

# TOZ METALÜRJİSİ İLE ÜRETİLEN GÖZENEKLİ NİTi ALAŞIMINDA GÖZENEK ORANININ BASMA DAYANIMI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

**Mehmet KAYA, Nuri ORHAN ve İlyas SOMUNKIRAN**

Metal Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Fırat Üniversitesi, 23119- Elazığ  
[mehmetkaya75@hotmail.com](mailto:mehmetkaya75@hotmail.com), [norhan@firat.edu.tr](mailto:norhan@firat.edu.tr), [ilyas@firat.edu.tr](mailto:ilyas@firat.edu.tr)

(Geliş/Received: 26.03.2008 ; Kabul/Accepted: 23.06.2008)

## ÖZET

Farklı gözenek oranlarına sahip gözenekli NiTi alaşımı, implant malzeme olarak kullanılmak amacıyla, toz metalürji yöntemlerinden kendi-ilerleyen yüksek-sıcaklık sentezi (SHS: self-propagating high-temperature synthesis) ile üretildi. Üretimde, Ni-%49,5Ti atomik oranında Ni ve Ti tozları 24 saat süreyle karıştırılarak farklı basınçlarda soğuk preslendi. Preslenen ham gözenekli numuneler hazırlanan bir fırın içerisinde soygaz ortamında 200 °C'de ön ısıtma yapılarak ve yüksek voltajla tutuşturularak sentezlendi. Sonuç olarak, farklı gözenek şekillerine sahip açık ve kapalı gözeneklerin meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca presleme basıncının artması ile gözenek oranının azaldığı ve basma dayanımlarının arttığı belirlendi.

**Anahtar Kelimeler:** Gözenekli NiTi, toz metalürjisi, SHS, basma gerilmesi, implant malzeme.

## EFFECT OF POROSITY ON COMPRESSIVE STRENGTH OF POROUS NiTi ALLOY FABRICATED BY POWDER METALLURGY

### ABSTRACT

Porous NiTi alloy samples to be used as implant material were synthesized in different porosities through a powder metallurgical method, self-propagating high-temperature (SHS) synthesis. The powder blend composing Ni and at%49.5Ti was mixed 24 hours and cold pressed under different pressures. The green compacts were heated in a furnace up to 200 °C under a high purity argon gas protective atmosphere and then ignited by applying a high electrical voltage. It was found that open and closed cell pores formed in different percentages and shapes. In addition; increasing cold compaction pressure applied reduced the porosity levels and increased the compressive strength of the porous compacts synthesized.

**Keywords:** Porous NiTi, powder metallurgy, SHS, compressive strength, implant material.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

NiTi alaşımları şekil hatırlama etkisi (ŞHE), süperelastikliği, iyi korozyon direnci, mekanik özellikleri ve özellikle çok iyi biyouyumluluğu gibi özelliklerinden dolayı son yıllarda toz metalürjisi (TM) ile gözenekli malzeme üretiminde tercih edilen malzeme olmuştur [1,2]. Çünkü gözenekli malzeme hem canlı dokuların büyümesine imkân sağlar hem de hafiftir. Ayrıca metalik gözenekli yapılar çarpma ile gerçekleşen darbeleri de kolayca emer. Bu özelliklerinden dolayı da farklı alanlarda kullanılabilir [3,4]. NiTi alaşımlarının ŞHE yüksek sıcaklık fazı austenit ile düşük sıcaklık fazı martensit arasındaki

faz dönüşümü ile gerçekleşir ve bu etki ile kuvvet oluşturulmaktadır [5]. Bu kuvvetten yararlanarak yoğun NiTi alaşımları tıp alanında kırılan kemiklerin birleştirilmesinde plaka olarak, çarpık dişlerin düzeltilmesinde ve damar tıkanıklığının açılmasında stent olarak kullanılmaktadır [6].

Gözenekli NiTi alaşımlarının üretimi yapılırken kendi ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi (SHS: self-propagating high-temperature synthesis) [7], kıvılcım plazma sinterleme (SPS: spark plazma sintering) [8], sıcak izostatik presleme (HIP: hot isostatic pressing) [9] ve metal injeksiyon kalıplama (metal injection molding) [10] gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu

yöntemlerde segregasyon, aşırı tane büyümesi gibi problemler oluşmamaktadır. Ayrıca, bu yöntemler karmaşık şekilli parçaların kolayca üretilmesi ve bileşiminin tam olarak kontrolünde avantaj sağlamaktadırlar [8]. Yapılan literatür incelemelerde yukarıda bahsedilen yöntemler içerisinde SHS ile daha hafif NiTi ŞHA'nın üretilebildiği, yani gözenek oranı fazla olan malzemenin üretilebildiği tespit edildi [7, 8, 11-13].

