

Beton İçin Geliştirilen Gerilme-Şekil Değişirme Modellerinin Karşılaştırılması

Burhan UZBAŞ*

*Tüpraş Kırıkkale Rafineri, Proje ve Yatırımlar Müdürlüğü, 71001 KIRIKKALE

ÖZET

Bu çalışmada, çok fazlı kompozit bir malzeme olan betonun gerilme-şekil değişirme davranışını temsil eden modeller için literatür araştırması yapıldı. Donatılı ve donatısız beton için geliştirilen modellerin referans aldığı parametreler araştırıldı. Gerilme-şekil değişirme davranışın çok değişkene bağlı oluşu nedeniyle kesin sonucu elde etmek sayısal ve deneysel uygulamalar açısından neredeyse imkânsız olduğu ortaya konuldu.

Beton için geliştirilen her modelin avantaj ve dezavantajları olduğu tespit edilmiş ve göz önüne aldığı parametreler açısından bütün modeller Tablo-1 ve Tablo-2 de özetlenerek karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma literatürdeki bilgiler ışığında değerlendirilmiş, iyi bir model sadece karakteristik değerlere bağlı olmayan, aynı zamanda deneysel verilerle de örtüşen ve desteklenebilir olması sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Beton, gerilme-şekil değişirme, modelleme

Comparison of Model Developed for Concrete Stress-Strain

ABSTRACT

In this study, literature search was made about the models representing stress-strain behaviour of concrete which is a multi-phase composite material. Parameters that developed models for reinforced and unreinforced concrete take as reference were investigated. It has been presented that it is almost impossible to obtain exact result in terms of numerical and experimental practices since stress-strain behavior depends on many variables.

It has been identified that each developed model has advantages and disadvantages and in a table all the models are compared briefly. The conducted study was reviewed in the light of information from the literature and it has been concluded that a good model shall not only depend on characteristic values but also it shall be coincided with experimental data and be corroborated.

Keywords: Concrete, stress-strain, modeling

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Betonun giderek yaygınlaşan ve artan kullanımı, ayrıca diğer yapı malzemelerine göre maliyetinin daha düşük olması gibi avantajları da düşünülürse, içerisinde bulunduğumuz yüzyılda da popüler bir yapı malzemesi olma özelliğini sürdürecektir. Betona olan bu talep araştırmacıları bu malzemeyi daha iyi tanıma ve gerçek davranışını ortaya koyma doğrultusunda çalışmalara yöneltmiştir. Yük altında meydana gelen gerilmeler sonucu şekil değiştiren beton kompoziti için gerilme-şekil değişirme ilişkisi göz önüne alınarak çeşitli eğriler ve modeller araştırılmıştır.

Betonun mekanik davranışı, uygulanan gerilmelere bağlı olarak değiştiğinden, bu tür malzemelerin modellenmesinde önemli güçlükler yaşanmakta ve bugün de bu güçlükler devam etmektedir. Dolayısıyla, bugüne kadar betonun doğrusallık ötesinde mekanik davranışını yeteri kadar iyi bir şekilde belirleyen bir model geliştirilememiştir. Yapı malzemesi olarak beton kullanılarak inşa edilen

yapıların, davranışlarının tam ve doğru bir şekilde anlaşılabilmesi için gerilme-şekil değişirme eğrisinin önemi açıktır ve çok iyi anlaşılması gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında beton için geliştirilen gerilme-şekil değişirme bağıntıları incelenmiş ve her birinin avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuştur.

2. BETON İÇİN GELİŞTİRİLEN MODELLER (MODEL DEVELOPED FOR CONCRETE)

Betonarme bir kesitin hesabının yapılabilmesi için, herhangi bir mekanik problemin çözümünde olduğu gibi denge ve uygunluk koşullarını sağlanması yanı sıra malzeme veya malzemeler için gerilme-şekil değişirme ilişkisinin de belirlenmesi gerekmektedir. Denge ve uygunluk koşulu malzeme davranışlarından bağımsızdır. Ancak, malzeme davranışı gerilme-şekil değişirme ilişkisinde dikkate alınmaktadır.

Bu nedenle, malzeme davranışı ne kadar gerçekçi modellenirse çözüm o kadar doğru olacağından, malzemenin gerilme-şekil değişirme özelliklerinin bilinmesi, büyük önem taşımaktadır [1].

Ancak, bilindiği gibi betonun gerilme-şekil değişirme özeliği, yüklenme hızı, numune boyutu,

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: burhanuzbas@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2014.17.3 115-126

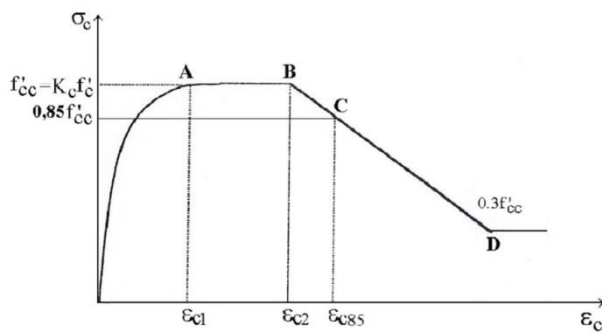
kullanılan presin özellikleri gibi birçok değişkenden etkilenmekte bu nedenle de beton için tek ve kesin bir gerilme-şekil değiştirme eğrisi tanımlamak oldukça zordur. Zira daha önce de belirtildiği gibi, herhangi bir betonarme kesitin çözümlenmesinde, gerilme veya kuvvet cinsinden ifade edilen denklemleri ile şekil değiştirme cinsinden ifade edilen uygunluk denklemi arasındaki ilişki ancak kullanılan malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisinden yararlanılarak kurulmaktadır. Çözümün yapılabilmesi için deneylerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri idealize edilip basitleştirilerek kullanılmaktadır. Matematiksel model olarak tanımlanan idealize edilmiş gerilme-şekil değiştirme ilişkisi üzerinde bugüne kadar birçok araştırmacı çalışmış ve beton için yüzlerce gerilme-şekil değiştirme modeli önerilmiştir.

1899'dan günümüze kadar, birçok araştırmacı betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisini temsil için, parabol, hiperbol, elips, kübik parabol yada bunların kombinasyonlarından meydana gelen çok sayıda matematiksel eğriyi denemişlerdir. Başlangıçta kullanılan eğriler gerilme-şekil değiştirme eğrisinin artan kısmını tanımlamada yetersiz kalmışlardır. Bundan dolayı, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin hem artan hem de azalan kısmını tarif etmek için çeşitli kombinasyonlardan oluşan eğriler geliştirilmiş ve bunun sonucunda da exponansiyel fonksiyonlar önerilmiştir [2].

Literatürde, birçok tek-eksenli ve iki-eksenli yükleme durumu için geliştirilmiş gerilme-şekil değiştirme ilişkisi mevcuttur. Çalışmada geliştirilen modeller incelenmiş ve modellerin avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuştur.

