

DEMİR ESASLI T/M PARÇALARIN KIRILMA TOKLUĞU, SERTLİĞİ VE MİKRO YAPISAL KARAKTERİZASYONU

Hüseyin UZUN, İsmail KILIÇ

Özet — Bu çalışmada, Fe-Cu-C ve Fe-Cu esaslı toz metalurjisi (T/M) parçalar farklı oranlarda toz karışımları kullanılarak üretilmiştir. Üretim aşamasında, önce tozlar karıştırılmış, sonra soğuk preslenmiştir. Preslenen parçalar 1200 °C'de vakumlu bir fırında 45 dakika sinterlenmiş ve fırında yavaş soğutularak test numuneleri elde edilmiştir. Fe-Cu numunelerinde bakır miktarı ve Fe-Cu-C numunelerinde hem bakır, hem de grafit miktarları değiştirilerek üretilen T/M parçaları, suda ve yağda sertleştirilmişlerdir. Üretilen Fe-Cu-C ve Fe-Cu T/M parçaların sinterlenmiş halde ve ısı işlem ile sertleştirildikten sonra, kırılma toklukları ve sertlikleri tespit edilmiştir. Bakır ve grafit miktarı artışlarının, malzemenin kırılma tokluğunu (K_{1C}) ve sertliğini nasıl etkilediği incelenmiştir. Meydana gelen mikro yapısal değişiklikler değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, Fe-Cu-C ve Fe-Cu T/M parçalarında, bakır ve grafit oranı arttıkça, sertlik miktarı da artış göstermiştir. Bakır oranı arttıkça kırılma tokluğu (K_{1C}) da artmıştır. Grafit oranı arttıkça (K_{1C}) değerinde azalma meydana gelmiştir. Kırılma tokluğu ve sertlik değerleri suda sertleştirilmiş numunelerde en fazla, yağda sertleştirilmişlerde daha düşük ve ısı işlem görmemişlerde ise en düşük olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler — Fe-Cu-C T/M parçalar, Fe-C, T/M parçalar, kırılma tokluğu, toz metalurjisi.

Abstract — In this work, both Fe-Cu-C and Fe-Cu based alloys in different volume fractions were fabricated by mechanical powder metallurgy involving powder mixing, cold pressing and sintering at 1200°C in a vacuum atmosphere for 45 minutes followed by cooling in the sintering furnace. The various amount of copper or copper and graphite additions were used in Fe-Cu and Fe-Cu-C alloy system, respectively. Two

different heat treatments having water quenching and oil quenching were carried out on sintered specimens. The fracture toughness and hardness of Fe-Cu and Fe-Cu-C specimens for two different heat treatment conditions were carried out. The effect of copper and graphite contents on fracture toughness and hardness were investigated. The investigation of microstructure characterisation by light microscopy was also reported. The results show that the hardness of both alloys increased with increasing copper and graphite contents. The fracture toughness of these alloys also increased with increasing copper content but decreasing with the graphite content. The fracture toughness and hardness values of the water quenched specimens are higher than that of the oil quenched and sintered specimens, respectively.

Keywords — Fe-Cu-C P/M component, Fe-Cu P/M component, fracture toughness, powder metallurgy.

I.GİRİŞ

Toz metalurjisi dünyanın gelişmiş ülkelerinde yaygın olarak kullanılmakta olup, mamulleri endüstride geniş uygulama alanları bulmaktadır [1]. Bilinen bütün metal ve karışımlar, T/M yöntemi ile istenilen bileşimi verecek şekilde hazırlanabilir. Talaşlı imalat gerektirmeyen parçalar, sert metaller, takım çelikleri kendi kendini yağlayan burçlar, gözenekli ortamlar ve filtreler, sürtünme elemanları, elektrik kontak malzemeleri, grafit fırçalar ve miknatıslar bunlardan bazılarıdır. Parça üretimi dışında pek çok uygulamada da metal tozları doğrudan kullanılmaktadır [2]. Fe-Cu-C ve Fe-Cu T/M parçalarının endüstriyel önemi oldukça fazladır. Seri üretimde ekonomik olması, mukavemet özelliklerinin iyi olması ve karmaşık şekilli parçaların rahatlıkla üretilmesine imkan tanınması nedeniyle, demir esaslı T/M parçaları birçok alanda kullanılmaktadır [3]. Mukavemet gerektiren ve yük taşıyan yataklar genel olarak demir esaslı bakır içeren malzemelerdir.

H.UZUN: Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, huzun@sakarya.edu.tr, İ. KILIÇ: Sapanca Teknik ve Çok Programlı Lise ismailkiloc61@mynet.com.

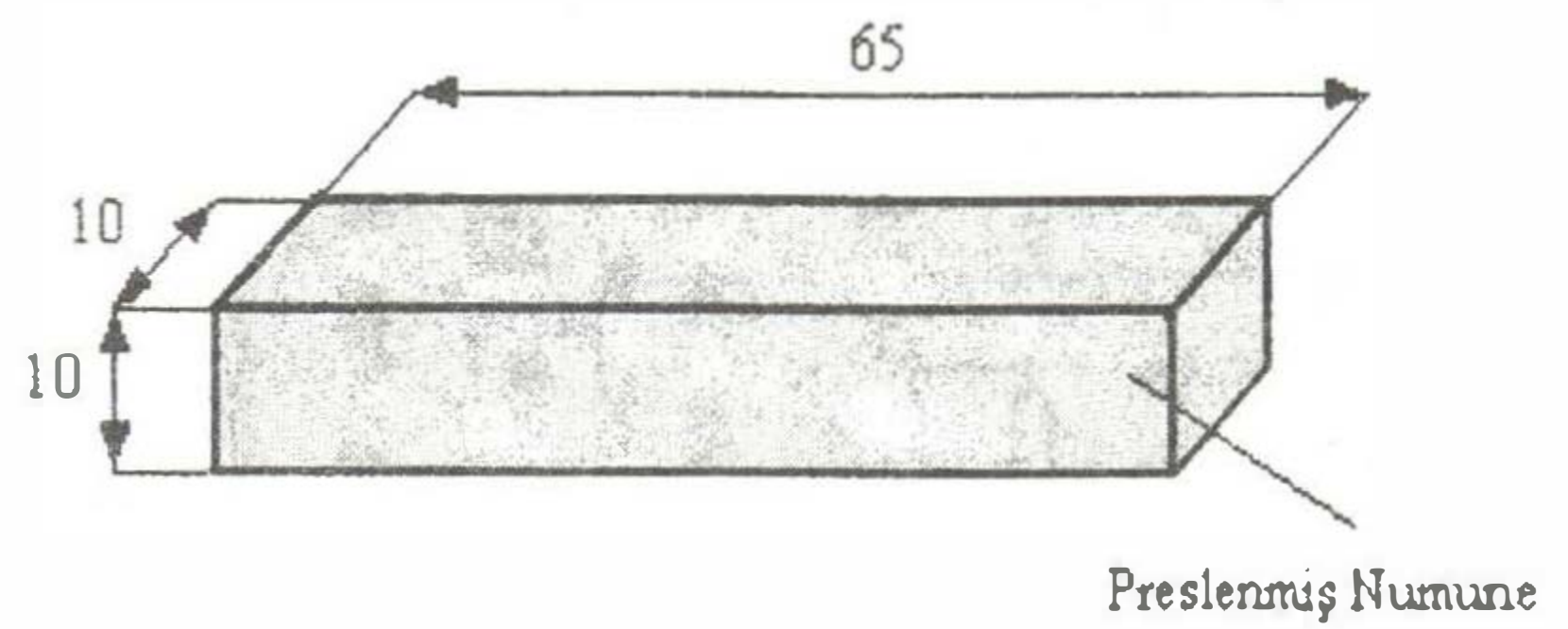
üretilmektedir. Otomotiv sektöründe, askeri araç parçalarında, büro makine parçalarında ve el aletleri aksamalarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Endüstride yaygın kullanılmasına rağmen, özellikle kırılma tokluğu konusunda yeterli çalışma olmayışı bizi bu çalışmanın yapılmasına yöneltmiştir.

Bu çalışmada, Fe-Cu ve Fe-Cu-C esaslı malzemeler toz metalurjisi yöntemleri ile üretilmiştir. Üretilen numunelerde farklı %Cu ve %C kullanılarak, malzemenin sertliği ve kırılma tokluğu üzerinde nasıl bir etkiye sahip olabilecekleri incelenmiştir. Ayrıca numuneler yağda ve suda soğutulmuş, iki farklı sertleştirme işlemine tabi tutulmuşlardır. Malzemenin hem sertlik hem de kırılma tokluğu üzerinde, bu farklı sertleştirme ortamlarının etkileri irdelenmiştir. Mikro yapısal karakterizasyon yapılarak malzemedeki metalurjik faktörlere bağlı olarak değişen yapılar tespit edilmiştir.

II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, numuneler 65x10x10 mm boyutlarında ve 384 MPa'lık bir basınç altında preslenerek üretilmiştir. Preslenen numune Şekil 1'de gösterilmektedir. Fe-Cu ve Fe-Cu-C esaslı olmak üzere iki farklı numunede değişik miktarlarda kullanılarak üretilen bu parçaların içerikleri ve miktarları Tablo 1'de gösterilmektedir. Bu karışım tozları 0,01gr hassasiyetli terazide tartıldı.

Tozların mümkün olduğunca homojen dağılımını sağlamak için, karıştırıcı vasıtasıyla yaklaşık 80 dakika karıştırıldı.