Gözenekli NiTi alaşımının üretiminde SHS yöntemi, geleneksel toz metalürji yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha fazla avantajlar sunmaktadır. Sistemi kurmak daha basittir ve fazla masraf gerektirmez. Hızlı ekzotermik reaksiyondan dolayı üretim yapılırken daha az zamana ihtiyaç vardır. SHS işleminde numune tutuşturularak yanma dalgası oluşturulur. Bu dalga numune boyunca ilerlerken uçucu kirlilikleri dışarı atar [13,14]. İşlem, pratik olarak tozların karıştırılması ve bir kalıpta preslenmesi, presten çıkartıldıktan sonra da bir tutuşturucu ile ateşlenmesinden ibarettir [15]. Tutuşturma, ürünün ve reaksiyonun yüksek termal iletkenliğinden dolayı reaksiyon ve ürün morfolojisinde önemli bir rol oynar [13]. Literatürde, şimdiye kadar tutuşturucu eleman olarak genelde tungsten bobin kullanıldığı görülmektedir. Bunun yanında kimyasal tutuşturucu ve lazer diyot ta kullanılmıştır.

SHS ile gözenekli NiTi alaşımının üretimi ilk olarak Li ve arkadaşları [7] tarafından, ham gözenekli numunelerin, tungsten bobinle ısıtılması sonucu tutuşturulması ile gerçekleştirildi. Fakat tutuşturucu olarak tungsten bobin (geleneksel tutuşturma metodu) kullanıldığında enerji transferinin kontrol edilemediği ve reaksiyon sıcaklıklarının değiştiği gözlenmiştir [7,12]. Daha sonraları Ti ve C'dan oluşan tutuşturucu madde kullanılmış ancak sınırlı bir yarar elde edilmiştir [3,12]. Zanotti ve arkadaşları [13] tarafından lazer diyot sistemi kullanılarak daha önceki tekniklere göre daha kontrollü ve daha kısa sürede bir tutuşturma işlemi gerçekleştirilmiş ise de sistemi kurmak güç ve masraflı olmuştur.

Bu çalışmada, tutuşturucu eleman olarak yüksek voltajlı elektrik arki (transformatör) kullanıldı. Bu ateşleme yöntemi yukarıdaki tekniklere göre daha kolay, daha kontrollü ve masrafsızdır. NiTi alaşımının ŞHE'inde yararlanarak tıp alanında kullanılması için vücut sıcaklığında faz dönüşümünün gerçekleşmesi gerekir. Faz dönüşüm sıcaklığı, Ni-%49,5 Ti atomik oranında olduğu zaman vücut sıcaklığına yakın olur ve Ni oranının artması ile daha da düşer [5]. Bu nedenle bu çalışmada, %49,5 Ti ve %50,5 Ni atomik oranı tercih edildi ve bu atomik oranda oluşan karışımın farklı basınçlarda soğuk preslenerek gözeneklilik üzerindeki etkisi incelendi. Bunun yanında gözenekliliğin basma mukavemeti üzerindeki etkisi daha önce yapılan literatür çalışmaları ile karşılaştırıldı.

