

BETON DAVRANIŞINDA MİKROMEKANİK MODELLEME**Murat ÖRNEK***Ç.Ü., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana/ Türkiye***Babür DELİKTAŞ***M.K.Ü., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay/ Türkiye***Ferhun Cem CANER***Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona/ İspanya***Mustafa DEMİRCİ***Ç.Ü., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana/ Türkiye*

ÖZET : *Betonun malzeme davranışı itibariyle son derece karmaşık bir yapıya sahip olduğu bilinmektedir. Betondan imal edilen yapıların başarılı bir şekilde tasarlanması beton davranışının daha iyi modellenmesine doğrudan bağlıdır. Kullanılan malzeme modelinin gerçek davranışı temsil etmesi, özellikle yapı elemanlarının göçme yükleri hesaplanırken oldukça önemlidir. Bu amaçla geliştirilen birçok model malzeme mikromekaniğine dayanmaktadır. Bu çalışmada, betonun mekanik davranışı, mikromekanik yaklaşımla sayısal olarak modellenmiş ve sunulan modelin geçerliliği literatürde mevcut bir takım deneysel verilerle karşılaştırılarak araştırılmıştır.*

MICROMECHANICAL MODELLING IN CONCRETE BEHAVIOR

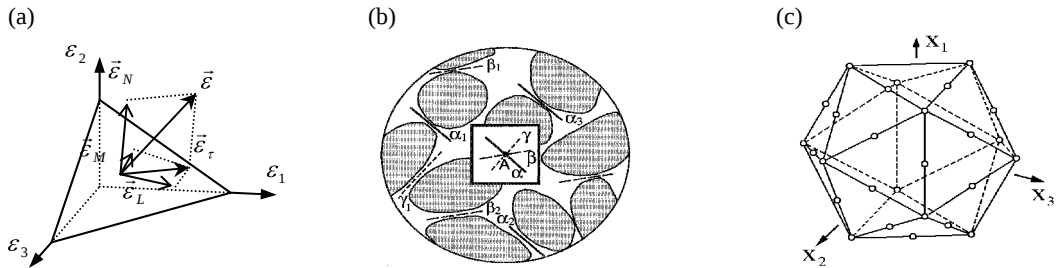
ABSTRACT : *It is known that constitutive behaviour of concrete has a complex structure. Project performance of concrete structures depends directly on the modelling of their behaviour. Especially when the collapse loads of structural members are of interest, representing of actual behaviour by material models is quite important. For these purposes, many of developed constitutive models are based on material micromechanics. In this study, mechanical behaviour of concrete was modelled numerically by means of a micromechanical approach and the validity of presented model was investigated by using suitable experimental data in literature.*

1. GİRİŞ

Betonun karmaşık mekanik davranışı, betona etkiyen gerilmelere bağlı olarak değişmektedir ve bu tür malzemelerin modellenmesi oldukça zordur. Bu tür özelliklerden dolayı, bugüne kadar betonun doğrusallık ötesinde mekanik davranışını yeteri kadar iyi bir şekilde temsil edebilen bir model geliştirilememiştir. Günümüzde ise mikromekanik temellere dayalı bilgisayar algoritmaları ile betonun bu karmaşık davranışı kısmen de olsa basitçe izah edilebilmekte ve sonuçta başarılı modeller kurulabilmektedir. Betonun mekanik davranışını modelleyebilen, aynı zamanda klasik sonlu elemanlar analizlerine kolayca uyarlanabilen ve kavramsal olarak da basit temellere dayanan model, “mikrodüzlem modeli” olarak isimlendirilmektedir. Beton için geliştirilen bu modelde, normal, hacimsel, şekilsel ve kayma gerilmeleri ile bu gerilmelere karşılık gelen deformasyonlar arasındaki ilişkiler, çeşitli doğrultulardaki düzlemler üzerinde tanımlanmaktadır. “Mikrodüzlem” adını alan bu düzlemler, malzemenin herhangi bir noktasında malzeme izotropluğunu bozmayacak şekilde uygun doğrultularda yerleştirilmişlerdir (1) (Şekil 1b).

Mikrodüzlem kavramı, ilk olarak Taylor tarafından polikristal metallerdeki plastik davranışın modellenmesinde ortaya atılmıştır (2). Taylor’un bu fikri daha sonra Batdorf ve Budianski tarafından ‘plastik kayma teorisi’ olarak açıklanmıştır (3). Yapılan çalışmalar neticesinde mikrodüzlem model serileri geliştirilmiş ve M1’den M6’ya kadar isimlendirilmişlerdir (4-8).