2.1. Sheikh-Üzümeri Modeli (Sheikh-Uzumeri Model)

Sheikh-Üzümeri tarafından sargılı betonlar için önerilen bu model Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Sheikh-Üzümeri tarafından önerilen gerilme-şekil değiştirme modeli

Bu şekilden de görüldüğü gibi, gerilme-şekil değiştirme eğrisi dört kısımdan oluşmaktadır. Bu modelde gerilme-şekil değiştirme eğrisinin ilk kısmı, ε_{s1} şekil değiştirme düzeyine kadar ikinci dereceden bir eğri ile ε_{s2} arasında kalan ikinci kısmı doğrusal olarak, üçüncü kısmı ε_{s2} 'den sonra maksimum dayanımın

%30'una kadar azalan bir doğru ile, dördüncü kısım ise, maksimum dayanımın %30'undan sonra yine sabit bir doğru ile temsil edilmektedir [3].

$$K_c = 1 + \frac{b_c^2}{140P_{occ}} \left[\left(1 - \frac{nC^2}{5,5b_c^2}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_c}\right)^2 \right] \sqrt{\rho_{sh} f_{sh}} \quad (1)$$

$$P_{occ} = 0,85 f_c' (b_c^2 + A_s) \quad (2)$$

$$f'_{occ} = K_c f_c' \quad (3)$$

Burada;

b_c : Sarılmış kesit genişliği

s ; enine donatı aralığını (mm),

ρ_{sh} : sargı donatısının sarılmış kesitte hacimsel oranı

A_s : boyuna donatı enkesit alanı

f_c' : sarılmamış beton silindir basınç dayanımı

f'_{cc} : sarılmış beton basınç dayanımı

f_{sh} : enine donatı gerilmesi

n : kesitteki boyuna donatı sayısı

C : enine donatılar tarafından düzlem dışı hareketi önlenmiş boyuna donatılar arası mesafe

σ_c : beton basınç gerilmesi

ε_c : beton birim şekil değiştirmesi

ε_{s1} : Denklem 4 ile hesaplanan birim şekil değiştirme

ε_{s2} : Denklem 5 ile hesaplanan birim şekil değiştirme

ε_{s85} : Denklem 6 ile hesaplanan birim şekil değiştirme,

Bu katsayı yardımıyla eğrinin birinci kısmı

$$\varepsilon_{s1} = 80k_s f_{ck} \times 10^{-6} \quad (4)$$

ikinci kısmı;

$$\varepsilon_{s2} = 0,0022 \left[1 + \frac{248}{C} \left(1 - 5 \left(\frac{S}{B} \right)^2 \right) \frac{\rho_s f_y}{\sqrt{f_{ck}}} \right] \quad (5)$$

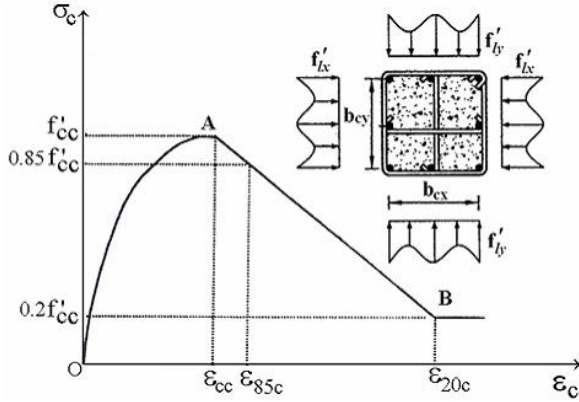
üçüncü kısmı ise;

$$\varepsilon_{s85} = 0,225 \rho_s \sqrt{\frac{B}{S}} + \varepsilon_{s2} \quad (6)$$

2.2. Saatçioğlu - Ravzi Modeli (Saatcioglu-Ravzi model)

Saatçioğlu-Ravzi tarafından önerilen ve Şekil 2' de verilen gerilme-şekil değiştirme modeli de sargılı beton için çıkarılmıştır. Bu modelde gerilme-şekil değiştirme eğrisi yükselen bir parabol ve daha sonra alçalan bir doğru parçasından ve %20 dayanım düzeyinde sabit kalan bir doğru parçasından oluşmaktadır [3].

Bu modelde, A_s ; boyuna donatı alanını, f_y ; boyuna donatı akma dayanımını, f_{yw} , enine donatı akma dayanımını, b_c ; eleman en kesitinde enine donatının merkezleri arasındaki mesafeyi, s ; enine donatı aralığını göstermek üzere f_1 ve k_2 sırasıyla,



Şekil 2. Saatçioğlu-Ravzi tarafından sargılı beton için önerilen gerilme şekil-değişirme modeli,

$$f_1 = \frac{\sum A_s * f_y}{s * b_c} \quad (7)$$

$$k_2 = 0,26 \sqrt{\frac{b_c * b_c}{s} * \frac{1}{s_1} * \frac{1}{f_1}} \leq 1,0 \quad (8)$$

$$f_{le} = k_2 * f_1 \quad (9)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{01} [1 + 5K] \quad (10)$$

Bağıntısıyla basınç dayanımı f_c ise;

$$f_c = f_{ck} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_{c1}}{\varepsilon_1} \right) - \left(\frac{\varepsilon_{c1}}{\varepsilon_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{(1+2K)}} \leq f_{cc} \quad (11)$$

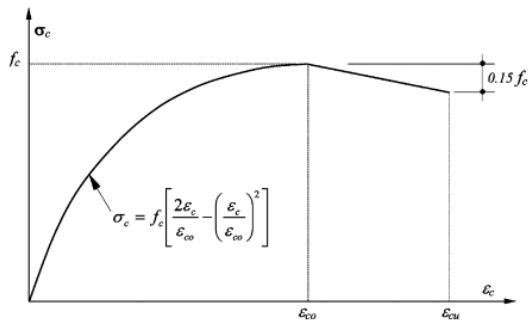
bağıntısıyla belirlenmektedir. Beton basınç dayanımının % 85' ine karşılık gelen ε_{85} ,

$$\varepsilon_{85} = 260 \frac{f_1}{f_{yv}} \varepsilon_1 + \varepsilon_{085} \quad (12)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

2.3. Hognestad Modeli (Hognestad Model)

Hognestad, tarafından önerilen ve son yıllarda yaygın olarak kullanılan model Şekil 3' de verilmektedir. Bu modelin ilk kısmını, ikinci derece bir parabol oluşturmaktadır ikinci yani modelin düşüş eğilimindeki son kısmı ise doğrusaldır.



Şekil 3. Hognestad tarafından önerilen gerilme-şekil değişirme modeli [4]

Modelde beton basınç dayanımı çoğunlukla silindirik numune dayanımının %85'i olarak alınmaktadır. Dayanımına karşılık gelen şekil değişirme (ε_{co}), f_c ; beton basınç dayanımını ($f_c = 0,85 f_{ck}$), E başlangıç elastisite modülünü ($E_c = 1268 + 460 f_c$ MPa) göstermek üzere;

$$\varepsilon_{co} = \frac{2 f_c}{E_c} \quad (13)$$

bağıntısıyla belirlenebilmektedir. Bu değer geleneksel betonda basit olarak $\varepsilon_{co} = 0,002$ olarak alınmaktadır.

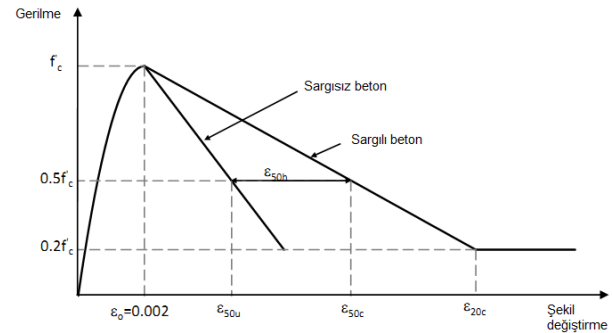
Hognestad'ın beton için önerdiği gerilme-şekil değişirme modelinde gerilme ile şekil değişirme arasındaki ilişki ise,

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2 \varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (14)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir [14]

2.4. Kent-Park ve Geliştirilmiş Kent-Park Modeli (Kent-Park and Modified Kent-Park Model)

Kent-Park tarafından önerilen model Şekil 4' de verilmektedir. Bu modeldeki gerilme-şekil değişirme eğrisinin maksimum gerilmeye kadar olan bölümü, Hognestad modelindeki gibi ikinci derece bir parabol varsayılmaktadır. Modelin ikinci kısmı için ise düşüş eğiliminde iki ayrı doğru önerilmektedir. Bu doğrulardan biri sargısız beton davranışı için diğeri sargılı beton davranışı için verilmektedir. Maksimum gerilme f_c genellikle standart silindirik beton basınç dayanımı olarak alınmaktadır. Önerilen modelin özellikleri aşağıda özetlenmektedir.