## 2. DENEYSEL İŞLEM (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

Bu çalışmada kullanılan ham materyal Ni (99,8 %) ve Ti (99,5 %) tozları -325 mesh büyüklüğünde olup Alfa Aesar (Almanya) şirketinde temin edildi. Tozlar Ni-%49,5Ti atomik oranında homojen bir karışım oluşması için 16 devir/dak. dönme hızı ve 1/4 doluluk oranında dönen bir kap içerisinde 24 saat süreyle karıştırıldı. Sonra karışım 50, 100 ve 200 MPa basınçlarla ayrı ayrı 10 mm çapında ve 15 mm yüksekliğinde silindirik çelik kalıplarda hidrostatik olarak preslendi. Kalıptan çıkarılan preslenmiş numuneler yüksek saflıkta argon gazı ortamında bir fırın içerisinde ayrı ayrı 200 °C sıcaklığa kadar ısıtıldı ve yüksek voltajlı elektrik arki (14 kV ve 30 mA) ile birkaç saniye süreyle ark uygulanarak tutuş-turuldu [16]. Elektrik arki uygulandığında numunenin sıcaklığı birkaç saniye içerisinde artmakta ve numune tutuşmaktadır. Tutuşmanın gerçekleşmesiyle numune sıcaklığı daha da artarak yanma dalgası preslenmiş numune eksenini boyunca kendi kendine çok kısa sürede ilerledi. Böylece gözenekli NiTi alaşımı üretilmiş oldu. SHS ile numune üretiminde kullanılan sistemin işlem basamakları Şekil 1'de gösterilmektedir [17].

Üretilen numunelerin genel gözeneklilik oranı  $f = 1 - m/(dV)$  formülü ile belirlendi. Burada  $m$  ve  $V$  sırasıyla gözenekli numunenin kütlesi ve hacmi,  $d$  ise kullanılan Ni-%49,5Ti atomik oranı için teorik yoğunluktur (6,21 gr/cm<sup>3</sup>). Genel gözeneklilik açık ve kapalı gözeneklerden oluşur. Açık gözeneklilik numuneler suya daldırılarak ve açık gözenek oranı genel gözenek oranına göre hesaplandı [7,12]. Numunelerin gözenek karakteristikleri Prior marka optik mikroskobu kullanılarak incelendi. Numunelerin gözenekliliğinin hesaplanması için her bir basınçla soğuk preslendikten sonra sentezlenen üç numunenin ortalama sonuçları alındı. Numunelerin kütleleri



Şekil 1. Gözenekli NiTi ŞHA'nın üretiminde kullanılan SHS reaksiyonunun şematiki (Schematic of SHS reaction used for fabrication of porous NiTi SMA)

hassas tartı ile hacmi ise boyutları ölçülerek hesaplandı.

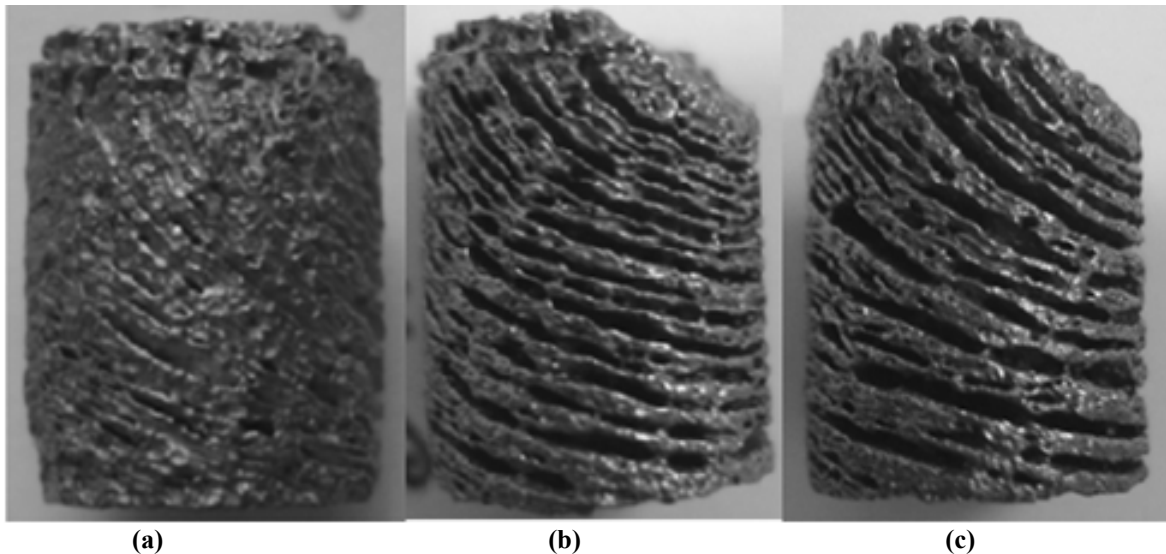
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, soğuk presleme basıncının gözenek oluşumu üzerine etkisini incelemek için numuneler 50, 100, 200 MPa basınçlar altında preslendi ve 200 °C ön ısıtma sıcaklığında elektrik arkı ile sentezlendi. 50 MPa basınçla preslenmiş numunelerde reaksiyonu başlatmak için ön ısıtma yapılmadan yaklaşık 3 saniye süreyle ark uygulanması yeterli olurken, 100 MPa ve üzeri basınçta preslenmiş numunelerden reaksiyonun başlaması için ön ısıtmanın gerekli olduğu anlaşıldı. 200 °C ön ısıtma sıcaklığında reaksiyonun başlaması için gerekli ark süresi 50 MPa basınçla preslenmiş numune için 1 saniye, 100 MPa basınçla preslenmiş numune için 2 saniye ve 200 MPa basınçla preslenmiş numune için yaklaşık 4 saniye olarak belirlendi. Yani soğuk presleme basıncı arttığı zaman reaksiyonun başlaması için uygulanması gereken ark süresi artmaktadır. Fakat presleme basıncı büyük olan numunelerde tutuşmadan sonra yanma reaksiyonunun süresi kısalmakta, reaksiyon sırasında açığa çıkan görünür enerji (ışık ve ergimenin fazla olması) ve kanal genişliği (Şekil 2) daha fazla olmaktadır. Soğuk presleme basıncının büyük olduğu bazı numunelerde ise ergimeden dolayı çok az bir şekil bozulması gözlenmiştir. Presleme basıncı arttığı zaman tanecikler birbirine daha yakın olmakta, ilk gözeneklilik azalmakta ve termal iletkenlik artmaktadır. Böylece ark süresince verilen ısı numune boyunca yayılmakta ve ark bölgesi fazla ısınmamaktadır. Bu nedenle, tutuşmanın başlaması için ark bölgesinin sıcaklığının artması gerekir. Bunun için ya ön ısıtma sıcaklığı ya da ark süresi arttırılmalıdır. Ön ısıtma sıcaklığının artmasıyla gözeneklilik azalır. Belli bir ön ısıtma sıcaklığı değerinden (>350 °C) sonra reaksiyon

