı betonarme elemanlarda kullanılması emniyetsiz tarafta sonuçlar vermektedir.

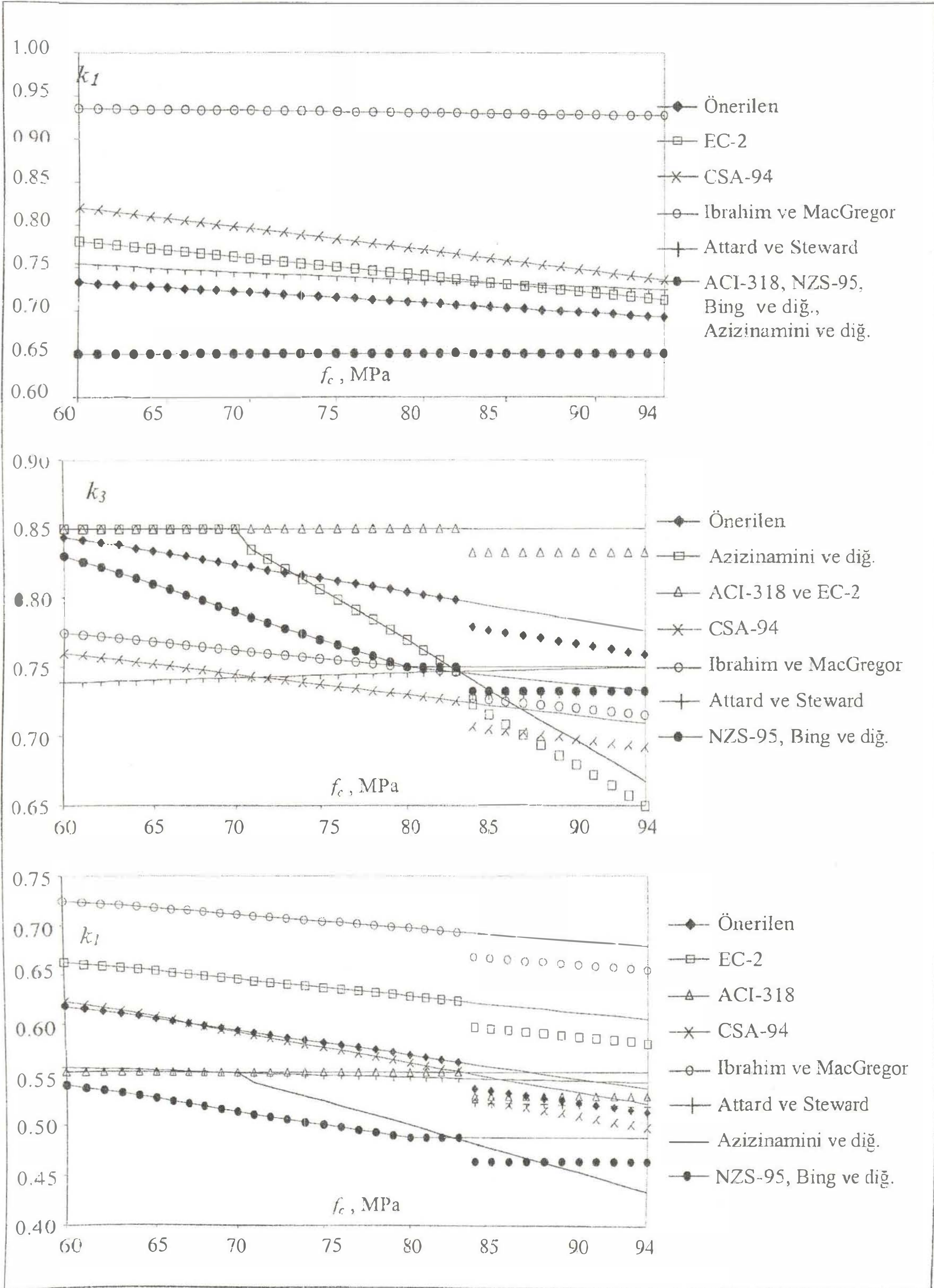
- Geleneksel betonlar için Hognestad tarafından önerilen  $\sigma$ - $\epsilon$  modeli yüksek performanslı betonlar için, deneysel  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrilerinden yararlanılarak, yeniden düzenlenmiştir.

- Yüksek performanslı betonun  $\sigma$ - $\epsilon$  modeli yardımıyla eşdeğer dikdörtgen gerilme dağılım parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler betonun gerçek  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisi kullanılarak hesaplanan parametrelere literatürde verilenlerden daha yakın olmaktadır.