Bu çalışmada, Northwestern Üniversitesi’nde (ABD) beton için geliştirilen mikrodüzlem modeller serisinden altıncısını temsil eden (M6) mikrodüzlem modeli betonda gözlenen hacimsel-kaymasal çaprazlama etkilerini de içerecek şekilde geliştirilmiş ve beton mekanik davranışı sayısal olarak modellenmiştir. Yeni geliştirilen bu model M6I şeklinde isimlendirilmiştir. M6I modeli, gözenekli izotrop kayalar için geliştirilen M4R mikrodüzlem-tipi malzeme modeli formülasyonlarının M6 modeline uyarlanması ile elde edilmiştir (9). Bu çalışmada sunulan yeni modelin geçerliliği ve model parametrelerinin kalibrasyonu literatürde mevcut bir takım deneysel verilerle karşılaştırılarak araştırılmıştır.



Şekil 1. (a) Mikrodüzlem deformasyonları; (b) Malzeme yapısında mikrodüzlemler; (c) 21-noktalı Gauss integrasyonu için bir küre üzerinde mikrodüzlemlerin optimum dağılımı

2. MİKRODÜZLEM MODELİNDE TEMEL KAVRAMLAR

2.1. Model Formülasyonu

Gerilme ve deformasyon tensörleri σ ve ε 'nin bileşenleri bu tensörlerin değişmezlerinden oluşan eşitlikler, klasik malzeme modellerinin temellerini oluşturmaktadır. Bu çalışmada sunulan mikrodüzlem malzeme modeli ise, birim normal vektörü (n_i) olarak tanımlanmış bir düzleme etki eden gerilme ve deformasyon vektörleri arasındaki ilişkiyle ifade edilir. Mikrodüzlem üzerindeki normal deformasyon $\varepsilon_N = n_i \varepsilon_{Ni}$ şeklinde hesaplanır. Şekil 1a'dan,

$$\varepsilon_N = N_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

olduğu tespit edilebilir. Burada $N_{ij} = n_i n_j$, $i, j = 1, 2, 3$ olmaktadır.

Mikrodüzlemdeki kesme deformasyonları M ve L yönlerinde, mikrodüzlem içinde birbirine dik bulunan ve bileşenleri m_i, l_i olan $\vec{m}$ ve $\vec{l}$ birim vektörleri tarafından tanımlanır. $\vec{m}$ ve $\vec{l}$ vektörlerinden biri seçilir, diğeri seçilen vektörün $\vec{n}$ ile vektörel çarpımından elde edilir. $\vec{m}$ ve $\vec{l}$ yönlerindeki kesme deformasyon bileşenleri $\varepsilon_M = m_i (\varepsilon_{ij} n_j)$ ve $\varepsilon_L = l_i (\varepsilon_{ij} n_j)$ ifadelerinden hesaplanır ve tensör simetrisi düşünülerek bu bileşenler için;

$$\varepsilon_M = M_{ij} \varepsilon_{ij} \quad \varepsilon_L = L_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

elde edilir. Burada $M_{ij} = (m_i n_j + m_j n_i) / 2$ ve $L_{ij} = (l_i n_j + l_j n_i) / 2$ olarak ifade edilir (3).

Mikrodüzlem ve sürekli ortam seviyesindeki deformasyonları birbirine bağlayan kinematik sınırlamalardan dolayı gerilmelerin statik eşitlikleri yaklaşık olarak sağlanabilmektedir. Statik denge, virtüel iş prensibinin birim yarıküre yüzeyi (Ω) üzerinde uygulanmasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir (10):

$$\frac{2\pi}{3} \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} = \int_{\Omega} (\sigma_N \delta \varepsilon_N + \sigma_L \delta \varepsilon_L + \sigma_M \delta \varepsilon_M) d\Omega \quad (3)$$

Eşitlik (3), birim küredeki sürekli ortam gerilmelerince yapılan işin, küre yüzeyindeki gerilme vektörü olarak ele alınan mikrodüzlem gerilme bileşenlerinin yaptığı işe eşit olması anlamına gelmektedir. Söz konusu integralin fiziksel anlamı, malzeme üzerinde çeşitli yönlerdeki düzlemlerden gelen farklı katkıların homojenleştirilmesidir (10). $\delta \varepsilon_N$, $\delta \varepsilon_L$, $\delta \varepsilon_M$ ifadeleri yerine sırasıyla $N_{ij} \delta \varepsilon_{ij}$, $L_{ij} \delta \varepsilon_{ij}$ ve $M_{ij} \delta \varepsilon_{ij}$ yazılır ve elde edilecek eşitliğin herhangi bir $\delta \varepsilon_{ij}$ için geçerli olduğu kabul edilirse;

$$\sigma_{ij} = \frac{3}{2\pi} \int_{\Omega} s_{ij} d\Omega \approx 6 \sum_{\mu=1}^{N_m} w_{\mu} s_{ij}^{(\mu)}; \quad s_{ij} = \sigma_N N_{ij} + \sigma_L L_{ij} + \sigma_M M_{ij} \quad (4)$$

elde edilir (1). Yukarıdaki yaklaşık eşitlikte integralin değeri, $\sum_{\mu} w_{\mu} = 1/2$ olacak şekilde optimum Gauss integrasyonu (Şekil 1c) kullanılarak sayısal olarak elde edilebilir. Günümüzde kullanılan en etkili integrasyon, minimum sayıda mikrodüzlem kullanıldığında kabul edilebilecek bir doğruluk sağlayan ve 21 mikrodüzlemli integrasyondur (5,6,11).