Şekil 4. Kent-Park tarafından önerilen gerilme-şekil değişirme modeli [5] Bu modelin yükselen kısmı için ε şekil değişirmeyi, f_c beton basınç dayanımını göstermek üzere gerilme ile şekil değişirme arasında;

$$\sigma_c = f_c \left\{ \frac{2 \varepsilon_c}{0,002} - \left(\frac{\varepsilon_c}{0,002} \right)^2 \right\} \quad (15)$$

şeklinde bir bağıntı tanımlanmaktadır. Modelin alçalan kısımları için, a ve b; enine donatı ile sarılmış kesit

boyutlarını, s , enine donatı aralığını ve A_w enine donatının kesit alanını göstermek üzere,

$$\sigma_s = \frac{2A_w(a+b)}{s(a)(b)} \quad (16)$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3+0,0285f_c}{14,2f_c-1000} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{50h} = \frac{3}{4}\rho_s\sqrt{\frac{b}{s}} \quad (18)$$

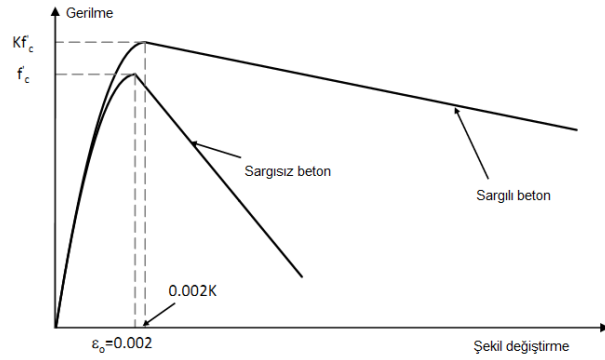
bağıntılarıyla ve bu değerlere bağlı olarak $z=\tan\theta/f_c$ olmak üzere, diğer bir deyişle;

$$z = \frac{0,5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - 0,002} \quad (19)$$

bağıntısıyla hesaplanan bir katsayıyı göstermek üzere gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişki $\sigma_c = f_c \{1 - z(\varepsilon_c - 0,002)\}$ (20)

bağıntısıyla tanımlanmaktadır.

Geliştirilmiş Kent-Park modeli Kent-Park modelinin geliştirilmesiyle elde edilmiştir.



Şekil 5. Geliştirilmiş Kent-Park gerilme-şekil değiştirme modeli [5]

Bu modelde sargı donatısı etkisinin, maksimum gerilmeden sonra olduğu ve basınç dayanımında bir artışa neden olmadığı ilkesine dayanan Kent-Park modelinden farklı olarak, sargı donatısının maksimum gerilme üzerinde de etkili olduğu varsayılmaktadır. İki kısımdan oluşan bu modelin ilk kısmı maksimum gerilmeye kadar uzanan parabol, ikinci kısım ise bu noktadan sonra belli eğimde giden doğru parçası olarak kabul edilmektedir [6]. Bu modelde s ; enine donatı aralığını, A_w enine donatı kesit alanını, a ; kesitin kısa kenarını, ρ ; enine donatının hacimsel oranını göstermek üzere, q ve k_y sırasıyla,

$$\rho = \frac{4.A_w}{a.s}, \quad (21) \quad K_y = 1 + \frac{\rho.f_y}{f_c} \quad (22)$$

bağıntısıyla belirlenmekte, modelin ilk kısmında gerilme ile şekil değiştirme arasında

$$\sigma_c = K_y f_c \left(\frac{2.\varepsilon_{c0}}{K_y.\varepsilon_{c0}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{K_y.\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right) \quad (23)$$

bağıntısıyla belirlenen bir ilişki olduğu, modelin ikinci kısmında ise modelde gösterilen, ε_{50u} , ε_{50h} ve Z sırasıyla;

$$\varepsilon_{50u} = \frac{0,3+0,0285f_c}{14,2f_c-1000}, \quad (24)$$

$$\varepsilon_{50h} = \frac{3}{4}\rho_s\sqrt{\frac{a}{s}}, \quad (25)$$

$$z = \frac{0,5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - K_y.\varepsilon_{c0}} \quad (26)$$

bağıntısıyla belirlenen değerleri göstermek üzere

$$\sigma_c = K_y f_c \left(1 - Z(\varepsilon_c - K_y.\varepsilon_{c0}) \right) \quad (27)$$

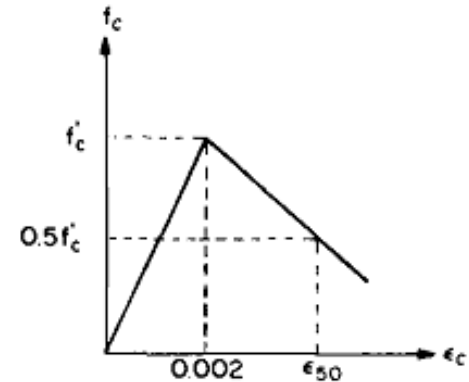
bağıntısıyla belirlenen bir ilişki olduğu kabul edilmektedir.

2.5. Roy-Sozen Modeli (Roy-Sozen Model)

Roy- Sozen tarafından önerilen ve Şekil 6' da verilen gerilme-şekil değiştirme modeli sargılı beton için belirlenmiştir. İki kısımdan oluşan bu gerilme-şekil değiştirme modelinde birinci kısım $\varepsilon_c = 0.002$ 'ye karşılık gelen $f_c = f_{ck}$ gerilme düzeyine kadar ulaşan doğru parçası, ikinci kısım ise bu noktadan itibaren $\varepsilon_c = \varepsilon_{50}$ şekil değiştirme düzeyine karşılık gelen $f_c = 0.5f_{ck}$ gerilme düzeyine kadar inen doğru parçası olarak verilmektedir [1]. Bu modelde, h ; beton kesitin kısa kenarını, ρ_s enine donatının hacimsel oranını, s ; enine donatı aralığını göstermek üzere ε_{50} şekil değiştirme

değeri. $\varepsilon_{50} = \frac{3\rho_s * h}{4s}$ (28) bağıntısıyla

hesaplanabilmektedir.



Şekil 6. Roy-Sozen tarafından önerilen gerilme şekil değiştirme modeli

2.6. Soliman-Yu Modeli (Soliman-Yu Model)

Soliman-Yu Şekil 7' de verilen gerilme-şekil değiştirme modelini sargılı beton için önermektedir. Bu model iki doğrusal ve bir parabol kısım olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Modelin parabolden oluşan

birinci kısmı, orijinden başlayarak yatayda ve düşeyde f_{ck} 'ye karşılık gelen bölümdür. İkinci kısım bu noktadan itibaren yatay olarak ϵ_{cs} 'ye karşılık gelen noktaya kadar olan doğru parçasından, üçüncü kısmı ise yatayda $\epsilon_c = \epsilon_{cf}$ düşeyde beton silindir dayanımının %80'ine tekabül eden gerilmenin olduğu noktadan geçecek şekilde belli bir eğimde ilerleyen doğru parçasından oluşmaktadır [1].

Bu modelde, A_c beton alanını, A_{cc} sargılı beton alanını, A_w ; enine donatı kesit alanını, B sargılı beton genişliğini, f_{ck} beton silindir dayanımını, f_{cmax} Sargılı betondaki maksimum gerilmeyi, s ; enine donatı aralığını s_0 Sargılı betonda enine donatının etkili olmadığı, aralığı (254mm) göstermek üzere, q'' , f_{cmax} , ϵ_{ce} , ϵ_{cs} ve ϵ_{cf} sırasıyla;

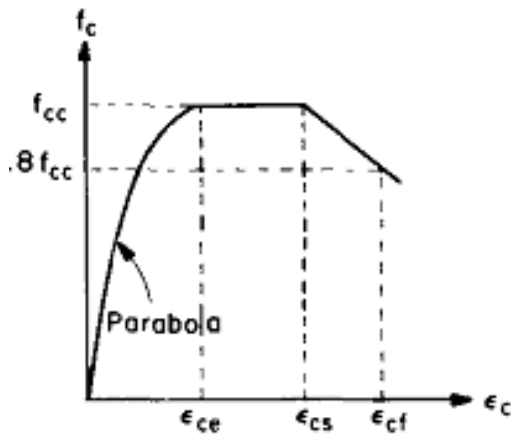
$$q'' = \left(1,4 * \frac{A_{cc}}{A_c} - 0,45 \right) \frac{A_w * (s_0 - s)}{A_w * s + 0,0028 * B * s^2} \quad (29)$$

$$f_{cmax} = 0,9 * f_{ck} * (1 + 0,05 * q'') \quad (30)$$

$$\epsilon_{ce} = 0,55 f_{ck} * 10^{-6}, \quad (31) \quad \epsilon_{cs} = 0,0025(1 + q'') \quad (32)$$

ve

$$\epsilon_{cf} = 0,0045(1 + 0,85q'') \quad (33) \quad \text{bağıntısıyla elde edilir.}$$



Şekil 7. Soliman-Yu tarafından önerilen gerilme-şekl değiştirme modeli

2.7. Sargin Modeli (Sargin model)

Sargin tarafından sargılı beton için önerilen gerilme-şekl değiştirme eğrisi Şekil 2.8' de verilmektedir. Bu model sürekli bir eğriden oluşmaktadır [16].