Şekil 1. Preslenmiş deney numunesi

II.1 Numunelerin Sinterlenmesi ve Isıl İşlem

Numunelerin sinterleme işlemi 1200 °C sıcaklıkta ve 45 dakika kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra fırında soğumaya bırakılmıştır. Sinterlenme işleminden sonra numuneler, üç gruba ayrıldı. Birinci grup numunelere herhangi bir ısıl işlem yapılmadı, ikinci grup numuneler 800 °C'de 2 saat bekletildikten sonra yağda soğutuldu ve üçüncü grup numuneler de 800 °C'de 2 saat bekletildikten sonra suda soğutuldu. Sinterleme sonrası ısıl işlem, 12 KW gücünde, 1500 °C ısıtma kapasiteli elektrikle çalışan kutu tipi bir fırında yapılmıştır.

Tablo 1. Tozların karışım oranları

T/M malzeme Grubu	Demir tozu mik. (% Ağırlık)	Bakır tozu mik. (%Ağırlık)	Grafit tozu mik. (%Ağırlık)	Çinko streat (%Ağırlık)
Fe-Cu-C	94,4	3,5	1,5	0,6
Fe-Cu-C	92,9	5	1,5	0,6
Fe-Cu-C	91,4	5	3	0,6
Fe-Cu	95,9	3,5	-	0,6
Fe-Cu	94,4	5	-	0,6

II.2 Sertlik Ölçümü

Numuneler hem sinterleme hem de ısıl işleminden, sonra her numune üzerinden ortalama 3 farklı noktadan sertlik ölçümü yapılmıştır. Her numunenin sertlik değeri Brinell sertlik değeri cinsinden ölçülmüş ve ortalama değeri alınmıştır.

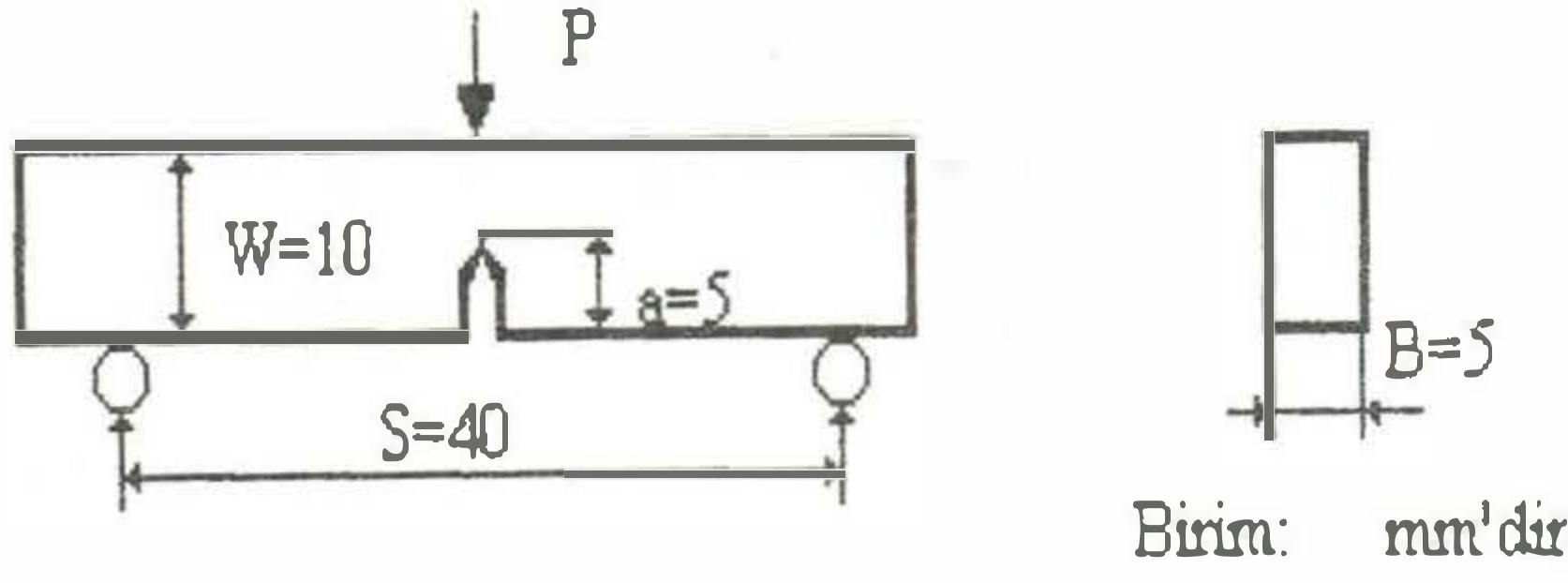
Brinell sertlik değeri tespit edilirken, 2,5 mm çapında sert bilya numune yüzeyine 187,5 kgf'lik bir kuvvet uygulayarak 30 sn'lik bir müddetle tutulmuştur.

II.3 Üç Nokta Kırılma Tokluğu Deneyi

Kırılma tokluğu deneyi için kullanılan numuneler ASTM E-399 standardında belirtilen ebat ve şekillerde hazırlanmıştır. Şekil 2'de kırılma tokluğu numunesinin boyut ve şekli verilmiştir. Önce 4mm derinliğinde çentik

açılıp, yorulma cihazında, 1mm'lik yorulma çatlakları oluşturulmuştur.

Kırılma tokluğu değerleri, ASTM E-339'da verilen (1) numaralı formül kullanılarak hesaplanmıştır [4].



Şekil 2. ASTM E-339'a göre üç nokta kırılma tokluğu numunesi ebatları

$$K_{1C} = \frac{P.S}{B.(W)^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (1)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \left[1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W} \right) \left(2,15 - 3,93 \left(\frac{a}{W} \right) + 2,7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 \right) \right]}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}}$$

K_{1C} =Kırılma tokluğu (MPa \sqrt{m})

B=Numunenin kalınlığı (m)

W=Numunenin genişliği (m)

S=Numunenin temas ettiği kısmın mesafesi (m)

P=Uygulanan maksimum yük (MN)

$f\left(\frac{a}{W}\right)$ =Numune geometri faktörü

III. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

III.1 Sertlik Ölçümü Sonuçları

Tablo 2'de, Fe-Cu-C ve Fe-Cu T/M parçalarının, brinell sertlik deneyleri sonuçları verilmiştir. Fe-Cu numunelerinde grafit %1,5'da sabit tutulmuş ve bakır miktarı %3,5'den %5'e artırılmıştır. Şekil 3'de bakır miktarının sertliğe olan etkisi, değişik ısıl işleme şartlarında grafik olarak gösterilmiştir.

Tablo 2. Numunelerin sertlik değerleri

Numune Adı	Brinell Sertlik Değerleri (kgf/mm ²)		
	Sinterlenmiş Numune	Sinterleme+Yağda Su Verilmiş Numune	Sinterleme+Suda Su Verilmiş Numune
%94,4Fe-%3,5 Cu-%1,5C	98±10	104±9	114±8
%92,9Fe-%5 Cu-%1,5C	111±8	113±5	125±3
%91,4Fe-%5 Cu-%3C	127±9	134±4	142±6
%95,9Fe-%3,5 Cu	62±7	64±8	91±6
%94,4Fe-%5 Cu	70±8	73±5	98±5

Şekil 3 ve 4'te görüldüğü gibi, bakır oranının artması sertliği artırmıştır. Sertlik değerleri aynı içerikli numunelere bakıldığında, suda soğutulmuşta daha fazla, yağda soğutulmuşta biraz düşük ve sinterlenmiş numunelerde en düşük seviyededir.

Fe-Cu karışımı T/M parçalarında bakır oranının değiştirilmesinin sertliği nasıl etkilediği incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar değişik ısıl işlem şartlarına bağlı olarak Şekil 4'de verilmiştir. Burada da bakır miktarının artması sertlikte de artışa neden olmaktadır.

Bakır miktarı arttıkça malzeme yoğunluğu da artacak [5], dolayısıyla bu sertlik artışı olarak sonuçlanacaktır. Kırılma enerjisi ise azalacaktır. Dolayısıyla elde edilen