Mikrodüzlem seviyede beton için en genel malzeme davranış eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılabilir (12).

$$\begin{aligned}\sigma_N(t) &= F_{\tau=0}^t [\varepsilon_N(\tau), \varepsilon_M(\tau), \varepsilon_L(\tau)] \\ \sigma_L(t) &= G_{\tau=0}^t [\varepsilon_N(\tau), \varepsilon_M(\tau), \varepsilon_L(\tau)] \\ \sigma_M(t) &= H_{\tau=0}^t [\varepsilon_N(\tau), \varepsilon_M(\tau), \varepsilon_L(\tau)]\end{aligned}\quad (5)$$

burada F, G ve H, t anında mikrodüzlem deformasyonlarının fonksiyonelleridir ve x indisi N, D ve V değerlerini alır.

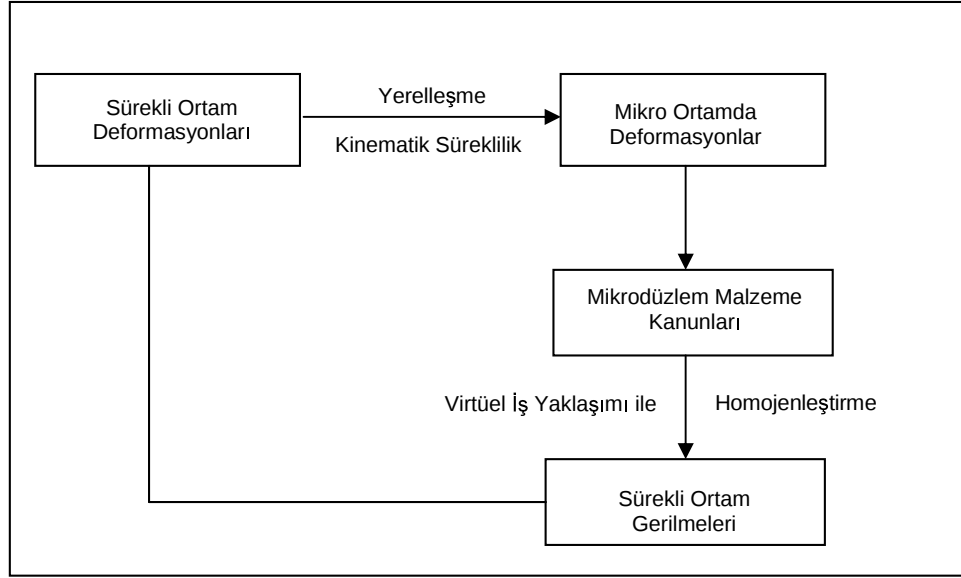
2.2. Modelin Çalışma Prensipleri ve Sınır Şartlarının Tanımlanması

Sürekli ortam seviyesinde ele alınan deformasyonlar, kinematik süreklilik yaklaşımı ile yerleşme (lokalizasyon) yapılarak mikro seviyede tanımlanır. Kinematik bağlanma, sürekli ortam seviyesindeki deformasyon tensörlerinin mikrodüzlemdeki izdüşümü; statik bağlanma, sürekli ortam seviyesindeki gerilme tensörlerinin mikrodüzlemdeki izdüşümü olarak değerlendirilir. Mikrodüzlem seviyede tanımlanan deformasyonlar, mikrodüzlem malzeme kanunları kullanılarak virtüel iş yaklaşımı ile homojenleştirilir. Ardından makro gerilmelere ulaşılır. Sonuçta da makro ortamda gerilme ve deformasyonlar elde edilir (13) (Şekil 2). Olay malzeme boyutunda ele alındığında ise sürekli ortam seviyesinde ele alınan herhangi bir nokta temsili hacim eleman olarak kabul edilir. Hacim elemanın içinde, malzeme izotropluğunu bozmayacak şekilde uygun doğrultularda mikrodüzlemler düşünülür. Mikrodüzlemler, normal, şekilsel, hacimsel ve kayma gerilmeleri ile bu gerilmelere karşılık gelen deformasyonlar arasındaki ilişkilerin tanımlandığı çeşitli doğrultulardaki düzlemlerdir. Temsili hacim elemanda mikrodüzlem sayısı 21, 28, 37 ve 61 olarak değişmektedir. bu değerler birim küre üzerinde en optimum şekilde dağılabilen mikrodüzlem sayılarıdır.