Bu modelde, ρ_s ; enine donatının hacimsel oranını, a : göbek betonunun genişliğini s ; enine donatı aralığını, f_{yw} enine donatının akma dayanımını, f_{ck} betonun silindir dayanımını, E_c başlangıç elastisite modülünü, k_3 Maksimum gerilmenin silindir dayanımına oranını, ϵ_{c0} , dayanıma karşılık gelen şekil değiştirmeydi. d açalın

kısım üzerinde etkili olan bir parametreyi göstermek üzere, k_3 , ϵ_0 , D , E_c , A ve x sırasıyla,

$$k_3 = 1 + 0,05468 \left(1 - 0,245 \frac{s}{a} \right) \frac{\rho_s f_{yw}}{\sqrt{f_{ck}}}, \quad (34)$$

$$\epsilon_{c0} = 0,0024 + 0,000141 \left(1 - 0,734 \frac{s}{a} \right) \rho_s \frac{f_{yw}}{\sqrt{f_{ck}}} \quad (34)$$

$$D = 0,8 - 7,11 * 10^{-4} f_{ck}, \quad (35)$$

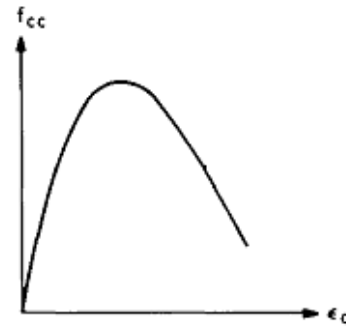
$$E_c = 19091 \sqrt{f_{ck}}, \quad (36)$$

$$A = \frac{E_c \epsilon_{c0}}{k_3 f_{ck}} \quad (37) \quad x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{c0}} \quad (38)$$

bağıntısıyla belirlenmekte ve bunlara bağlı olarak gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişki,

$$\sigma = k_3 f_{ck} \frac{Ax + (D-1)x^2}{1 + (A-2)x + Dx^2} \quad (39) \quad \text{şeklinde}$$

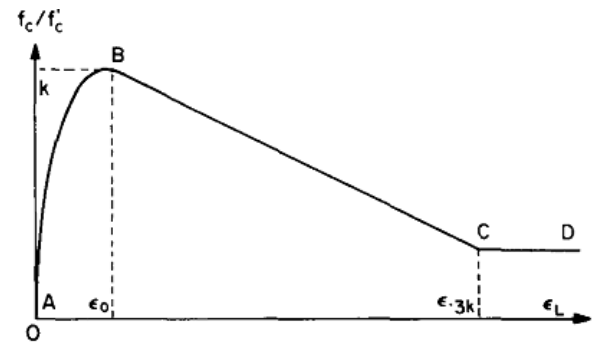
tanımlanmaktadır.



Şekil 8. Sargin tarafından önerilen gerilme-şekl değiştirme modeli

2.8. Vallenas-Bertero-Popov Modeli (Vallenas-Bertero-Popov model)

Vallenas, Bertero ve Popov tarafından sargılı beton için önerilen gerilme şekil değiştirme modeli Şekil 2.9'da verilmektedir. Bu Kent-Park tarafından önerilen model ile benzerdir. Bu iki model arasındaki temel fark; sargılama nedeniyle beton dayanımına yapılan katkının dikkate alınmış olmasıdır [7]



Şekil 9. Vallenas, Bertero ve Popov tarafından önerilen gerilme-şekl değiştirme [7]

Söz konusu model, birinci kısım ikinci derece bir parabol, ikinci kısım maksimum gerilmenin %30'una tekabül eden noktaya kadar ulaşan sabit eğimde bir doğru parçası ve üçüncü kısım ise yatay bir doğru parçası olmak üzere, toplam üç kısımdan oluşmaktadır.

Bu modelde, f beton silindir dayanımını, f_{yw} , eline donatının akma dayanımını, s enine donatı aralığını, a ; sarılmış kesit enini, ρ_s , enine donatı hacminin göbek betonunun hacmine oranını, d ; boyuna donatı çapını, d' ; enine donatı çapını göstermek üzere ε_{c0} k ve z sırasıyla;

$$\varepsilon_{c0} = 0,0024 + 0,00189(1 - 0,734 \frac{s}{a}) \frac{\rho_s f_{yw}}{\sqrt{f_{ck}}} \quad (40)$$

$$k = 1 + 0,03432 \left(1 - 245 \frac{s}{a}\right) \frac{\left(\rho_s + \frac{d^n}{d} \rho\right) f_{yw}}{\sqrt{f_{ck}}} \quad (41)$$

$$z = \frac{0,5}{\frac{3}{4} \rho_s \sqrt{s} + \frac{0,21 + 0,002 f_{ck}}{f_{ck}} - 0,002} \quad (42)$$

bağıntısıyla, bu değerlere bağlı olarak da modelin ilk kısmı;

$$\frac{f_c}{f_{ck}} = \frac{\frac{E_c \varepsilon_{c0}}{f_{ck}} * \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}}\right) - k * \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}}\right)^2}{1 + \left(\frac{E_c \varepsilon_{c0}}{k_3 f_{ck}} - 2\right) * \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}}\right)} \quad (43)$$

bağıntısıyla, ikinci kısmı

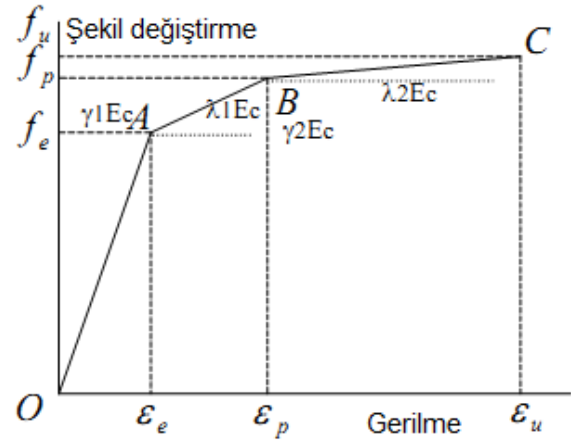
$$\frac{f_c}{f_{ck}} = k * \left[1 - z \varepsilon_{c0} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} - 1\right)\right] \quad (44) \text{ bağıntısıyla}$$

ve üçüncü kısmı ise

$$\frac{f_c}{f_{ck}} = 0,3k \quad (45) \text{ bağıntısıyla belirlenebilmektedir.}$$

2.9. Chan Modeli (Chan model)

Chan tarafından sargılı ve sargısız beton için önerilen gerilme-şekil değiştirme modeli Şekil 2.10' da görülmektedir. Bu modeli Chan üç kısımda vermektedir. Modelin ilk kısmı elastik bölgeyi temsil ederken diğer kısımlar plastik bölgeyi temsil etmektedirler Sargılı ve sargısız beton için ilk iki kısım aynıdır. Sargısız beton için önerilen gerilme-şekil değiştirme modelinde dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değeri ε_{c0} değerine eşit ve son kısmın eğimi negatif olarak, sargılı betonda ise son kısmın eğimi sargısız betonunkinin aksine pozitif olarak verilmektedir [15].