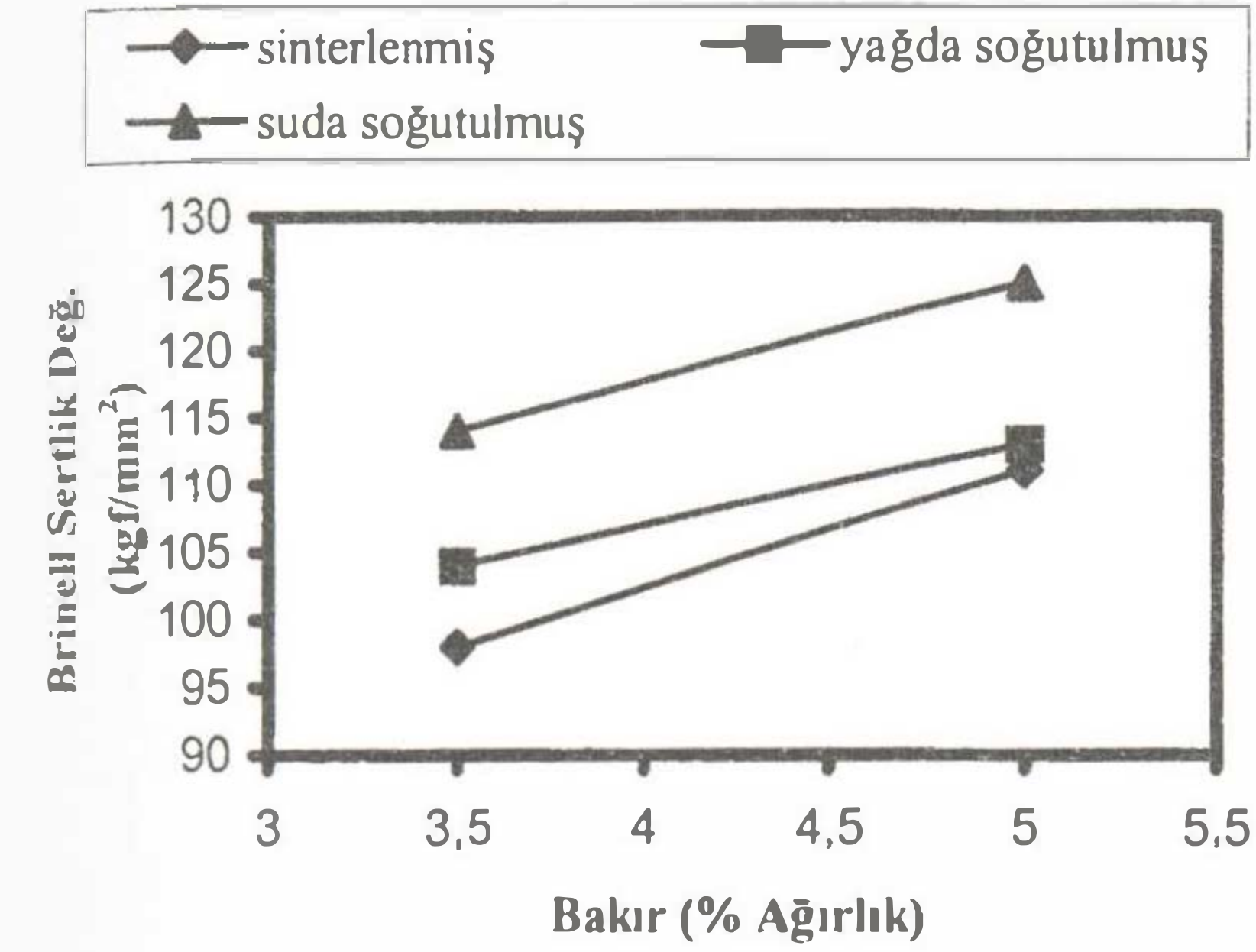
sonuçlar kırılma tokluğu sonuçları ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

III.2 Üç Nokta Kırılma Tokluğu Sonuçları

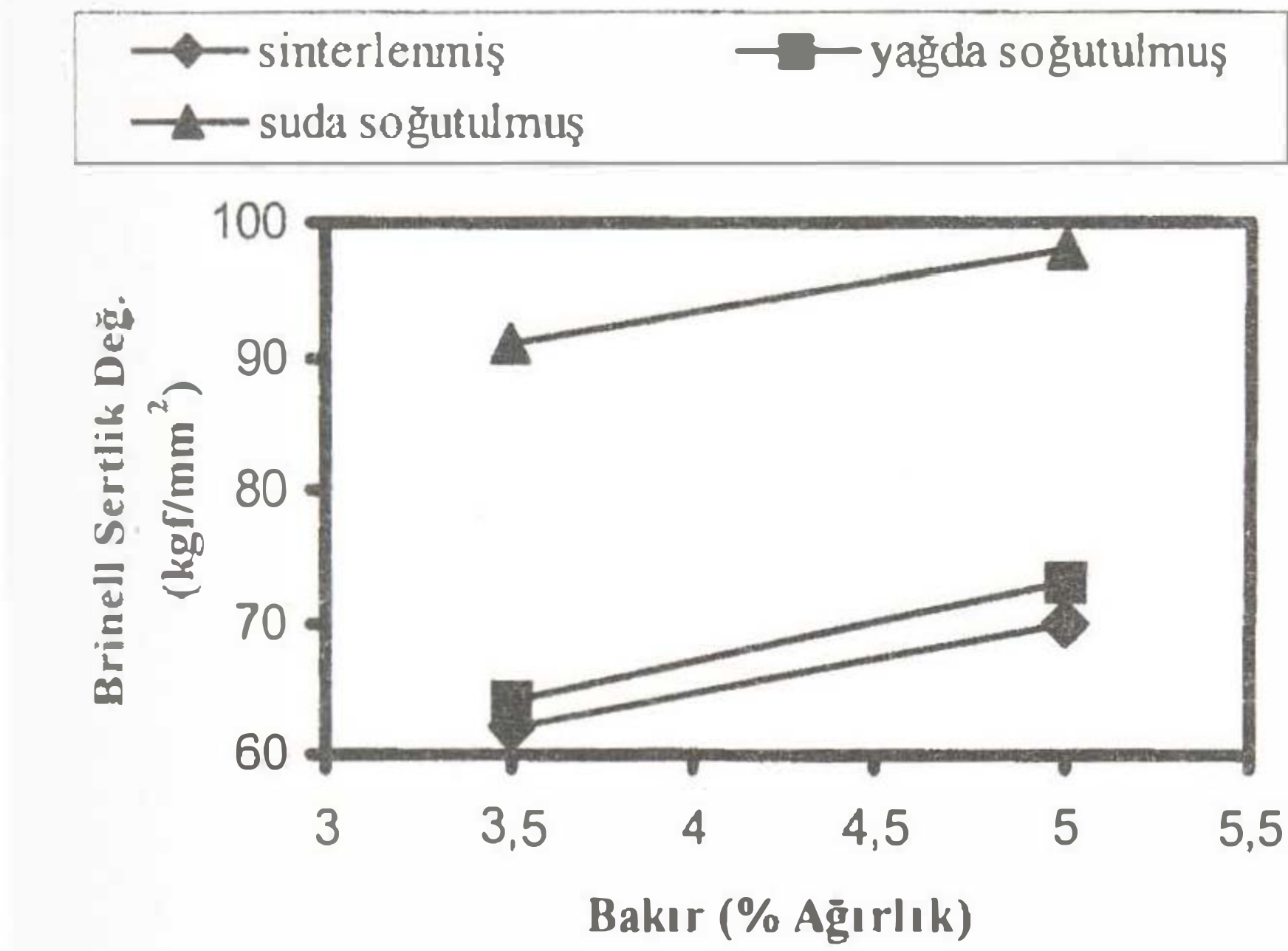
Sinterlenmiş, sinterleme sonrası yağda ve suda soğutulmuş şekilde üç gruba ayrılan T/M parçaların kırılma toklukları ölçülmüştür. Üç nokta kırılma tokluğu deneyleri ile elde edilen sonuçlar Tablo 3'de gösterilmiştir.

Şekil 5'de, ısıl işlem uygulanmamış %94,4Fe-%3,5Cu-%1,5C'lu T/M parçasının, Şekil 6'da, sinterleme sonrası yağda su verilmiş %94,4 Fe-%3,5Cu-%1,5C'lu T/M parçasının Şekil 7'de, sinterleme sonrası suda soğutulmuş %94,4Fe-%3,5Cu-%1,5C'lu T/M

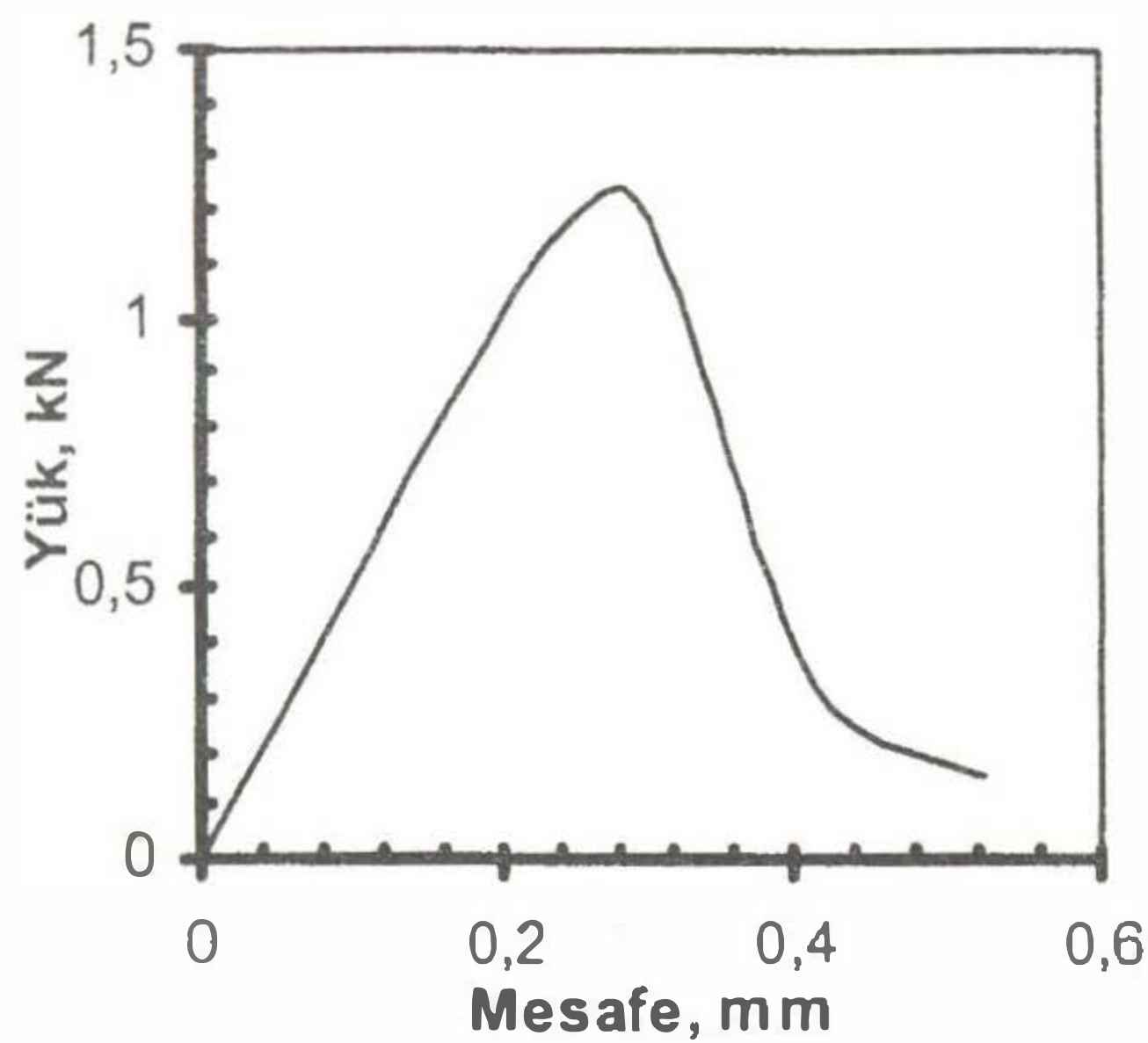
parçasının üç nokta kırılma tokluğu deneyinden elde edilen yük-mesafe eğrileri gösterilmektedir. Diyagramlardan görüleceği gibi yük lineer olarak çıkmış, daha sonra maksimum seviyeye kadar lineer olmayan bir yol izlemiş ve maksimum seviyeden sonra düşüşe geçmiştir.