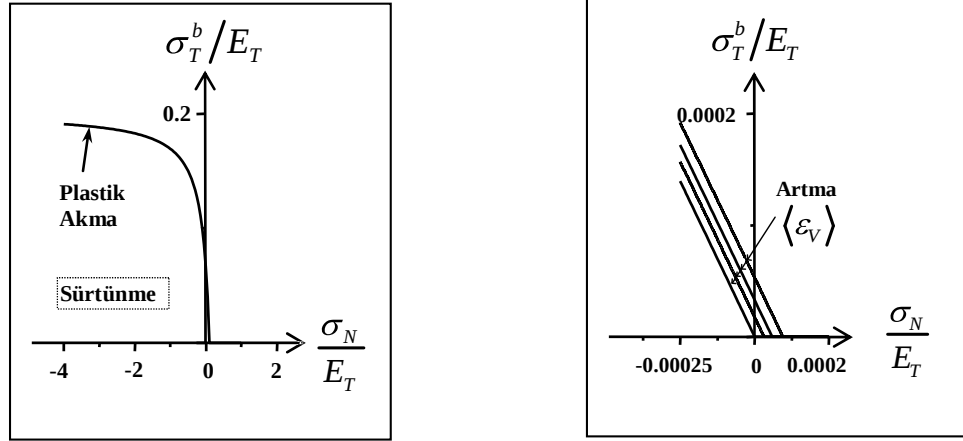
Modelde kullanılan FORTRAN diliyle yazılan programda, poisson oranı, mikrodüzlem sayısı, elastik modül, betonun yaşı, yükleme süresi, basınç mukavemeti, agrega-çimento oranı, çimento yoğunluğu (kg/m^3), su-çimento oranı, yükleme yolu, yükleme miktarı, yükleme artımları gibi girdilerin yanı sıra, mikrodüzlem mekanizmalarını kontrol eden parametreler bulunmaktadır. Bunlar, her beton için ayrı alınabilen, farklı betonlar arasındaki farkları yansıtan ve k1, k2, k3, k4 olarak adlandırılan serbest parametreler ile; c1'den c25'e kadar uzanan ve tüm beton tipleri için aynı alınabilen, ölçülmesi zor, sabit parametrelerdir. Bu parametrelerden her biri betondaki farklı davranışları temsil ettiğinden, herhangi parametrenin değişmesi, diğer davranışları etkileyebilir. Belirtilen tüm parametreler boyutsuzdur (14,15).

Mikrodüzlem yaklaşımı belli kanunlara dayanmaktadır. Mikrodüzlem yaklaşımında betonun elastik olmayan davranışları gerilme ve deformasyon sınırları ile karakterize edilmektedir. Bu sınırlar; yatay sınırlar (yani plastik limitler), normal gerilme sınırı, kayma gerilmesi sınırları, sürtünmesel akma yüzeyi ve hacimsel sınırlardır. Bu sınırları her biri, betonda görülen fiziksel mekanizmaları temsil etmektedirler.

Yatay sınırlar yani plastik limitler, sınırlandırılmamış basınç ve çekmedeki gerilme tepe noktalarının yuvarlaklığını ve tekrarlamalı yüklemelerde çevrimsel döngüleri kontrol ederken mikrodüzlem akma limitlerini tanımlarlar (10). Yatay sınırlar aynı zamanda betondaki süneklik derecesini ayarlar (Şekil 3).



Şekil 2. Mikrodüzlem Modelinin Çalışma Prensibi

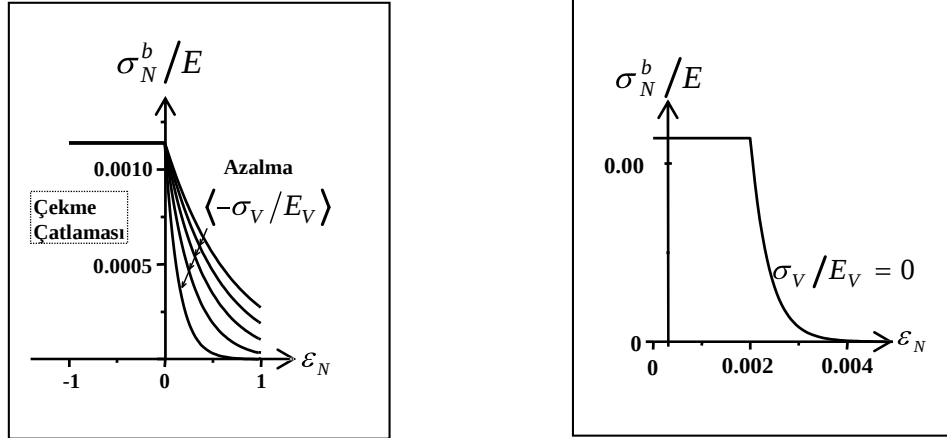


Şekil 3. Mikrodüzlem modelinde plastik limitler (sağdaki büyütülmüş görünümüdür)