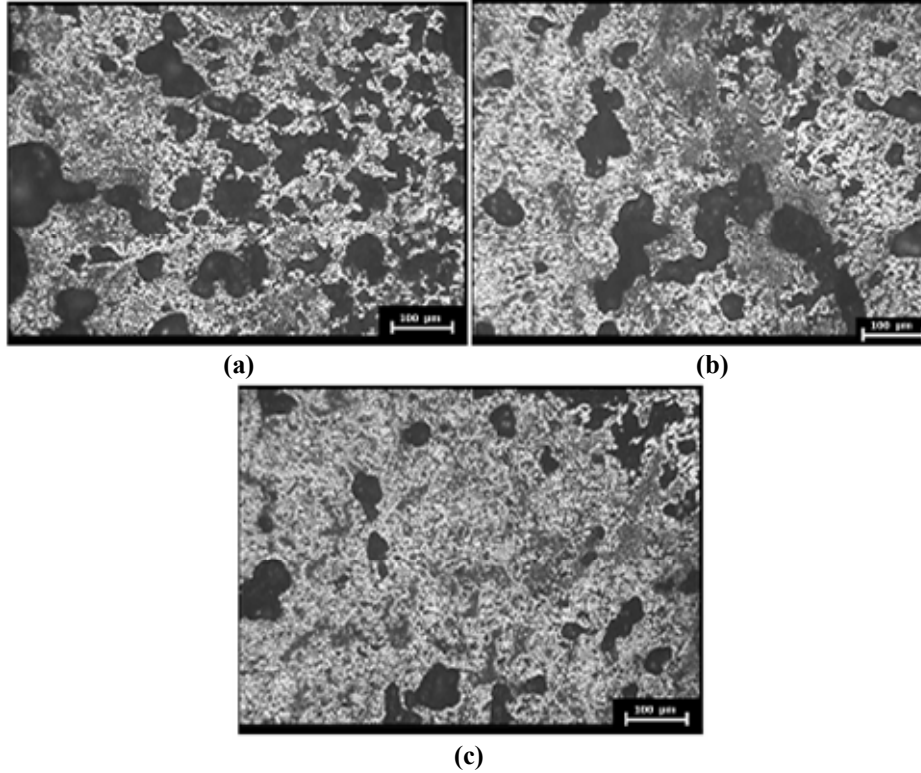
gerçekleştirilirse ergimenin fazla olmasından dolayı numunelerin şekli bozulmaktadır [17]. Presleme basıncı düşük olduğu zaman ilk gözeneklilik daha fazla olur ve termal iletkenlik azalır. Böylece ark süresince verilen ısı numune boyunca daha az iletilir, ark bölgesinin sıcaklığı artar ve kolay tutuşma gerçekleşir. Presleme basıncı düşük olduğu zaman numunelerde ergime az olmaktadır. Buda yanma sıcaklığının düşük olduğunu belirtir. Ergime az olduğu için yanma kanallarının genişliği de azalmaktadır.