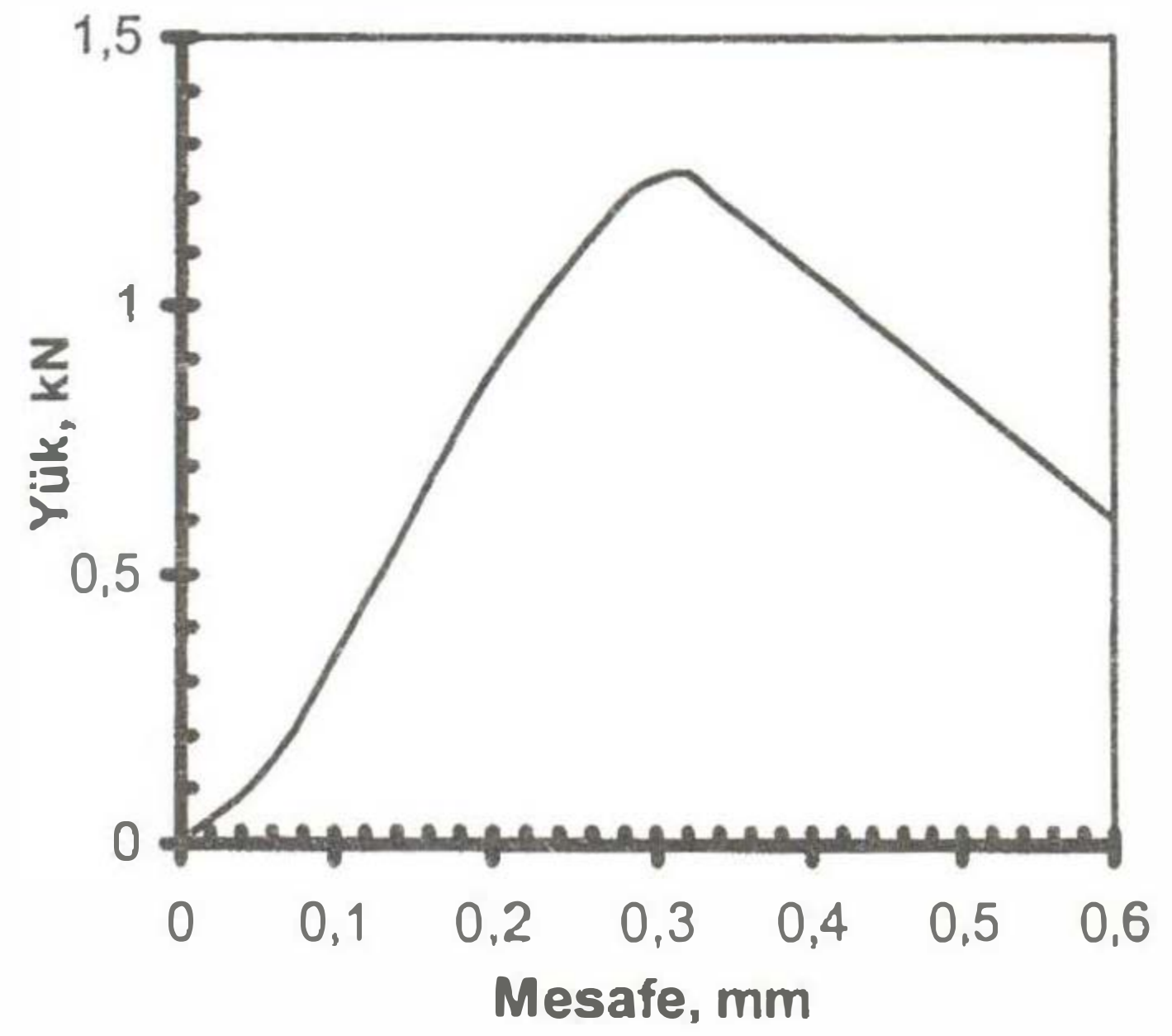
Şekil 3. Fe-Cu-%1,5C T/M parçalarının, bakır oranının değişimine göre sertlik değişimi



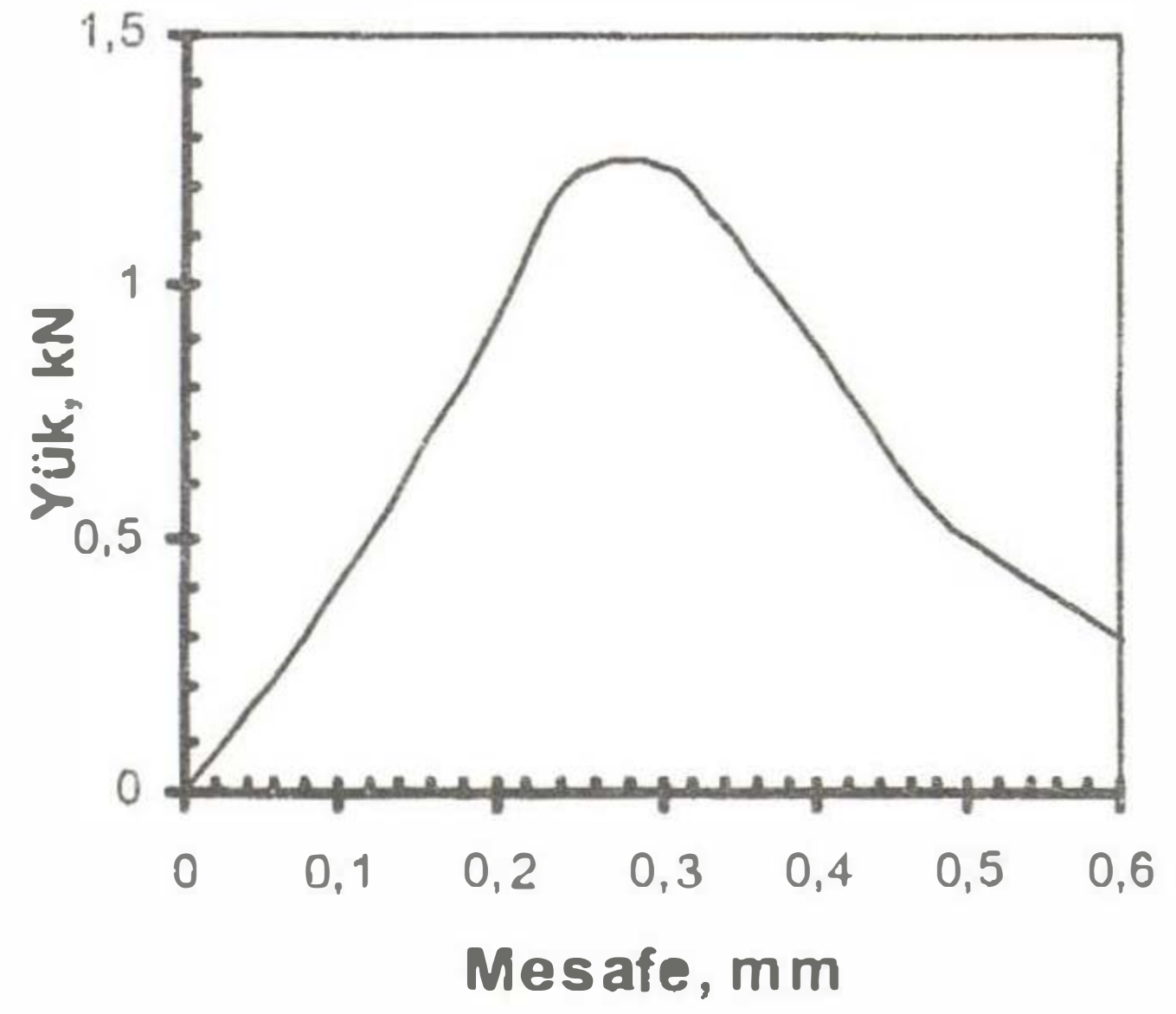
Şekil 4. Fe-Cu T/M parçalarında, bakırın %3,5'den %5'e çıkışının sertliğe olan etkisi