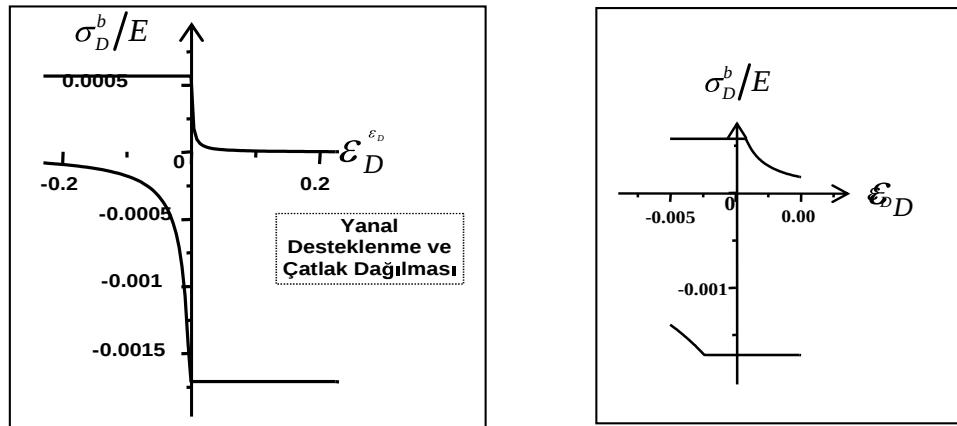
Normal gerilme sınırı, mikrodüzleme paralel olan çekme çatlamlarını tanımlar. Şekil 4'te gösterilen gerilme sınırının aşılması durumunda çekme çatlamları meydana gelir. Mikrodüzlemdeki davranış sınırlardan birine ulaşılan kadar elastiktir. Herhangi bir sınır aşıldığında gerinim sabit tutularak gerilme sınıra geri düşürülür.

Kayma gerilmesi sınırları, eksenel ezilmeyi, eksenel olarak dağılmış çatlakların yanal çatlak açıklıklarını ve hacimsel genişlemeyi kontrol eder (1). Şekil 5'te gösterilen aralıklarda kalınması durumunda oluşabilecek muhtemel çatlaklar yanal desteklenmeyle önlenmekte ve çatlak dağılması olmamaktadır.

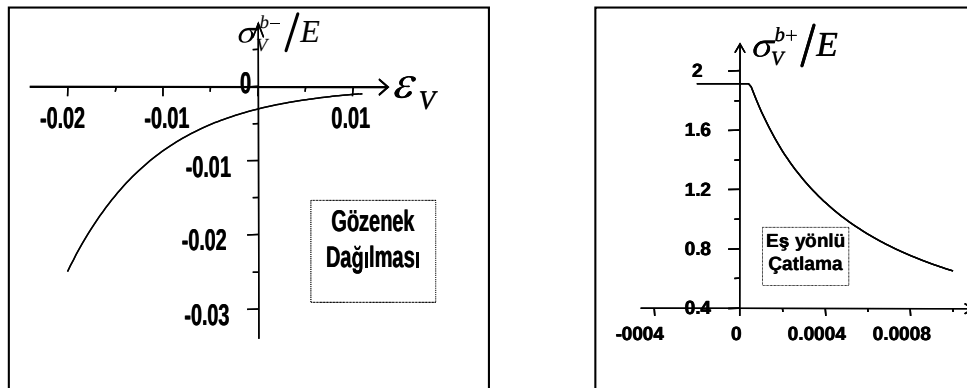
Hacimsel sınırlar, hacim genişlemesi ve daralması ile ortaya çıkan izotropik çatlamları ve gözenek göçmesini tanımlar. Şekil 6'da gösterilen sınırların aşılması halinde eş yönlü çatlamlar ve gözenek dağılması meydana gelir. Aşılmaması halinde beton, elastik davranışını sürdürür.



Şekil 4. Mikrodüzlem modelinde normal gerilme sınırları (sağdaki büyütülmüş görünümüdür)



Şekil 5. Mikrodüzlem modelinde kayma gerilmesi sınırları (sağdaki büyütülmüş görünümüdür)



Şekil 6. Mikrodüzlem modelinde hacimsel sınırlar

M6I mikrodüzlem modelini diğer mikrodüzlem modeli serilerinden farklı kılan faktör, kayma ve hacimsel sınırların tanımlanma biçimidir. Burada M6I modelindeki kayma sınırı, bir önceki model olan M6'ya M4R modelinden (9) gelen katkıların dâhil edilmesiyle tanımlanmıştır. M4R modelinden gelen katkı, büyük kesme deformasyonlarında mukavemetin geri kazanım faktörüne bağlı bir fonksiyondur. Bu fonksiyonda tanımlanan, minimum hacimsel gerilmeye bağlı ϕ (phi) fonksiyonu ise, dağılmaya bağlı olarak mukavemet azalması faktörüdür.