Farklı basınçlarda (50, 100, 200 MPa) preslenen ve 200 °C ön ısıtma sıcaklığında sentezlenen numunelerin makro görüntüleri Şekil 2’de verilmiştir. Yanma olukları yanma ilerlemesine dik doğrultuda meydana geldiği için numuneler üst kenarlardan tutuşturularak sentezlenmiştir. Bu durumda yanma kanalları ark eksenine (yanma ilerlemesine) dik fakat numune eksenine 45°’lik açı yapan paralel halkalar şeklinde oluşmakta ve basma mukavemeti artmaktadır. Görüntülerde soğuk presleme basıncının artması ile yanma kanallarının genişliğinin arttığı görülmektedir. Reaksiyon esnasında yeni gözenekler oluşurken geçici sıvı fazlar oluşmasına rağmen numuneler şekilleri bozulmaksızın, preslendiği gibi kalmaktadır. Fakat Şekil 3’de görüldüğü gibi soğuk presleme basıncının artması ile mikro gözeneklerin azaldığı görülmektedir. Gözenekler düzensiz şekilli, elips veya dairesel olabilmektedir. Şekil 2’de birkaç mm uzunluğunda ve yaklaşık 100-600 µm genişliğinde yanma kanalları, Şekil 3’de ise gözenekler (<100 µm) görülmektedir.

Üretilen numunelerdeki gözenek oranları Tablo 1’de belirtilmiştir. Tablo 1’de ham gözenekliliğinin azalması durumunda sentezleme sonucu gözenek oranlarının beklendiği gibi [11,15] azaldığı görülmektedir.



**Şekil 2.** Farklı basınçlarda (soldan sağa sırasıyla 50, 100, 200 MPa) soğuk preslendikten sonra 200 °C ön ısıtma sıcaklığında sentezlenen numunelerin makro görüntüsü (The macro images of specimens synthesized at 200 °C preheating temperature after green compacted under different pressures (from left to right 50, 100, 200 MPa, respectively))



**Şekil 3.** Farklı basınçlarda soğuk preslendikten sonra 200 °C ön ısıtma sıcaklığında sentezlenen numunelerin optik görüntüsü, (a) 50 MPa, (b) 100 MPa ve (c) 200 MPa (The optical micrographs of specimens synthesized at 200 °C preheating temperature after green compacted under different pressures, (a) 50 MPa, (b) 100 MPa and (c) 200 MPa)

**Tablo 1.** 200 °C ön ısıtma sıcaklığında sentezlenen numunelerin, farklı ham gözenekliliğe ve farklı Ni-Ti oranına göre oluşan gözenekliliği (The porosity of the specimens synthesized at 200 °C preheating temperature according to different green porosity and different Ni-Ti ratio)

Ni-Ti oranı (at.%)	Ön ısıtma sıcaklığı (°C)	Ham gözeneklilik (%)	Genel gözeneklilik (%)	Açık gözenek oranı (%)
Ni-49,5Ti	200	57,6 (50 MPa)	59,1	88,3
Ni-49,5Ti	200	50,5 (100 MPa)	55,5	85,3
Ni-49,5Ti	200	46,2 (200 MPa)	51,6	83,7