Şekil 5. Isıl işlem yapılmamış, %94,4 Fe-%3,5Cu-%1,5C'lu numunenin yük-mesafe eğrisi



Şekil 6. Isıl işlem sonucu yağda su verilmiş, %94,4 Fe-%3,5Cu-%1,5C'lu numunenin yük mesafe eğrisi



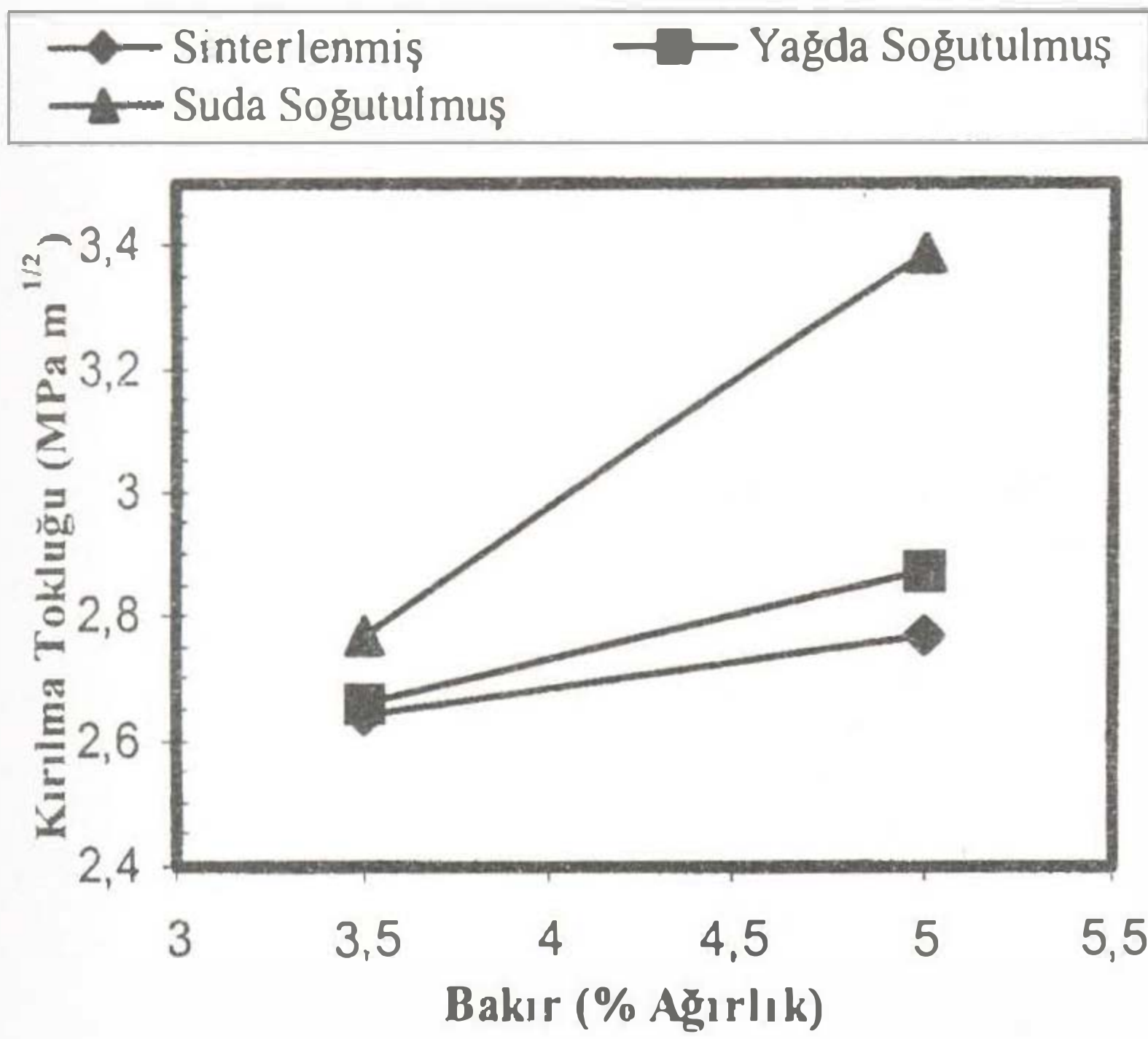
Şekil 7. Isıl işlem sonucu suda sertleştirilmiş, %94,4 Fe-%3,5Cu-%1,5C'lu numunenin yük mesafe eğrisi

Yük-mesafe eğrilerinde görüleceği gibi, şekil değiştirme mesafeleri ısıl işlem görmemiş, yağda su verilmiş ve suda sertleştirilmiş numunelerde az da olsa bir farklılık göstermektedir.

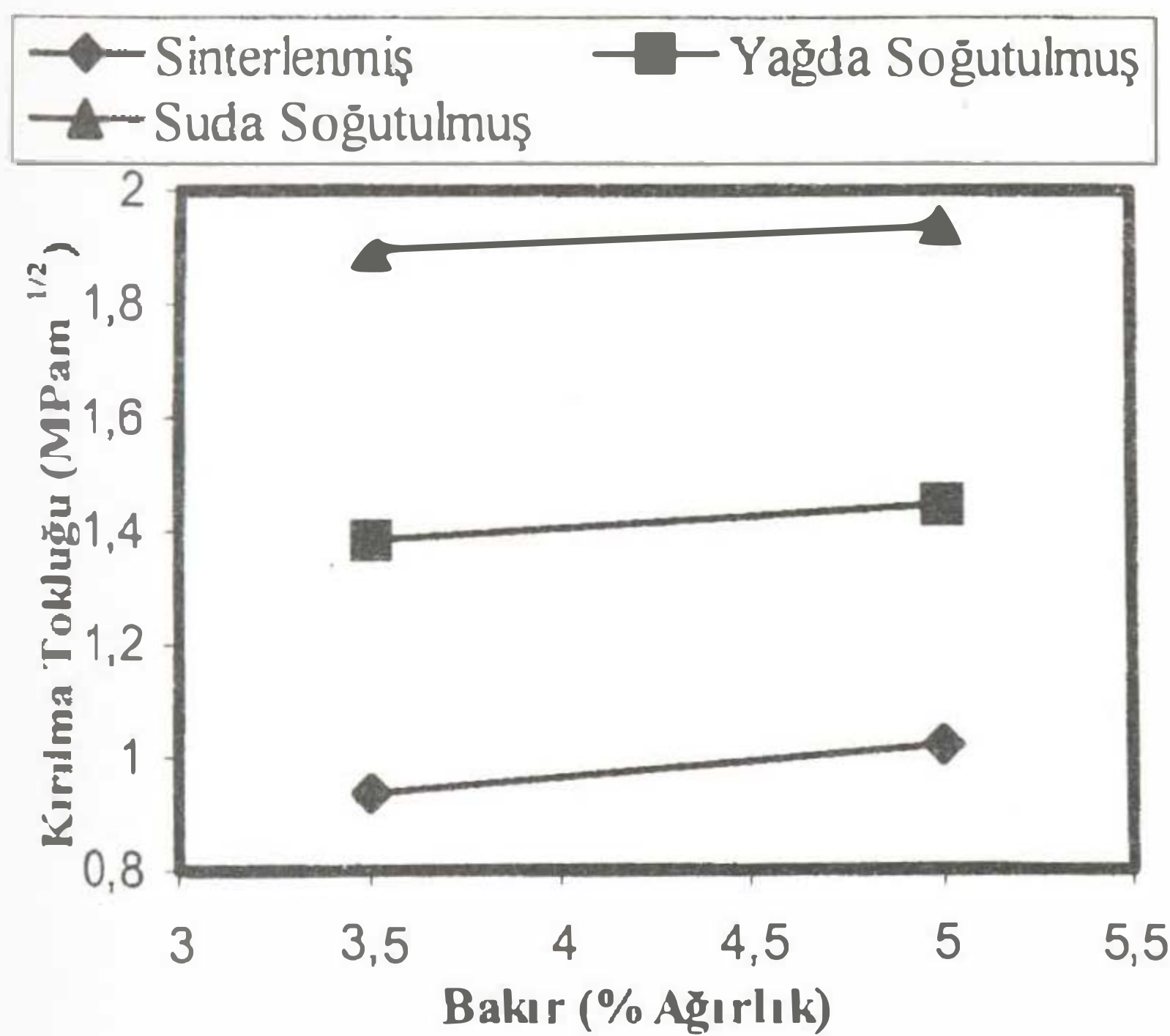
Fe-Cu-C numunelerinde bakır oranı %3,5'den %5'e çıkarılıp, grafit ise sabit tutulmuş ve bakır değişiminin K_{IC} 'ye etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu değişim, grafik olarak Şekil 8'de gösterilmektedir. Şekilde de görüleceği gibi, bakır oranının artması K_{IC} 'nin büyümesine sebep olmuştur. Diğer bir konu ise, K_{IC} 'yi büyükten küçüğe doğru sıralayacak olursak sinterleme sonrası suda su verilmiş numune, yağda su verilmiş numune, ısıl işlem uygulanmayan numune şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Bu sonuç III.1 bölümünde belirtilen sertlik değerleri ve III.3 bölümündeki mikro yapı incelemesi ile, uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Demir-bakır-grafit ve demir-bakır karışımı T/M numunelerin kırılma tokluğu (K_{IC}) sonuçları

Numune Adı	Kırılma Tokluğu (MPa m)		
	Sinterlenmiş Numune	Sinterleme+Yağda Su Verilmiş Numune	Sinterleme+Suda Su Verilmiş Numune
%94,4Fe-%3,5 Cu-%1,5C	26,4	26,62	27,68
%92,9Fe-%5 Cu-%1,5C	27,68	28,74	33,86
%91,4Fe-%5 Cu-%3C	27,04	28,53	28,74
%95,9Fe-%3,5 Cu	9,37	13,84	18,95
%94,4Fe-%5 Cu	10,22	14,48	19,37



Şekil 8. Fe-Cu-%1,5 C T/M parçasının, bakır yüzdesinin değişiminin K_{IC} üzerindeki etkisi



Şekil 9. Fe-C T/M parçasının bakırın %3,5'den %5'e artışının kırılma tokluğuna değişik ısıl işlem şartlarının etkisi

Demir-bakır karışımı T/M numunelerinin bakır oranı %3,5'dan %5'artırılmasının K_{IC} 'ye etkisi tespit edilmiştir.