$$\sigma_s^b = \sigma_s^{M6} f_r \left(|\varepsilon_T|^{\max} \right) \quad (6)$$

$$\sigma_s^{M6} = \frac{E_T k_1 k_2 c_{10} \langle \sigma_N^0 - \sigma_N \rangle}{E_T k_1 k_2 + c_{10} \langle \sigma_N^0 - \sigma_N \rangle} \quad \sigma_N^0 = E_T k_1 c_{11} / \left(1 + c_{12} \frac{\langle \varepsilon_V \rangle}{k_1} \right) \quad (7)$$

$$f_r \left(|\varepsilon_T|^{\max} \right) = (1 - \phi) \left[1 - \exp \left(-c_{25} |\varepsilon_T|^{\max} / k_1 \right) \right] + \phi \quad (8)$$

$$\phi(\sigma_V^{\min}) = c_{22} + \frac{1 - c_{22}}{1 + \exp \left[c_{23} \left(c_{18} - \frac{3\sigma_V^{\min}}{E_V k_1} \right) \right]} \quad (9)$$

M6I mikrodüzlem modelindeki diğer bir değişiklik ise hacimsel sınırlarda olmuştur. Burada yine M4R modelinden gelen katkılar söz konusudur. Basınç hacimsel sınırda, M6 mikrodüzlem modelindeki sınırlara ilave olarak, tüm mikrodüzlemlerdeki kesme deformasyonları ortalaması (J_2^ε)'nin karekökü olarak tanımlanmış $\bar{\varepsilon}$ etkili şekilsel deformasyona bağlı f_d fonksiyonu ile hacimsel gerinme bağlı olarak değişen f_i fonksiyonu dâhil edilmiştir.

$$\sigma_V^{b-} = \sigma_V^{b-M6} f_i(\varepsilon_V) f_d(\bar{\varepsilon}) \quad (10)$$

$$\sigma_V^{b-M6} = E_V k_1 k_3 \exp(-3\varepsilon_V / k_1 k_4) \quad (11)$$

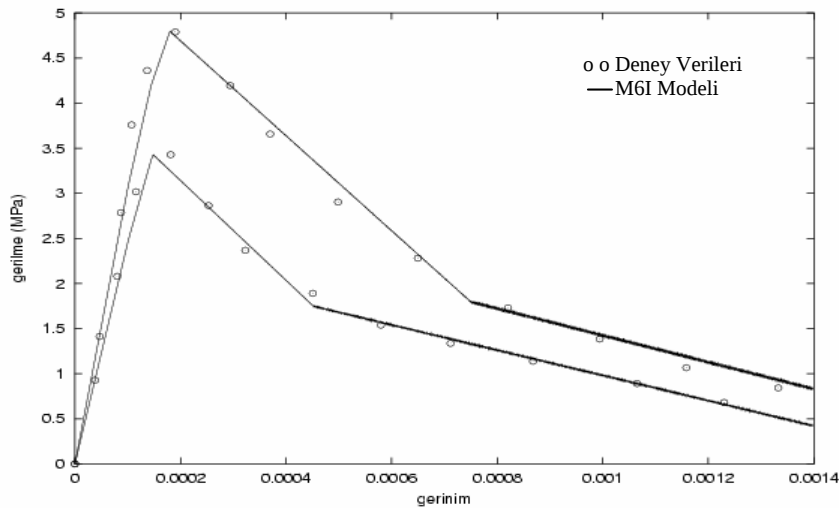
$$f_i(\varepsilon_V) = 1 / \left[1 + \exp \left\{ c_{15} \left(3\varepsilon_V / k_1 + c_{18} \right) \right\} \right] \quad (12)$$

$$f_d(\bar{\varepsilon}) = f_i \exp(-c_{24} \bar{\varepsilon} / \varepsilon_V) + (1 - f_i) \quad (13)$$

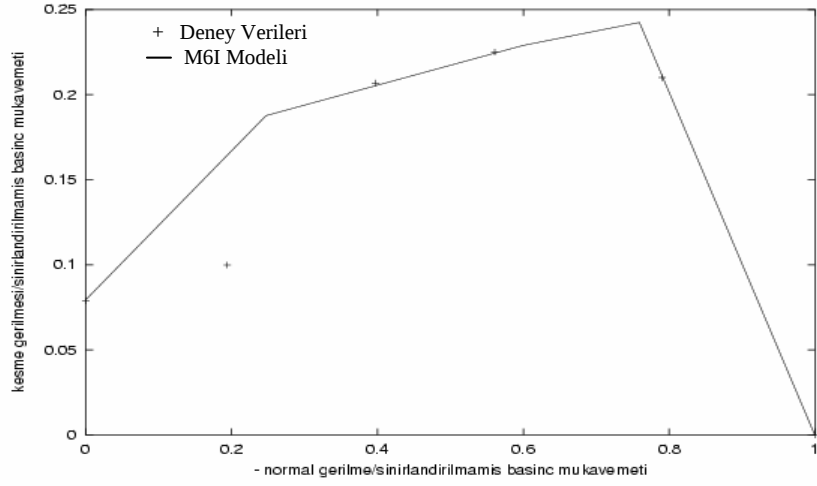
$$\bar{e} = \sqrt{J_2^{\varepsilon}} \quad (14)$$