Özetle bu çalışmada, yüksek performanslı betonlar için deneysel veriler kullanılarak bir  $\sigma$ - $\epsilon$  modeli ve bu model yardımıyla da eğilme etkisindeki betonarme elemanların hesabının yapılabilmesi için eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğu parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen parametreler deneysel  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrilerinden elde edilenlerle uyum içindedir. Bu da söz konusu parametrelerin eğilme etkisindeki yüksek performanslı betonarme elemanların hesabında kullanılabileceğini göstermektedir.

#### SEMBOLLER

|                 |  |
|-----------------|--|
| $A_s$           | = Çekme Bölgesindeki donatı alanı            |
| $b$             | = Kesit genişliği                            |
| $c$             | = Tarafsız eksen derinliği                   |
| $d$             | = Faydalı yükseklik                          |
| $C$             | = Basınç kuvveti                             |
| $E_c$           | = Beton elastisite modülü                    |
| $F_a$           | = Gerilme şekildeğiştirme eğrisinin alanı    |
| $f_c$           | = Beton basınç dayanımı                      |
| $F_s$           | = Donatıdaki çekme kuvveti                   |
| $f_{yd}$        | = Donatı çeliğinin akma dayanımı             |
| $k$             | = Sabit                                      |
| $k_1, k_2, k_3$ | = Dikdörtgen gerilme bloğu parametreleri     |
| SAK             | = Süper akışkanlaştırıcı katkı               |
| SD              | = Silis dumanı                               |
| $\epsilon_c$    | = Betonun birim şekildeğiştirmesi            |
| $\epsilon_{co}$ | = Maksimum gerilmedeki birim şekildeğiştirme |
| $\epsilon_{cu}$ | = Betonun nihai birim şekildeğiştirmesi      |
| $\epsilon_s$    | = Çeliğin birim şekildeğiştirmesi            |
| $\epsilon_{su}$ | = Çeliğin nihai birim şekildeğiştirmesi      |



Şekil 4. Dikdörtgen gerilme bloğu parametreleri ve beton dayanımı ilişkisi

## KAYNAKLAR

- [1]ACI Comitte 363-R84, State-of-the Art Report on High Strength Concrete, ACI Journal July-August 1984, 364-410.
- [2]Nilson, A.H., Design Implications of Current Research on High-Strength Concrete, High Strength Concrete ACI SP-87,Detroit, 1985, 85-118.
- [3]Swamy, R.N., High-Strength Concrete - Material Properties and Structural Behavior, High Strength Concrete ACI SP-87, Detroit, 1985, 119-146.
- [4]Larrad, F., Mailer, Y. "Yüksek Performanslı Beton", 2. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 1991, 76-113.
- [5]Pul, S., "Doğu Karadeniz Bölümü Agregalarıyla Yüksek Performanslı Beton Üretimi ve Özelliklerinin Diğer Betonlarla Karşılaştırmalı olarak İncelenmesi", Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2000.
- [6]Hognestad, E., Hanson, N.W., and McHenry, D., "Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design", ACI Journal, Proceedings, Vol 52, No 12, Dec. 1955, 455-479.
- [7]Öztekin, E., "Basit Eğilme Etkisinde Yüksek Performanslı Betonarme Kiriş Hesabı İçin Gerilme-Şekildeğiştirme ve Eşdeğer Gerilme Dağılım Modellerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2000.
- [8]CEB-FIP (MC90) "Model Code for Concrete Structures", Committee Euro-International du Beton, Bulletin d'Information No.213/214, Lausanne, Switzerland, 1990.
- [9]TS500, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, TSE, Ankara, 2000.
- [10]ACI Committee 318 - 89, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Detroit, 1989.
- [11]Ersoy, U. Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü, Cilt-1, Evrim Yayınevi Ankara,1986
- [12]Eurocode - 2 "Design of Concrete Structures", European Committee for Standardization, Brussels, 1999.
- [13]CSA Technical Committee, CSA-94, "Design of Concrete Structures for Buildings", CAN3-A23.3- M94, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, 1994.
- [14]NZS-95, Standards New Zealand, "Design of Concrete Structures", NZS 3101, Wellington, 1995.
- [15]Attard, M.M., and Steward., M.G., " A Two Parameter Stress Block for High-Strength Concrete", ACI Structural Journal, Vol. 95, No.3, May.-June 1998, 305-317.
- [16]İbrahim, H.H.H., and MacGregor, J.G., Modification of ACI Rectangular Stress Block for High-Strength Concrete", ACI Structural Journal, Vol. 94, No.1, Jan.-Feb., 1997, 40-48.
- [17]Bing, L.P.R., and Tanaka, H., "Effect of Confinement on the Behavior of High Strength Concrete Columns Under Seismic Loading", Pacific Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, Nov., 1991.
- [18]Azizinamini, A., Kuska, S., Brungardt, P., and Hatfield, E., "Seismic Behavior of Square High Strength Concrete Columns", ACI Structural Journal, Vol.91, No.3, May-June 1994, 336-345.