Şekil 10. Chan tarafından önerilen gerilme-şekil değiştirme modeli

2.10. Shah Modeli (Shah model)

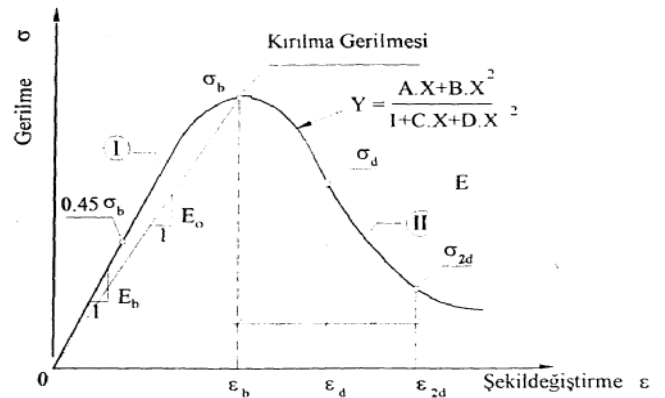
Shah tarafından önerilen gerilme-şekil değiştirme modeli Şekil 2.11'de verilmektedir. Bu modelde gerilme-şekil değiştirme eğrisi I ve II diye belirtilen iki kısımdan oluşmaktadır. I ile gösterilen kısım eğrinin yükselen kısmını, II ile gösterilen kısım ise eğrinin alçalan kısmını oluşturmaktadır [1].

Shah; bu gerilme ve şekil değiştirme modeli için; A,B,C,D modelin I ve II kısımlarındaki uygunluk şartlarından belirlenen değişkenler olmak üzere,

$$Y = \frac{A.X + B.X^2}{1 + C.X + D.X^2}, \quad (46) \quad X = \varepsilon / \varepsilon_b \quad (47)$$

$$Y = \sigma / \sigma_b \quad (48) \quad E_o = \sigma_b / \sigma_b \quad (49)$$

bağıntılarını vermektedir.



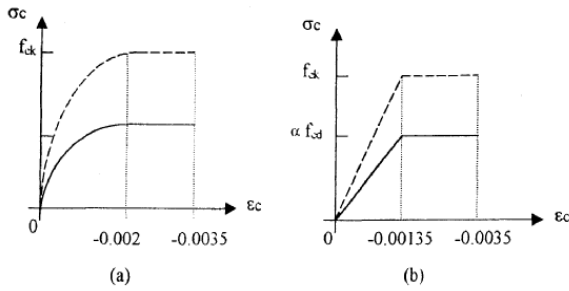
Şekil 11. Shah tarafından önerilen gerilme-şekil değiştirme modeli

2.11. Eurocode 2'de Modeli (Eurocode 2 model)

Eurocode 2 beton için gerilme-şekil değiştirme modeli olarak parabol-dikdörtgen modelini önermektedir (Şekil 12.a). Bu modelde 0.002'lik birim kısalmaya kadar olan kısım parabol, 0.002 ile 0.0035 birim kısalmalar arasında kalan kısım ise dikdörtgen olarak alınmaktadır. Bu model Eurocode 2 tarafından basitleştirilerek (Şekil

12.b) de verilmektedir. Bu basitleştirilmiş model iki doğrudan oluşmaktadır. Birinci doğru orijin ile 0.00135 birim kısalma değerine kadar yükselen bir yol izlerken ikinci doğru 0.00135 ile 0.0035 birim kısalma değerleri arasında yatay bir yol izlemektedir. Kesikli çizgi ile görülen eğriler standart silindir (15cm X 30cm) deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisini temsil ederken sürekli çizgi betonun dış ortamdaki uzun süreli ve gerçek yüklemeler altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrisini temsil etmektedir. Burada, $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$, (50)

$\gamma_c = 1.5$ ve $\alpha = 0.85$ olarak alınmaktadır [8]



Şekil 12. Eurocode 2 tarafından önerilen gerilme-şekil değiştirme modelleri

$$\sigma_c = f_c \cdot \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta}, \quad (51)$$

$$k = 1,1 \cdot E_{c,nom} \cdot (\varepsilon_{c1}/f_c), \quad (52) \quad \eta = \varepsilon_0 / \varepsilon_{c1}, \quad (53)$$

$\varepsilon_{c1} = -0,0022$

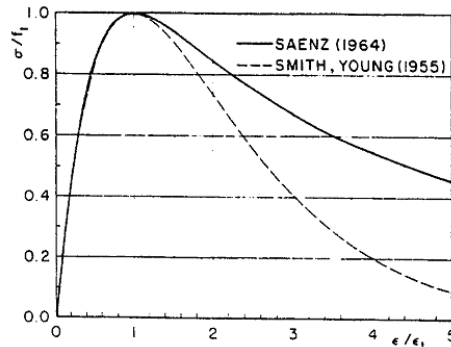
2.12.Desayi ve Krishman modeli (Desayi ve Krishman model)

$$\sigma = \frac{E\varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}\right)^2} \quad (54)$$

Bu denklemde σ ve ε gerilme ve şekil değiştirme tensörleri, E ise young modülü ve ε_p maksimum gerilmadaki şekil değiştirmedir [9].

2.13. Smith ve Young modeli (Smith and Young model)

Smith ve Young tarafından önerilen gerilme-şekil değiştirme modeli Şekil 2.13'de verilmektedir.



Şekil 13. Smith ve Young tarafından önerilen gerilme-şekil değiştirme modelleri [10]

$$\sigma = f_t \left(\varepsilon / \varepsilon_t \right) \exp \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_t} \right) \quad (55)$$

2.14. CEB modeli (CEB model)

Avrupa Beton Komitesi (CEB) kıs süreli yükleme için, nihai şekil değiştirmeye kadar bir parabol ve bir düz çizgi vermektedir [9].

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_u} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \quad (56)$$

Burada, σ_c : betonun silindirik basınç dayanımıdır. σ_u ise nihai gerilmedir ve aşağıdaki gibi bulunur:

$$\eta = \frac{\varepsilon_u}{0.002}, k = \frac{[0.0022(1.1E)]}{\sigma_u} \quad (57)$$

2.15. Richard ve Abbott Modeli (Richard ve Abbott model)

Richard ve Abbott, üç parametrelili gerilme-şekil değiştirme ilişkisi teklif etmiştir:

$$\sigma = \frac{E_1 \varepsilon}{\left(1 + \left(\frac{E_1 \varepsilon}{\sigma_0} \right)^n \right)^{\frac{1}{n}}} + E_p \varepsilon \quad (58)$$

Burada, E_p plastik modül, σ_0 bir referans plastik gerilme, $E_1 = E - E_p$ ve n ise gerilme-şekil değiştirme şekil parametresidir [9].

2.16. Tomaszewicz modeli (Tomaszewicz)

Tomaszewicz normal ve yüksek dayanımlı betonlar için aşağıda ki gibi bir model geliştirmiştir [1].

$$\sigma_c = f_c \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cu}} \frac{n}{n-1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_{cu})^{kn}} \quad (59)$$

$$: 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$$

$$\sigma_c = 0$$

$$: \varepsilon_{cu} < \varepsilon_c$$

$$E_{cu=f_c} / \varepsilon_{cu}$$

2.17. Saent Modeli (Saent model)

$$\sigma = \frac{E\varepsilon}{1 + \left(\frac{E}{E_p} - 2 \right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right) + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^2}, \quad (60)$$

burada E_p maksimum gerilmadaki young modülü'dür [1].

2.18. Wang vd. modeli (Wang vd. model)

Eğrinin şeklini tamamlayan model, 4 katsayıya bağlı bir modeldir. Metot ilk olarak Sargin (1971) tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$f_c = f'_c \left[\frac{A \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right) + B \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right)^2}{1 + C \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right) + D \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right)^2} \right] \quad (61)$$

Wang *et al.* 1978 de eğrinin artan ve azalan kısmı için A,B,C,D katsayılarında iki set kullanmıştır. Bu katsayılar farklı dayanımlardaki betonlar üzerinde genişletmiş deneysel programlar ile belirlenmiştir. Denklem özellikle yüksek dayanımlı betonlar için önerilir fakat basınç altındaki hafif ve normal betonlar içinde geçerlidir. Bu öneri yine aynı yazar tarafından başka bir makalede yayımlanmıştır. Modelin gerçek davranışları doğru bir şekilde oluşturduğu zannedilmesine rağmen gerçek eğri sınır şartlarından katsayılar çıkarılmıştır. Yukarıda verilen denklem analizinden A=2, B=-1, C=D=0 Hognestad modelinden gözlemleyebiliriz [8].