3. DENEY VERİLERİ İLE MODEL SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

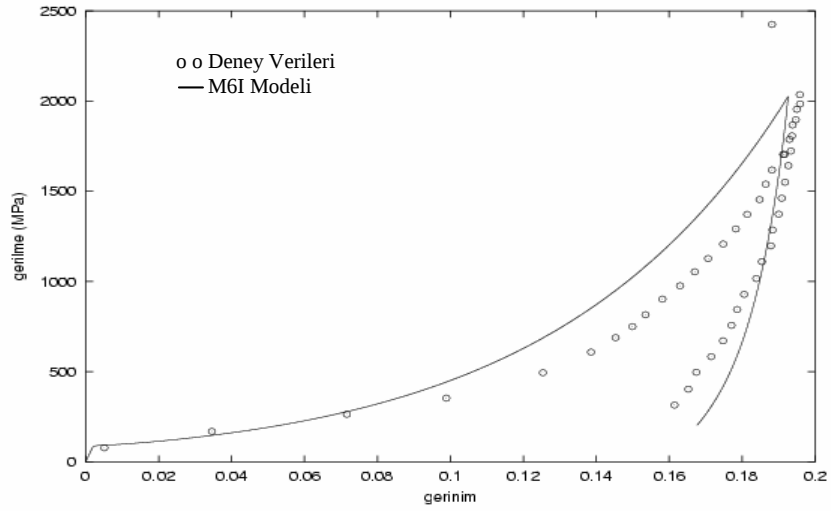
Bu bölümde M6I mikrodüzlem modelinin güvenilirliğini ve doğruluğunu göstermek için bu model tarafından üretilen sonuçlar, betonun davranışını karakterize eden çeşitli deney verileri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 7, Petersson tarafından yapılan “tek eksenli çekme” deney sonuçlarının M6I mikrodüzlem modeli ile modellenmesini göstermektedir (16). Sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Analiz sırasında aynı parametre grubu şekildeki her veri grubu için kullanılmıştır. Tek eksenli basınç durumunda ise, tepe sonrası eğimi, herhangi benzer test verisi uyarlanarak kolayca modellenebilir. Şekil 8’de, Bresler ve Pister tarafından sunulan “kesme basıncı ile oluşan kırılma zarfı”nın M6I mikrodüzlem modeli ile modellenmesi gösterilmektedir (17). Sonuç olarak yeni geliştirilen M6I mikrodüzlem modelinin iyi bir modelleme gerçekleştirdiği söylenebilir. Bazant tarafından yapılan “sınırlandırılmış basınç” deney sonuçlarının M6I mikrodüzlem modeli ile modellenmesi Şekil 9’da görülmektedir (6). Özellikle yük boşalma bölgesinde test verileri ile model arasındaki uyumun oldukça iyi olduğu ifade edilebilir. Şekil 10, Water Experiment Station -WES (1994)’ te elde edilen hidrostatik basınç test sonuçlarının M6I mikrodüzlem modeli ile modellenmesi gösterilmektedir. Sonuçlar, genel eğilimin birbiri ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu veriler WES’te yapılan diğer beton davranış deneylerinde bulunan optimum parametreler (k ve c katsayılı) kullanılarak elde edildiği için şekilde görülen kısmi uyumsuzlukların normal olabileceği düşünülmüştür. Kullanılan parametrik ifadeler modelin genelliğini korumak için değiştirilmemiştir.



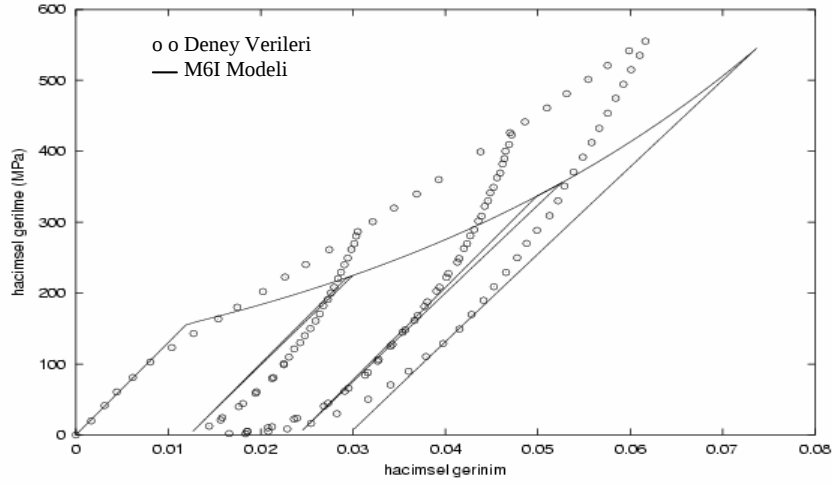
Şekil 7. Tek eksenli çekme deneyi (16) ve M6I modellemesi