Şekil 9'da bakır miktarı değişimini, değişik ısıl işlem şartlarında K_{IC} 'yi nasıl etkilediği grafik olarak verilmiştir. Bakırın artırılması, K_{IC} 'nin artmasına neden olmuştur. Aynı içerikli Fe-Cu numunelerinde ısıl işlem K_{IC} 'yi oldukça etkilemiştir. Suda sertleştirilmiş Fe-Cu numunelerinin K_{IC} değerleri, yağda su verilmiş ve sinterlenmişlere göre en fazladır. Yağda su verilmiş numunelerin K_{IC} değeri sinterlenmişlerden daha fazladır.

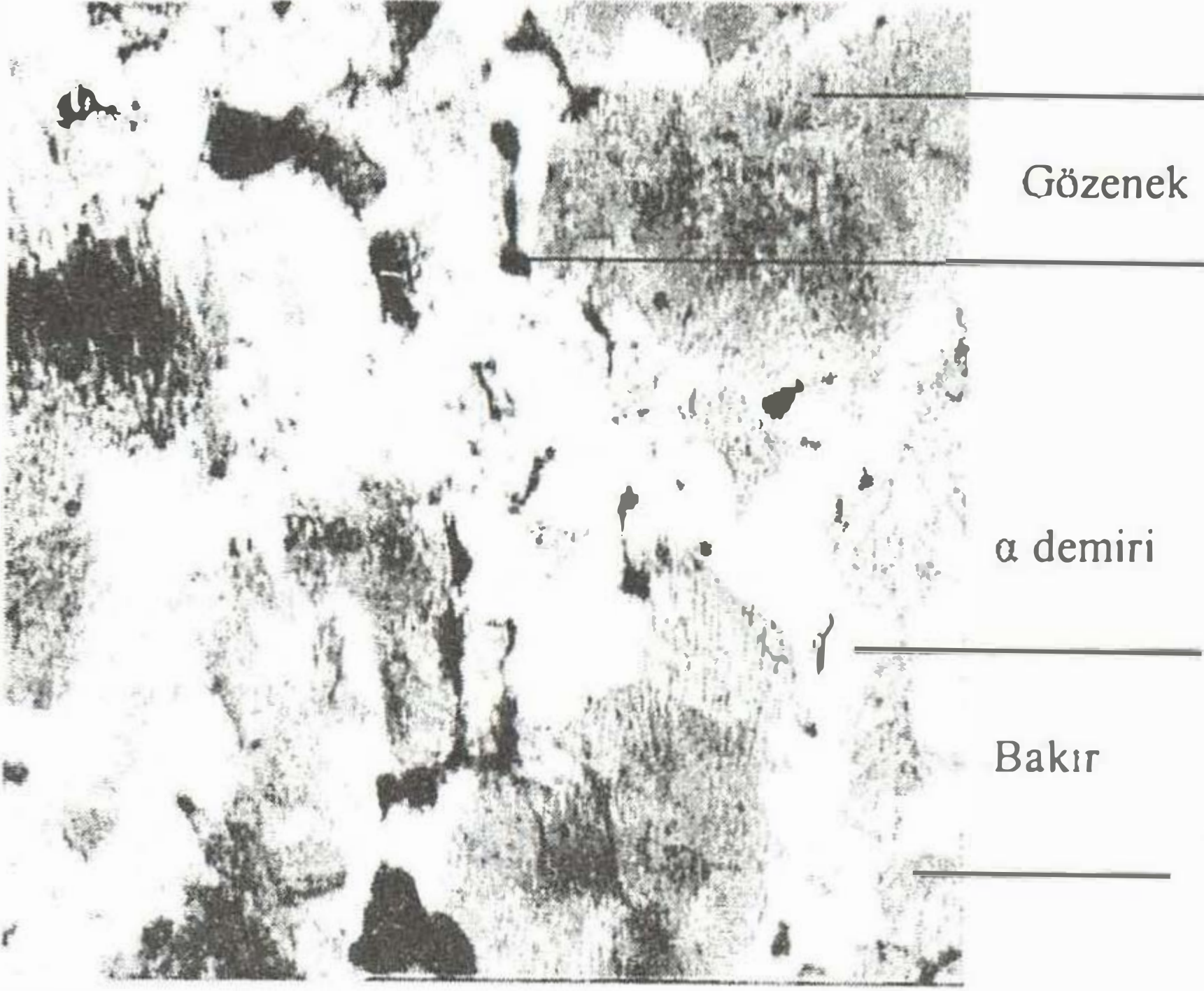
III.3. Numunelerin Mikro Yapı İncelemesi

Şekil 10'da sinterlenmiş haldeki, Şekil 11'de sinterleme sonrası yağda su verilmiş, Şekil 12'de sinterleme sonrası suda su verilmiş, %94,4Fe-%3,5Cu-%1,5C'lu T/M numunelerine ait mikro yapı fotoğrafları görülmektedir. Mikro yapı fotoğraflarında görülen siyah bölgeler numune içerisindeki boşlukları (porozite), gri bölgeler bakır beyazlar α kristallerini ve açık siyahlar ise grafiti göstermektedir. Şekil 13'de sinterlenmiş haldeki, Şekil 14'de sinterleme sonrası yağda su verilmiş, Şekil 15'de sinterleme sonrası suda su verilmiş, %95,9Fe-%3,5Cu'lu T/M numunelerine ait mikro yapı fotoğrafları görülmektedir.

Gerek Fe-Cu-C ve gerekse Fe-Cu T/M parçalarının mikro yapıları incelendiğinde, sinterlenmiş haldeki numunelerin kaba taneli oldukları, yağda su verilmiş numunelerin biraz daha ince taneli ve suda su verilmiş numunelerin ise, en ince yapıya sahip oldukları görülmektedir.

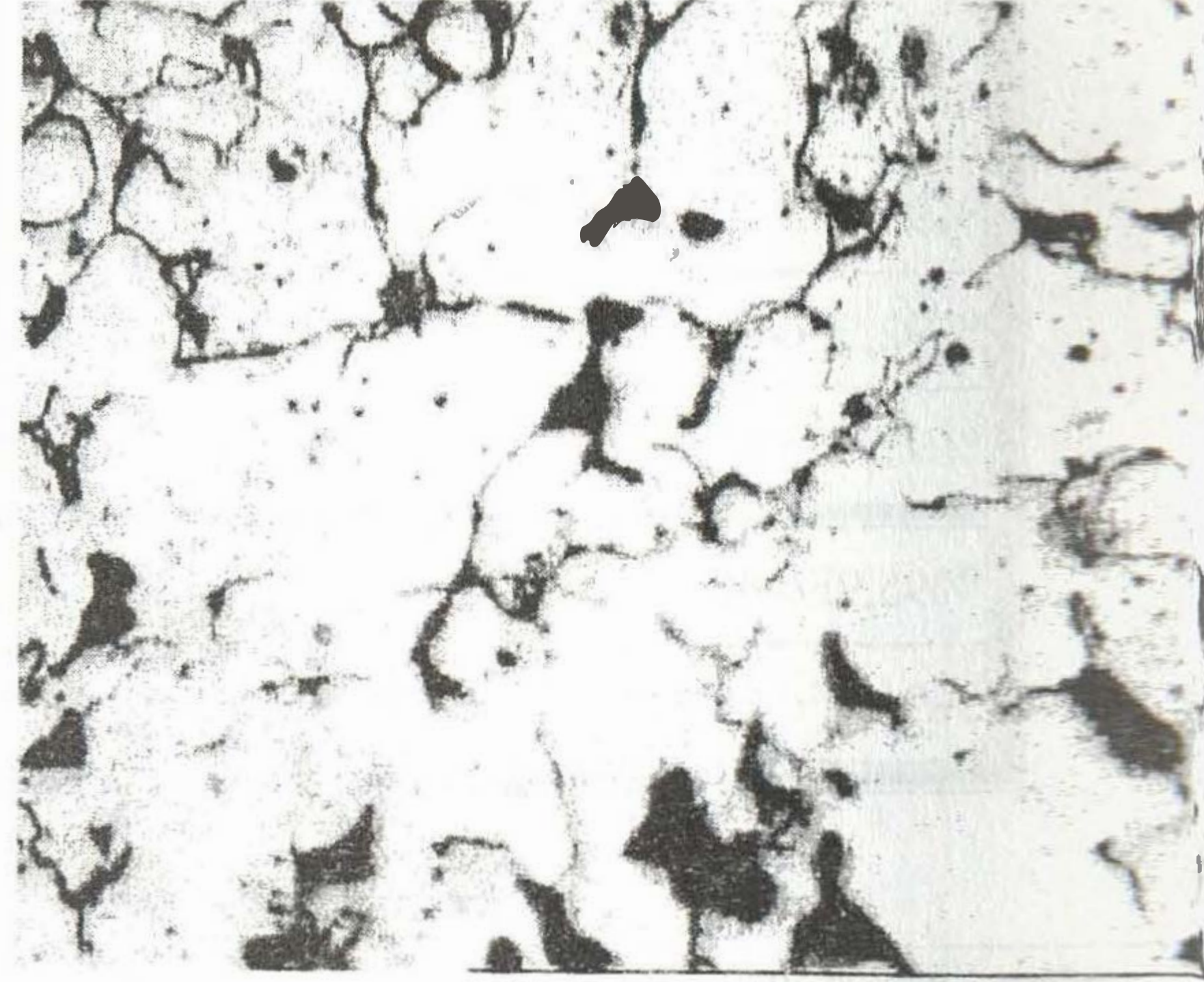
Tane büyüklüğünün malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde etkiye sahip olduğu bilinmektedir [6]. Tane incelmesinin malzemenin kırılma tokluğunda ve sertlik değerinde bir artışa sebep olmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sertlik değerleri (Tablo 2) ve kırılma tokluğu