2.19. Ahmad ve Shah modeli (Ahmad and Shah model)

Bu model Wang *et al.* Modelinin geliştirilmiş ve dört katsayı yerine A ve B katsayılarını kullanmaktadır. Bu iki katsayı basınç dayanımını bilerek çıkarılabilecek betonun bazı karakteristik özelliklerine bağlıdır. Bu arada maksimum gerilimdeki şekil değiştirmenin gerilimi ve betonun elastisite modülü bazı ampirik ifadeler kullanılarak tahmin edilir [15].].

Bu modelin bünye denklemi:

$$f_c = f'_c \frac{A \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right) + (B-1) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right)^2}{1 + (A-2) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right) + B \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right)^2} \quad (62)$$

Burada

$$A = E_c \frac{\varepsilon_{c0}}{f'_c} \quad (63)$$

$$B = 0.88087 - 0.0082667 \cdot f'_c \quad (64)$$

$$\varepsilon_{c0} = 0.001648 + 165,33 \cdot 10^{-7} f'_c \quad (65)$$

$$E_c = 1086,32 \cdot W^{1,5} \sqrt{f'_c} \quad (66)$$

burada W kg/m³ ağırlıktır.

Bu eşitlik için tepe noktasının hemen sonraki bölgede artan gerilme basınç dayanımının %10 daha az azalmamalıdır. Betonun karakteristik tanımı MPa olarak ifade edilmelidir.

2.20. CEB-FIB Modeli (CEB-FIB model)

Bu model betonun basınç altındaki davranışını tanımlayan iki tane denklem içermektedir. Bu modelin ilginç tarafı eğrinin azalan kısmında hemen basınç dayanımını %50 sine kadar ilk denklem göstermektedir. Bu noktada şekil değiştirme $\varepsilon_{max.}$ a karşılık gelmektedir. Eğrinin ilk kısmının şekillenme katsayısı betonun elastisitesinin sekant modülü ile başlangıç tanjant arasında bir orandır.

Eğer $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{max.}$ ise aşağıdaki ifade kullanılır:

$$f_c = f'_c \frac{\left(\frac{E_{it}}{E_c} \right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right)^2}{1 + \left(\frac{E_{it}}{E_c} - 2 \right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right)} \quad (67)$$

Burada

$$\varepsilon_{max.} = \varepsilon_0 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \frac{E_{it}}{E_c} + 1 \right) + \sqrt{4 \left(\frac{E_{it}}{E_c} + 1 \right)^2 - \frac{1}{2}} \right] \quad (68)$$

Aksi halde eğer $\varepsilon_{max.} \leq \varepsilon$ ise eğri;

$$f = \frac{f'_c}{\left[\frac{1}{(\varepsilon_{max.}/\varepsilon_{c0})} \zeta - \frac{2}{(\varepsilon_{max.}/\varepsilon_{c0})^2} \right]^{(c/\varepsilon_{c0})} + \left[\frac{4}{(\varepsilon_{max.}/\varepsilon_{c0})} - \zeta \right] \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}}} \quad (69)$$

Burada;

$$\zeta = \frac{4 \left[\left(\frac{\varepsilon_{max.}}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \left(\frac{E_{it}}{E_c} - 2 \right) + 2 \left(\frac{\varepsilon_{max.}}{\varepsilon_{c0}} \right) - \frac{E_{it}}{E_0} \right]}{\left[\left(\frac{\varepsilon_{max.}}{\varepsilon_{c0}} \right) \left(\frac{E_{it}}{E_0} - 2 \right) + 1 \right]^2} \quad (70)$$

Dahl 1992, peak noktadaki şekil değiştirmenin CEB FIB modelinde önerildiği gibi sabit olmadığını deneysel olarak göstermiştir. Buna ek olarak, ilk tanjant modül için şöyle bir ifade önermiştir; peak noktasındaki şekil değiştirme için önerilen yeni değerler için CEB FIB modelinin bünyesel eşitlikleri 116 Mpa a kadar gidebilir.

$$E_{it} = 10300 (f'_c)^{0,3} \quad (71)$$

Wee *et al.* 1996 CEB FIB modelini deneysel olarak değerlendirmiş ve yüksek dayanımlı betonun eğrisin post peak bölgesinde ani düşüş gözlemlemiştir. Bunun aksine deneysel gözlemler yüksek şekil değiştirmelerde herhangi bir artan dayanım bu modelle tahmin edilmesi oldukça zordur[8]

2.21. Collins vd. modeli (Collins vd. Model)

Collins *et al.* Tomaszewich gibi aynı eşitlik ve kavrama yoğunlaşmıştır [1].

n ve k parametreleri için değerler;

$$n = 0.8 + \frac{f'_c}{17}, \quad (72)$$

$$k = \begin{cases} 1 & \text{for } \varepsilon \leq \varepsilon_{c0} \\ 0.67 + f'_c / 62 & \text{for } \varepsilon > \varepsilon_{c0} \end{cases}$$

Başlangıç tanjant modül (MPa) için aşağıdaki denklem kullanılır

$$E_{it} = 3320\sqrt{f'_c} + 6900 \quad (73)$$

Collins *et al.* 1992 peak stress noktasında şekil değiştirme değişikliklerini şu formülle göstermiştir;

$$\varepsilon_{c0} = \frac{f'_c}{E_{it}} \frac{n}{n-1} \quad (74)$$

2.22. Hsu ve Hsu modeli (Hsu and Hsu model)

Bu araştırmacılar dayanımın %30 una ulaştığında post-peak den hemen sonraki bölgedeki gerilme noktasına kadar şekil değiştirmeler için Careira ve Chu modelini uyarladılar. Bu gerilmeye karşılık şekil değiştirme ε_d , bu noktadan sonra artan gerilmeyi tanımlamak için eksponansiyel denklem kullanılmıştır [15].

$0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_d$ için denklem,

$$f = f'_c \left[\frac{n\beta \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}}\right)}{n\beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}}\right)^{n\beta}} \right] \quad (75)$$

$$\varepsilon > \varepsilon_d \text{ için } f = f'_c \cdot 0,3 \left[-k_d \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_d}{\varepsilon_{c0} - \varepsilon_{c0}} \right)^a \right] \quad (76)$$

Burada $k_d = 0,8$, $a = 0,5$ betonun dayanımı 62 MPa kadar n katsayısı 1, eğer dayanım 62-76 MPa arasında ise n=2, dayanım 76-90 arası n=3 ve 90 üzeri n=5 olur.