Şekil 8. Kesme basıncı ile oluşan kırılma zarfı (17) ve M6I modellemesi



Şekil 9. Sınırlandırılmış basınç deneyi (6) ve M6I modellemesi



Şekil 10. Hidrostatik basınç deneyi (Water Experiment Station-WES, 1994) ve M6I modellemesi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada beton mekanik davranışı mikromekanik yaklaşımla sayısal olarak modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- M6 mikrodüzlem modeli, betonda görülen hacimsel-kaymasal çaprazlama etkilerini de içerecek şekilde geliştirilip M6I olarak adlandırılmıştır.
- Mikrodüzlem modeli kavramsal olarak basit bir modeldir.
- Mikrodüzlem modeli, kayalar ve betonların anizotropik mekanik davranışı için kolaylıkla uyarlanabilecek niteliktedir.
- Mikrodüzlem modeli, fiziksel mekanizmalar kullanılarak malzeme davranışının belirlendiği bir modeldir.
- Mikrodüzlem modeli, yüzlerce farklı yükleme geçmişi yaratabilecek potansiyele sahiptir.
- Mikrodüzlem modeli, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplamalı mekanik uygulamaları için son derece kolay entegre edilebilen, ancak yüksek hesap gücü gerektiren bir modeldir.

5. KAYNAKLAR

1. Bazant, Z.P., "Microplane Model for Strain controlled inelastic behaviour", Chapter 3 in *Mechanics of Engineering Materials (Proc., Conf. held at U. of Arizona, Tucson, Jan. 1984)*, C.S. Desai ve R.H. Gallagher, eds., J. Wiley, London, 45-59, 1984.
2. Taylor, G.I., "Plastic strain in metals", *Journal of Inst. Metals*, 62, 307-324, 1938.
3. Batdorf, S.B. ve Budianski, B. "A math. theory of plasticity based on the concept of slip", Tech. Note No: 1871, Nat. Advis. Comm. for Aeronautics, Washington D.C., 1949.
4. Bazant, Z.P., Prat, P.C., "Microplane Model for brittle plastic material: I. Theory", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE 114, 1672-1688, 1988a.

5. Bazant,Z.P. ve Oh,B.H., “Microplane Model for progressive fracture of concrete and rock”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE 111, 559-582, 1985.
6. Bazant,Z.P. ve Oh,B.H., “Efficient Numerical Integration on the surface of a sphere”, *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik (ZAMM, Berlin)*, 66, (1), 37-49, 1986.
7. Bazant,Z.P. ve Planas,J., “Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials” CRC Press, Boca Raton, Florida, (ISBN: 084938284X), 1997.
8. Carol,I., Jirasek,M. ve Bazant,Z.P., “New thermodynamic approach to microplane model. Part I: Free Energy and consistent microplane stresses”, Report, Northwestern University; 1999.
9. Bazant,Z.P. ve Zi,G., “Microplane Constitutive Model for Porous Isotropic Rocks”, *Int. J. for Num. and Analytical Meth. in Geomechanics*, 2002.
10. Bazant,Z.P., Xiang,Y. ve Prat,P.C., “Microplane Model for Concrete. I. Stress-Strain boundaries and finite strain”, *Journal of Engg. Mech.*, ASCE 122(3), 245-254, 1996a.
11. Stroud,A.H., “Approximate Calculation of Multiple Integrals”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1971 (ASIN: 0130438936).
12. Bazant,Z.P., Caner,F.C., Adley,M.D., Akers,S.A., "Microplane model M4 for concrete I: Formulation with work-conjugate deviatoric stress" *J. of Eng. Mechanics*, ASCE, 126(9): 944-953, 2000.
13. Örnek,M., Caner,F.C. ve Deliktaş,B., “Modelling Studies to Simulate Mechanical Behavior Of Concrete”, 3rd FAE, International Symposium, TRNC, 2004.
14. Caner,F.C. ve Bazant,Z.P., “Microplane model M4 for concrete, II. Algorithm and Calibration”, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol.126, No.9, pp. 954-961, 2000.
15. Örnek,M., “Beton Mekanik Davranışının Mikromekanik Yaklaşımına Sayısal Olarak Modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya, Hatay, 2004.
16. Petersson,P.E. “Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials”, Report No. TVBM 1006, Lund Inst. of Technology, Lund, Sweden, 1981.
17. Bresler,B., ve Pister,K.S. “Strength of concrete under combined stresses”, *J. Am. Concr. Inst.*, 551(9), 321-345, 1958.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.