sonuçları (Tablo 3), tane inceldikçe arttığını göstermektedir.

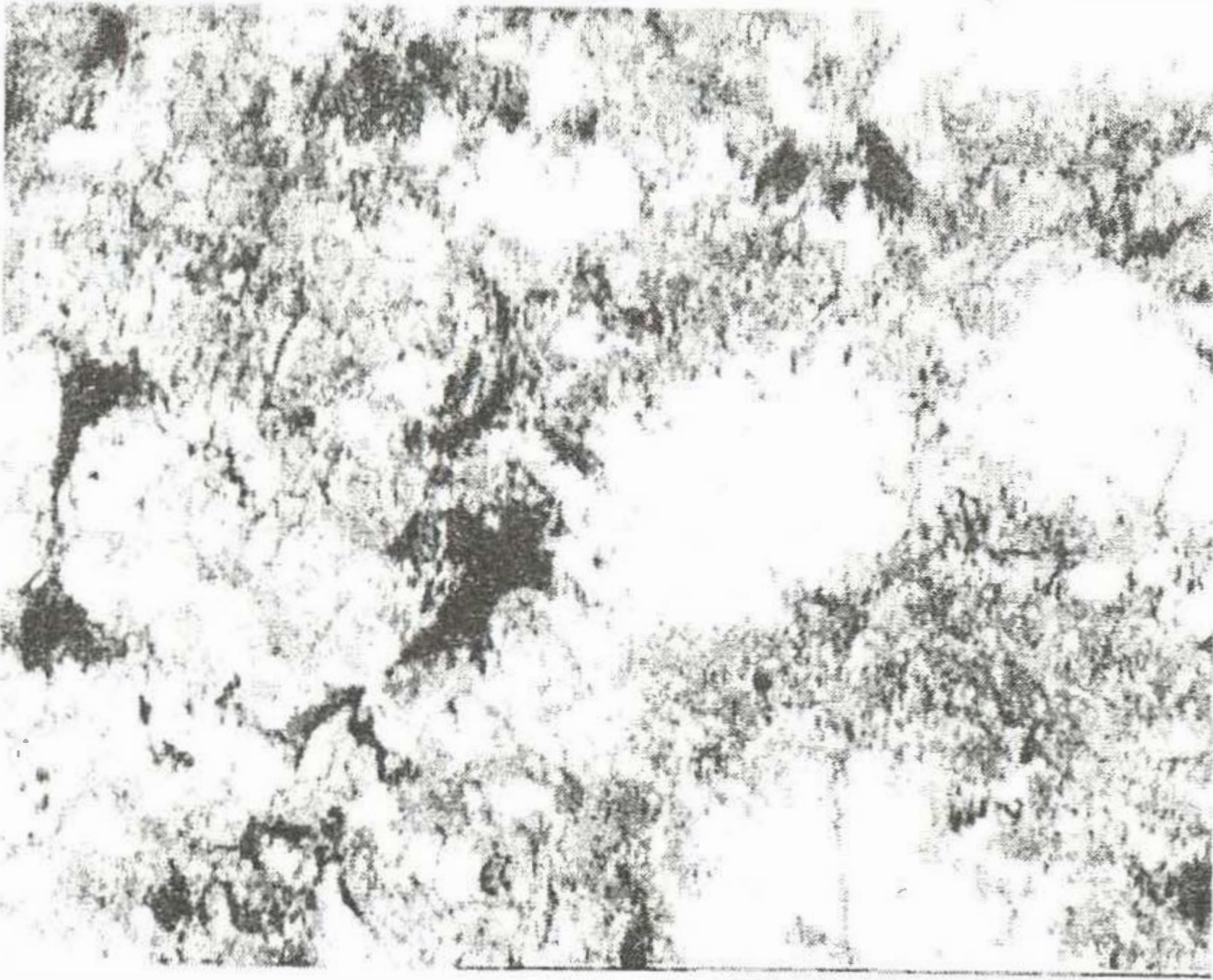


Şekil 10. Sinterlenmiş içerisinde %94,4Fe-%3,5Cu-%1,5C bulunan T/M numunesine ait mikro yapı fotoğrafı (x500)

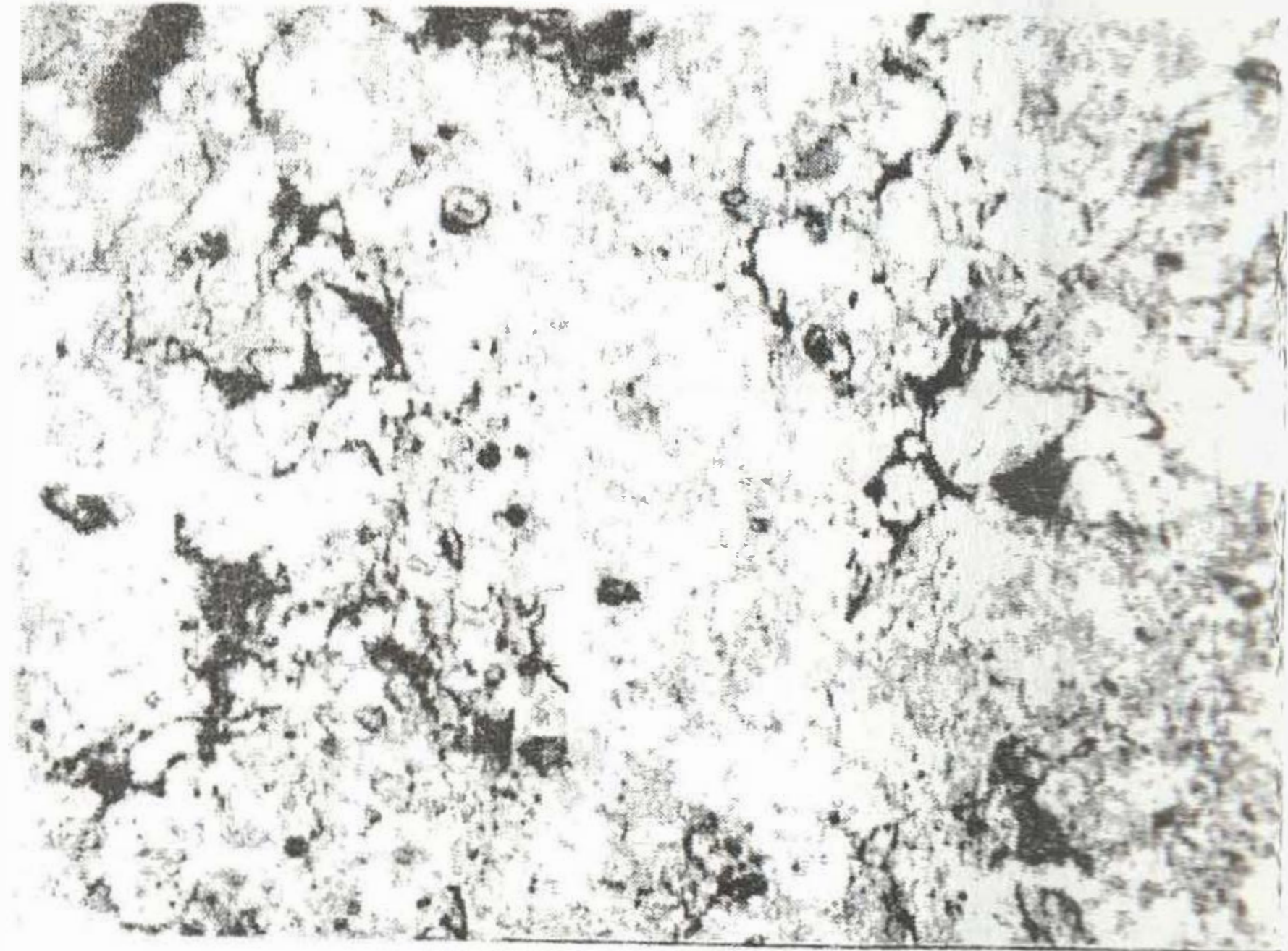
Şekil 12. Sinterlenme sonrası suda su verilmiş içerisinde %94,4Fe-%3,5Cu-%1,5C bulunan T/M numunesi (x500)