Maksimum gerilmedeki şekil değişikliği ve başlangıç tanjant modül için şu ifadeyi sağlamışlardır:

$$\varepsilon_{c0} = 0.002114 + 1.2905 \cdot 10^{-5} \cdot f'_c \quad (77)$$

$$E_{it} = 0.1243 \cdot f'_c + 22.66 \text{ (MPa)} \quad (78)$$

2.23. Attard ve Setunge Modeli (Attard and Setunge model)

Attard ve Setunge modeli Ahmad ve shah modeline oldukça benzerdir ve iki tane belirleyici parametreye ve aynı bünyesel denkleme sahiptir.

$$f_c = f'_c \left[\frac{A \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}}\right) + B \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}}\right)^2}{1 + (A-2) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}}\right) + (B+1) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}}\right)^2} \right] \quad (79)$$

Eğrinin artan ve azalan kısmı için A ve B gibi iki sabit değer vardır. Setunge'un çalışmalarına dayalı, kullanılan agreganın cinsine göre maksimum noktadaki şekil değiştirme için farklı formüllerin kullanılmasını önermiştir [1].

$$\varepsilon_{c0} = \frac{f'_c}{E_c} \frac{4.26}{\sqrt{f'_c}} \text{ (kırma taş için)} \quad (80)$$

$$\varepsilon_{c0} = \frac{f'_c}{E_c} \frac{3.78}{\sqrt[4]{f'_c}} \text{ Çakıl için} \quad (81)$$

$$\varepsilon_{c0} = \frac{f'_c}{E_c} \frac{4.11}{\sqrt[4]{f'_c}} \text{ kırma taş ve çakıl için} \quad (82)$$

2.24. Van Gysel ve Taerwe Modeli (Van Gysel and Taerwe model)

Bu model artan kısmı ve birincisi maksimum şekil değiştirmenin, ikincisi ise azalan kısmının yaklaşık olarak belirlendiği iki orijinal eşitliğe için CEB modeline dayanmaktadır.

$$f = f'_c \frac{1}{1 + \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{c0}}{\eta_2 - 1} \right)^2} \quad (83)$$

$$\varepsilon_{c0} = \frac{0.7(f'_c)^{0.31}}{1000} \quad (84)$$

η_2 katsayısı doğrudan beton dayanımıyla alakalı bir parametredir, değeri ise 100 MPa için 1.005 ve 50 MPa 1.327 arasında değişmektedir. Bu katsayı test prosedürüne bağlı olarak ayarlanır [1].

2.25. Wee vd. Modeli (Wee vd. model)

Dayanımları 50 ile 120 MPa olan 163 silindir örneğinin geniş çalışmalarından sonra, Carreire ve Chu's modelinin azalan kısmı için yeni bir denklem önermişlerdir [1]. Beton dayanımının geniş aralık için eğrini azalan bölümünün uygun bir şekilde temsil eden düzeltme faktörleri k_1 ve k_2 belirtilmiştir.

$$f = f'_c \left[\frac{k_1 \beta \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}}\right)}{k_1 \beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}}\right)^{k_2 \beta}} \right] \quad (85)$$

$$k_1 = \left(\frac{50}{f'_c}\right)^{3.0} \quad (86) \quad k_2 = \left(\frac{50}{f'_c}\right)^{1.3} \quad (87)$$

Buna ek olarak başlangıç elastisite modülü ve pik noktasındaki şekil değiştirmenin orijinal ifadesi şu analize bağlıdır:

$$E_{it} = 10,200(f'_c)^{(1/3)} \text{ (MPa)} \quad (88)$$

$$\varepsilon_{c0} = 0.00078(f'_c)^{(1/4)} \quad (89)$$

2.26. Tsai modeli (Tsai model)

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{c,u}} = \frac{M \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c,u}}\right)}{1 + \left(M - \frac{N}{N-1}\right) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c,u}}\right) + \left(\frac{1}{N-1}\right) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c,u}}\right)^N} \quad (90)$$

Tsai denklemindeki M , $E_o/E_{c,u}$ oranından, N ise $\sigma_{c,u}$ 'nin bir fonksiyonudur. $M=2$ ve $N=2$ olduğu zaman Tsai denklemi Desayi ve Krishnan denklemine dönüşür [11].

2.27. Tulin ve Gerstle Modeli (Tulin and Gerstle model)

$$\sigma_c = \frac{3(E_{c,u})(\varepsilon_c)}{2 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c,u}}\right)^3}, \text{şeklinde ifade edilmiştir [11]. (91)}$$

2.28. Popovics Modeli (Popovics Model)

$$\sigma_c = \frac{n(E_{c,u})(\varepsilon_c)}{n - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c,u}}\right)^n} \quad (92)$$

Burada; $n = E/E_{c,u} = (n/(n-1))$ formülünden elde edilir. Popovics'in önerdiği eşitlik aslında Carreira ve Chu tarafından önerilen denklemin aynıdır. Popovics eşitliğinde β yerine n kullanmıştır. β gerilme-şekil değiştirme eğrisinin şekline bağlı bir malzeme katsayısıdır [11].

Popovics denklemi $n=2$ olması halinde Desayi ve Krishnan denklemine, $n=3$ olması halinde ise Tulin ve Gerstle denklemine dönüşmektedir [11].

Popovics ve Tsai denklemlerinden gerilme-şekil değiştirme eğrisinin çizilmesi oldukça zordur. Bunun sebebi ise, her bir denklem için kullanılacak sabitlerin deneysel verilerden elde ediliyor olmasıdır [11].

Kısa süreli tek eksenli yük altında, yüksek dayanımlı betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi, maksimum gerilmenin büyük bir kısmına kadar lineerdir. Dayanımın artması ile birlikte maksimum gerilme de artmış ve buna bağlı olarak da şekil değiştirme de artmıştır. Yüksek dayanımlı betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinin artan kısmını Popovics'in önerdiği denklem çok iyi ifade etmektedir. Bu denklemde kullanılan $E_{c,u}$ maksimum yükteki sekant modülüdür [11].

3. ARAŞTIRMA BULGULARI (RESEARCH RESULTS)

Yaygın olarak kullanılan betonun, mekanik davranışının yeterince doğru bir şekilde modellenmesi, betondan yapılmış olan yapıların doğru analizi için son derece önemlidir. Bu tür modeller, betonarme yapıların deprem davranışının da doğru olarak belirlenebilmesi için de şarttır. Bilindiği üzere, şartnamelerde yer alan birçok formül ampirik olup, sınırlı sayıda deneylerden elde edilen bilgileri içermektedir. Bu durum, bu formüllerin diğer karmaşık durumlarda geçerliliğine gölge düşürmektedir. Bu formüllerin mümkün olan her durum için geçerli olduğunu göstermenin ve gerekiyorsa bu formüller üzerinde uygun değişiklikler yapabilmeyen tek yolu, daha doğru mekanik modellerin geliştirilmesine ve bu modellerin yapısal analizde kullanılmasına bağlıdır.

Betonun gerilme-şekil değiştirmesinin doğru bir şekilde matematiksel olarak elde edilebilmesi için, beton gerilme ve şekil değiştirmesinin fiziksel mekanizmasının iyi anlaşılması gerekir. Bu amaçla son yüzyılda çeşitli araştırmacılar oldukça yoğun bir şekilde biraz daha gerçekçi bir yaklaşım yapabilmek, gerçeğe en yakın sonucu verecek matematiksel ifadeyi elde edebilmek için olağan üstü çaba sarf etmişlerdir. Daima yaklaşımın yaklaşıklığının daha az olabilmesi için yeni yaklaşımlar veya yeni düzenlemelere başvurarak var olan modelleri iyileştirme yolunu seçmişlerdir.

Çimento esaslı malzemelerin genel yapısı ele alındığında, hidrate olmuş ve olmamış çimento harcı tanecikleri arasındaki ara yüzey, hidrate olmuş çimento ile agregalara arasındaki ara yüzey ve hidrate olmuş çimento harcı ile diğer beton bileşenleri arasındaki ara yüzeyler göze çarpar. Ancak bu çalışmada sadece harç-agrega ara yüzeyi dikkate alınmıştır. Bu durum yapılan çalışmanın mezoskopik seviyede olmasından kaynaklanmaktadır.

Çimento esaslı malzemeler genel olarak dört tipte deformasyona uğrarlar. Eğer deformasyon ani ve geri dönüşümlü ise ani elastik, ani ancak geri dönüşümsüz yani kalıcı ise plastik, zamana bağlı olarak geri dönüşümlü ise geciken elastik ve zamana bağlı kalıcı ise viskoz olarak nitelendirilir. Elastik ve plastik davranışta, bir andaki şekil değiştirme yüklemeye hızına bağlı değildir. Viskoelastik davranışta ise, yüklemeye hızı şekil değiştirmeleri önemli ölçüde etkiler. Bundan dolayı viskoelastik cisimlerin davranışını matematik olarak ifade ederken gerilme ve şekil değiştirme terimlerinin yanında zamanı da ek etmek gerekmektedir.