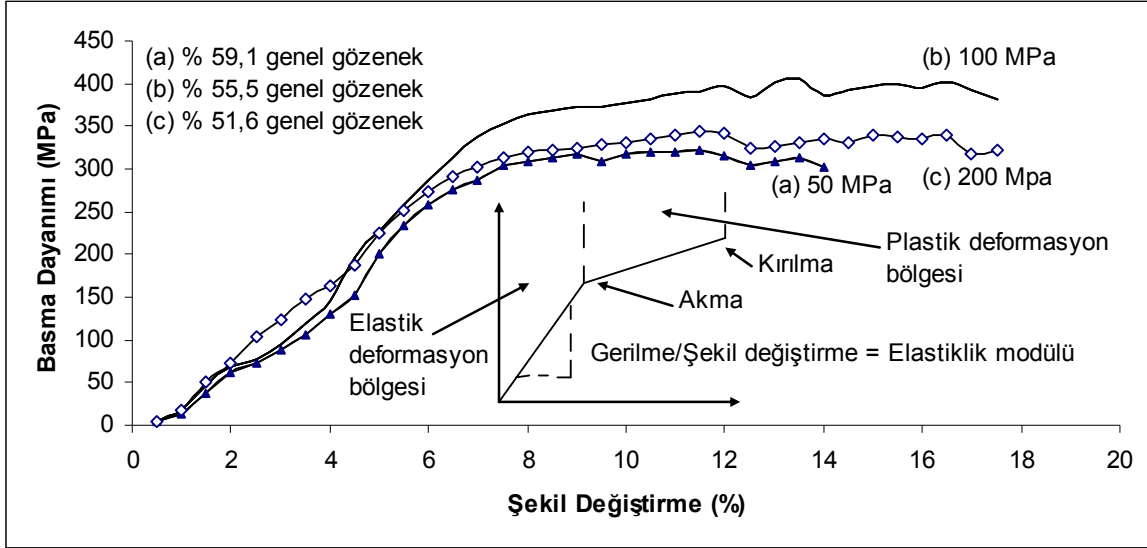
Gözenek oranları presleme basıncından başka; ısıtma hızında, toz karışım oranında, toz saflığında, toz karıştırma süresinde, oksitlenmeye karşı kullanılan argon gazı basıncında veya tutuşturma yönteminden kaynaklanıyor olabilir. Yeh ve Sung tarafından [11], toz boyutu küçüldüğü ve ön ısıtma sıcaklığı arttığı zaman gözenek oranının azaldığı belirtilmiştir. Toz karışımı homojen olmadığı zaman sentezlenme sırasında yanma ve kanal oluşumunun farklı olması doğaldır. Çünkü nikelin yanma özelliği titanyuma göre daha düşüktür. Bu nedenle karışım içerisinde nikel veya titanyumun fazla olduğu yerlerde yanma miktarında farklılıklar olur.

### 3.1. Sentezlenen Gözenekli NiTi Alaşımın Basma Dayanımı (The Compressive Strength of Porous NiTi Alloy Synthesized)

Şekil 4'de farklı basınçlarda soğuk preslendikten sonra 200 °C ön ısıtma sıcaklığında sentezlenen numuneler için basma gerilmesi eğrileri gösterilmektedir. 50 MPa, 100 MPa ve 200 MPa basınç altında soğuk preslenerek üretilen numuneler için

maksimum basma dayanımları sırasıyla, 317 MPa, 396 MPa ve 343 MPa elastiklik modülleri ise sırasıyla, 3,05 GPa, 3,35 GPa ve 4,13 GPa olarak elde edildi. Buna göre, beklendiği gibi, gözenek oranının azalması ile (50 ve 100 MPa basınçla soğuk preslendikten sonra imal edilen numuneler için) basma dayanımları artmaktadır [3,12,18,19]. Yalnız, soğuk presleme basıncı 200 MPa olduğu zaman gözenek oranı azalmasına rağmen, yanma olukları genişlediği için basma dayanımında azalma meydana gelmiştir. Yani basma dayanımı, genel gözeneklilik ve yanma kanallarının genişliğinden etkilenmektedir.

Gözenekli NiTi alaşımın mekanik özellikleri numunelerin faz yapısı ve gözenek karakteristikleri ile de ilgilidir [20]. Kullanım açısına göre malzemenin basma dayanımı arzu edilen değerde olmalıdır. Bu çalışmada elde edilen ürünler gözenek oranı (%51,6-59,1), basma dayanımı (<396 MPa) ve elastiklik modülü (%<4,13 GPa) açısından kemikle benzer yapıya sahiptir. İmplant malzeme için ideal gözenek oranı % 30-90 ve gözenek boyutu 100-600 µm arasında olmalıdır [14]. Kemikğin boyuna basma