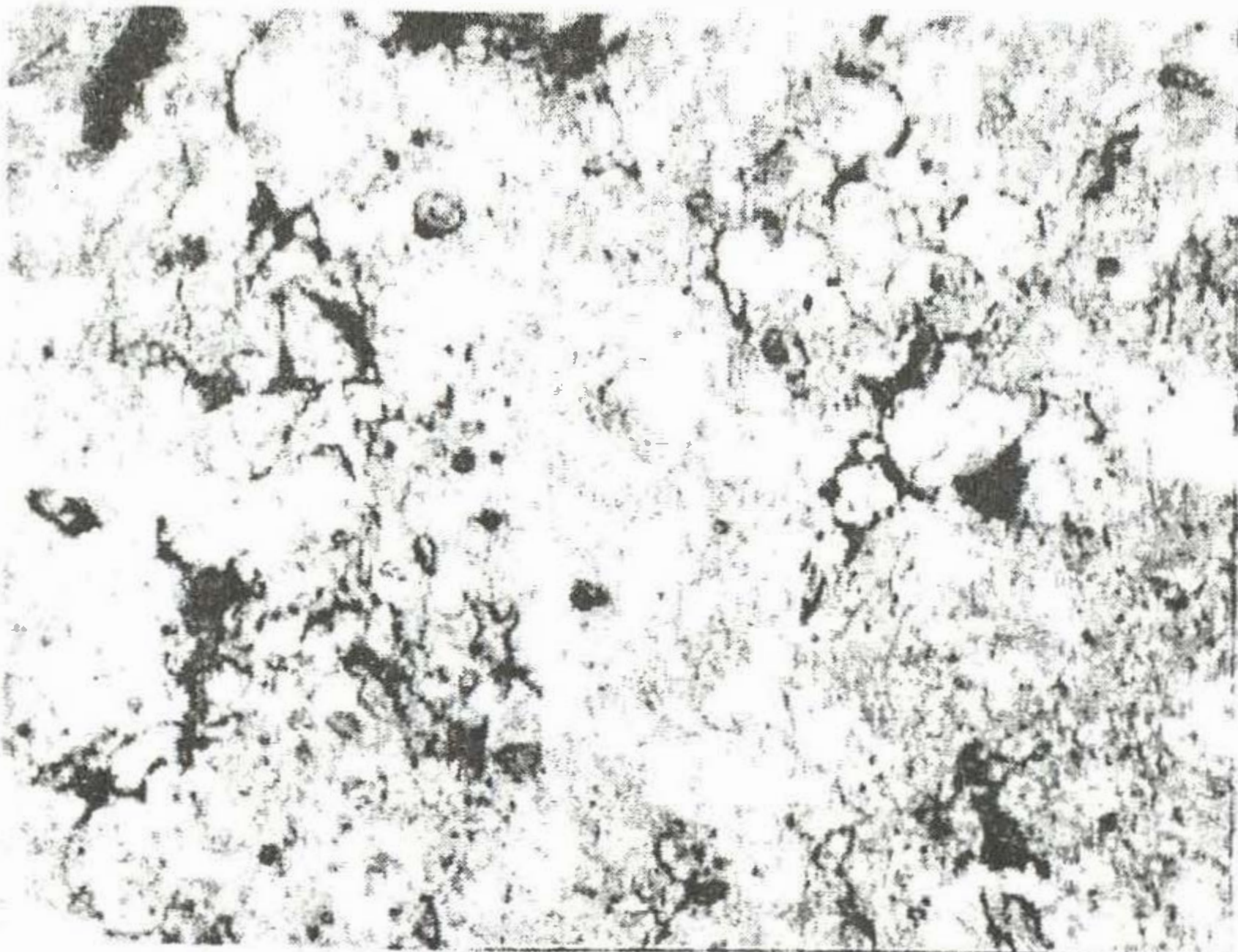
Şekil 13. Sinterlenmiş içerisinde %95,9Fe-%3,5 Cu bulunan T/M numunesi (x500)



Şekil 11. Sinterlenme sonrası yağda su verilmiş içerisinde %94,4Fe-%3,5Cu-%1,5C bulunan T/M numunesi (x500)



Şekil 14. Sinterlenme sonrası yağda su verilmiş, içerisinde %95,9Fe-%3,5 Cu bulunan T/M numunesi (x500)





Şekil 15. Sinterlenme sonrası suda su verilmiş, içerisinde %95,9Fe-
%3,5Cu bulunan T/M numunesi (x500)

Fe-Cu-C T/M parçalarında perlitik bir yapının varolması muhtemeldir. Sinterlenme esnasında grafit, ostenit taneleri içerisine yayılmış ve soğuma sırasında bu taneler perlitte dönüşür. Perlit, sementit (Fe_3C) ve α fazlarından meydana geldiği için, yapı içindeki sementit (Fe_3C), malzemelerin hem kırılma tokluklarının artmasına, hem de sertliğin artmasına sebep olacaktır. Çünkü sementit sert ve kırılgan bir yapıdır.

Fe-Cu numunelerinin kırılma tokluğu ve sertliği Fe-Cu-C numunelerinkine göre daha düşüktür. Mikro yapılarında görüleceği gibi, içerikte grafit olmadığından grafit ile demirin reaksiyonu sonucunda meydana gelen ve perlitik yapının içinde bulunan sementitin varlığı söz konusu değildir.

IV. GENEL SONUÇLAR

1. Fe-Cu-%1,5C T/M parçalarının, bakır oranının değişimine göre sertlik değeri incelendiğinde, bakır oranının artması sertliği artırmıştır. Bakır arttıkça numune içerisindeki gözenekler bakır tarafından doldurulacaktır. Dolayısıyla yoğunluğu artan numunenin sertliğinin de artması beklenir. Aynı içerikli numuneler birbiri ile karşılaştırıldığında sertlik artışının suda en fazla, sonra yağda ve en düşük sinterlenmiş numunelerde olduğu görülmüştür.

2. Bakır %5'de sabit tutularak, grafit oranı %1,5'den %3'e çıkartılan Fe-%5Cu-C numunelerde, grafit artışının sertlik artışına sebep olduğu görülmüştür. Bu sertlik artışı emir ile karbonun reaksiyonu sonucu oluşan mikro yapıdaki sementit miktarının artışına atfedilebilir. Aynı içerikli numuneler birbiri ile karşılaştırıldığında suda sertleştirilmiş numunelerde, sertlik artışı yağda sertleştirilenlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

En düşük sertlik miktarı sinterlenmiş numunelerde bulunmuştur.

3. Fe-Cu-C T/M parçalarında bakır değişiminin K_{1C} 'ye etkisi incelendiğinde bakır oranının artması K_{1C} 'nin büyümesine sebep olduğu tespit edilmiştir. K_{1C} 'yi büyükten küçüğe doğru sıralayacak olursak sinterleme sonrası suda su verilmiş numune, yağda su verilmiş numune, ısıl işlem uygulanmayan numune şeklinde sıralanmaktadır.

4. Bakır oranı %5'de sabit tutulup grafit oranı %1,5'den %3'e çıkartılan Fe-Cu-C numunelerde, grafit oranının artması K_{1C} 'nin küçülmesine sebep olmuştur. Sertlik artışına sebep olan sementit fazlarının grafit artışıyla doğru orantılı olarak artması beklenir. Buda numuneyi gevrekletirecektir. Böylece kırılma tokluğu düşecektir. Bu küçülme, suda sertleştirilmiş numunelerde daha büyük oranda gerçekleşmiştir. Fakat yağda sertleştirilmiş ve sinterleme sonrası ısıl işlem uygulanmamış numunelerde, K_{1C} kayda değer nispete değişmemiştir.

5. Fe-Cu T/M numunelerinde bakır oranı %3,5'dan %5'artırılarak, bakır miktarının K_{1C} 'ye etkisi tespit edilmiştir. Bakırın artırılması, K_{1C} 'nin artmasına neden olmuştur. Aynı içerikli Fe-Cu numunelerinde ısıl işlem K_{1C} 'yi oldukça etkilemiştir. Suda sertleştirilmiş Fe-Cu numunelerinin K_{1C} değerleri, yağda sertleştirilmiş ve sinterlenmişlere göre en fazladır. Yağda sertleştirilmiş numunelerin K_{1C} değeri sinterlenmişlerden daha fazladır.

KAYNAKLAR

- [1] ÖLMEZ, C.O., "Demir Esaslı Malzemelerin Sertliği ve Mikro Yapısal Karakterizasyonu" Yüksek lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi F.B.E. 1999.
- [2] www.tozmetal.com, "Toz Metal Ticaret ve Sanayi A. Ş. İnternet Sitesi", 2001.
- [3] www.epma.com, "Epma Powder Metallurgy Company İnternet Adresi", 2001.
- [4] KAYALI, E.S., ENSARİ, C., DİKEÇ, F., "Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri", İ.T.Ü. yayını, İstanbul, 1996.
- [5] JAMIL, S.J., CHADWICK, G.A., "Investigation and Analysis of Liquid Phase Sintering of Fe-Cu and Fe-Cu-C Compacts", Powder Metallurgy, Volume 28, No 2, 1985.
- [6] KAYALI, E.S., ENSARİ, C., "Malzemelerin Plastik Deformasyonu, İlke ve Uygulamaları", İ.T.Ü. yayını, İstanbul, 1993.