Viskoelastik davranışta bünye düzensizliklerinde gerilme ve şekil değiştirme sadece yüklemeye değil yüklemenin hızına, uygulanan kuvvetin şiddetine ve süresine de bağlıdır. Buna karşı elastik davranışta bünye denklemleri gerilme ve şekil değişmelerin işlevidir. Elastik ve plastik davranışta yüklemeye hızı ne olursa olsun son şekil değiştirmeler aynıdır [12].

Viskoelastik malzemelerin davranışı genel olarak yay ve amortisörlerden oluşan modellerle ifade edilmektedir. Bir malzemenin fiziksel olarak davranışını matematiksel bir modele oturtmak, malzemenin gerçek davranışına en yakın sonucu verecek ifadeyi elde etmek için yay ve amortisör kombinasyonlarından oluşan çok model literatürde yer almıştır. Çünkü yaklaşık ifadeler yerine ayakları yere basan, termodinamik ilkelerine uygun malzeme davranışını belirli bir hata payıyla da olsa bütün beton tipleri için aynı yakınsaklıkta sonuç veren reolojik modeller tercih edilmiştir. Özellikle çimento esaslı malzemelerin sünmesi üzerine yapılan araştırmalarda yüzlerce reolojik model çalışması yapılmıştır. Ancak bu modeller bütün olarak ele alındığında temelde aynı oldukları, farklı yay ve amortisör kombinasyonlarının beton için Kelvin veya Maxwell zincirlerinden her hangi biriyle ifade edilebileceği araştırmacılar tarafından ortaya konmuş ve Bazant (1988) tarafından dile getirilmiştir.(19)

Tablo 1. Donatısız beton için geliştirilen σ - ϵ modelleri ve parametreler

Geliştirilen Gerilme-Şekil Değişirme Modelleri	Modelde Kullanılan Parametreler											
	Beton Basınç Dayanımı	Elastisite Modülü	Maksimum Gerilmedeki Şekil Değişirme	Başlangıç Elastisite Modülü	Maksimum Gerilmedeki Elastisite Modülü	Plastisite Modülü	Sekant Modülü	Agrega Cinsi	Çimento Cinsi	Boşluk Miktarı	Agrega Dayanımı	
CEB Modeli Ummad and Shah (1982) Shah at al (1983) Van Gysel veaerwe Modeli Tomaszewicz Modeli	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Desayi ve Krishnan Modeli Tsayi Modeli	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Collins et al. (1992) Hsu and Hsu 1984	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Altard ve Setunge Modeli	+	-	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-
CEB-FIB Modeli	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-
Chan Modeli Hogrestad Modeli Cusson ve Paulire Modeli Wassiliou ve Leger Modeli	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Shah'in Modeli Eurocode 2 Modeli	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Saent Modeli	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Smith ve Young Modeli	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-	+	-
Popovics Modeli Tulin - Gerstle Modeli	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Richard ve Abbott Modeli	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-

Tablo 2. Donatılı beton için geliştirilen σ - ϵ modelleri ve parametreler

Geliştirilen Gerilme-Şekil Değişirme Modelleri	Modelde Kullanılan Parametreler		
	Beton Basınç Dayanımı	Donatı	Başlangıç Elastisite Modülü
Sheik-Üzmeri Modeli Saatçioğlu-Razvi Modeli Vallenas-Bertero-Popov Modeli Kent-Park Modeli Thompson-Park Modeli Geliştirilmiş Kent-Park Modeli Roy-Sozen Modeli Soliman-Yu Modeli	+	+	-
Sargin Modeli	+	+	+

Yapılan çalışmada betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi için geliştirilen modeller incelenmiş ve bu modellerin göz önünde bulundurduğu parametreler aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Çimento esaslı malzemelerin davranışı, genel anlamda değerlendirildiğinde, mekaniğin temellerinden, reolojik modellerden, yola çıkarak malzemenin karışım ve bileşimini ayrı ayrı kapsayan ve böylece uygulamada karşılaşılabilecek davranış problemlerini önceden kestirmeyi amaçlayan bir süreçtir. Özellikle gerilme-şekil değiştirme davranışının önceden kestirilememesi bu alandaki temel problemdir. Gerilme-şekil değiştirme davranışın çok değişkene bağlı oluşu nedeniyle kesin sonucu elde etmek sayısal ve deneysel uygulamalar açısından neredeyse imkansızdır.

Agrega-harç ara yüzeyinin beton davranışını belirleyen kritik sınır olduğu önemli çalışmalar da vardır. Simülasyonlardaki ara yüzeyin genel davranışa etkisi, ara yüzeydeki elemanların diğer elemanlara göre daha çok deforme olması verilen şekillerde çarpıcı bir biçimde yer almaktadır. Bu çalışmanın ileri aşamaları olarak deneysel çalışma ile bütünleştirilmesi ve her bir değişkenin ayrık olarak istatistiksel analizi ve değerlendirilmesi, kurulan modellerin daha gerçeğe yakın bir sonuca ulaşmasına neden olacaktır.

Yine de unutmamak gerekir ki, gerilme-şekil değiştirme davranışı sonucu ortaya çıkan deformasyon hiçbir zaman doğal koşullarda kesin olarak elde edilemeyecektir.

Yapılan bu çalışmada literatürdeki mevcut modellerin analizi yoluna gidilmiştir. İyi bir model sadece karakteristik değerlere bağlı olmayan, aynı zamanda deneysel verilerle de örtüşmelidir.

5. KAYNAKLAR (RESOURCES)

- [1] Uzbaş, B., 2008. Çimento Esaslı Malzemelerin Tek Eksenli Yük Altındaki Davranışının Mezo Düzey Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [2] Desayi, P., Krishnan, S., 1964. Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete. Journal of the American Concrete Institute, 61(3), 345-350.
- [3] Kaltakçı, M. Y., Köken, A., Yılmaz, Ü. S., 2006. Eksenel yük Altındaki Çelik Lifli ve Lifsiz Etriyeli Betonarme Kolonların Davranışının Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 8(1), 65-85
- [4] Oztekin E., Pul S., Husem M., 2003. Determination of Rectangular Stress Block Parameters For High Performance Concrete. Engineering Structures, 25, 371-376.
- [5] Reddiar M. K. M., 2009. Stress-Strain Model of Unconfined and Confined Concrete and Stress-Block Parameter, MSc Thesis, Texas A&M University, Texas.
- [6] Ersoy, U., Özcebe, G., 2001. Betonarme. Evrim Yayınevi ve Bilgisayar San. Tic. Ltd. Şti., 817 s, İstanbul.
- [7] Sheikh S. A., 1982. A Comparative Study of Confinement Models. ACI Journal, Title no:79-30.
- [8] Mertol H. C., 2006. Behavior of High-Strength Concrete Members Subjected to Combined Flexure and Axial Compression Loadings, PhD Thesis, North Carolina State University, North Carolina.
- [9] Babu, R.R., Benipal, G.S. and Singh, A.K., 2005. Constitutive Modelling of Concrete an Overview. Asian Journal of Civil Engineering (Building And Housing), 6(4), 211-246.
- [10] Ortiz M., 1985. A Constitutive Theory for the Inelastic Behavior of Concrete. Mechanics of Materials 4, 67-93.
- [11] Yip, W.K., 1998. Generic Form of Stress-Strain Equations for Concrete. Cement and Concrete Research, 28 (4), 499-508.
- [12] Iğbar, S., 2002. Viskoelastik Malzemeli İki Boyutlu Elemanların Çözümlemesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [13] Aydın, A.C., 2004. Çimento Esaslı Malzemelerin Zamana Bağlı Davranışının Sayısal (Lattice) Modellenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [14] Bangash, M. Y. H., 1989. Concrete and Concrete Structures Numerical Modelling and Applications. Elsevier Science Publishers Ltd., 668 p, England.
- [15] Fattah A. M., 2012. Behavior of Concrete Columns Under Various Confinement Effects. PhD Thesis, Kansas State University, Kansas.
- [16] Wu, H., 2007. Constitutive Model of Concrete Confined by Advanced Fiber Composite Materials and Applications in Seismic Retrofitting. PhD Thesis, University Of Southern California, California.