**Şekil 4.** Farklı basınçlarda soğuk preslenen ve 200 °C ön ısıtma sıcaklığında sentezlenen numunelerin basma-gerilme eğrisi (The compressive stress-strain curve of the synthesized at 200 C preheating temperature after green-compacted under different pressures.)

dayanımı 170-193 MPa ve test yönü kemik eksenine dik olduğu zaman 133 MPa civarındadır [3]. Kompak kemiğin elastiklik modülü ise 20 GPa'nın altındadır. Yoğun NiTi alaşımının elastik modülü kemiğinkinden fazla, gözenekli NiTi alaşımının elastik modülü ise kemiğinkine yakın bir değerdedir [12]. Yüksek elastik modüllü malzeme kemikle kendi arayüzeyini bozarak aşınmaya neden olabilir [3]. Ayrıca yüksek elastik modüllü malzeme kemikle kendi arayüzeyi arasında yük dağılımını bozarak kemiğin daha az yüklenmesine ve dolayısıyla kemiğin erimesine neden olabilir.

Ürettiğimiz numunelerin elastiklik modülleri ve maksimum basma dayanımları yoğun NiTi alaşımının sahip olduğu değerlerden daha düşüktür [21]. Gözenekli numuneye yük uygulandığında gözenekler yavaş yavaş kapandığı için numunedeki % şekil değiştirme artarak elastiklik modülü azalmaktadır. Gözenek oranı arttıkça numunedeki taşıyıcı kolonların dayanımı da azaldığından numune fazla yüke dayanamayarak kırılmaktadır. Böylece basma dayanımı ve şekil değiştirme miktarı da azalmaktadır. Yanma kanallarının arasında kalan ve numune boyunca uzanan bölgeler taşıyıcı kolon işlevi görmektedir. Üretilen gözenekli NiTi numunelerindeki kırılma yoğun NiTi numunelerindeki gibi aniden gerçekleşmemektedir. Şekil 4'de de görüldüğü gibi maksimum basma dayanımından sonra küçük dalgalanmalar görülmektedir. Bu durum zayıf gözeneklerin ve taşıyıcı kolonların kırıldığı zaman yükün düştüğünü gözeneklerin kapandığı zaman tekrar arttığını belirtir. Fakat belli bir şekil değiştirme oranından sonra kırılma belirgin şekilde görülmektedir. Şekil 4'de kırılmanın gerçekleşmesinde sonraki değerler belirtilmemiştir. NiTi biyo-uyumlu bir malzeme olduğundan elde edilen numuneler gözenekli yapısından ve düşük elastiklik modülünden dolayı kemikle iyi uyum sağlayacağı ümit edilmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada gözenekli NiTi alaşımı toz metalürjisi yöntemlerinden SHS ile üretildi ve aşağıdaki sonuçlar elde edildi. Kullanılan tutuşturma tekniği daha basit ve daha az süre almaktadır. Soğuk presleme basıncının artması, diğer bir ifadeyle ham gözenekliliğin azalması durumunda numunelerin tutuşması için uygulanan ark süresi ve yanma kanal genişlikleri artmakta, gözenek oranı azalmakta fakat gözenek şekilleri değişmemektedir. Numuneler; gözeneklilik, gözenek karakteristikleri ve basma dayanımları açısından implant materyal olarak kullanılması için uygun olabilecektir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (FÜBAP Proje No. 1043) tarafından Doktora çalışması amacıyla desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Berthelville, B., Bidaux, J.E., "Enhanced powder sintering of near-equiatomic NiTi shape-memory alloys using Ca reductant vapor", **Journal of Alloys and Compounds**, 387, 211-216, 2005.
- Fu, Y., Shearwood, C., Characterization of nanocrystalline TiNi powder, **Scripta Materialia**, 50, 319-323, 2004.
- Chung, C.Y., Chu, C.L., Wang, S.D., "Porous TiNi shape memory alloy with high strength fabricated by self-propagating high-temperature synthesis", **Materials Letters**, 58, 1683-1686, 2004.
- Zhao, Y., Taya, M., Kang, Y., Kawasaki, A., "Compression behavior of porous NiTi shape



- memory alloy”, **Acta Materialia**, 53, 337–343, 2005.
5. Otsuka, K., Ren, X., “Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys” **Progress in Materials Science**, 50, 511–678, 2005.
  6. Dilibal, S., “Nikel-Titanyum Şekil Bellekli Alaşım Üretimi Ve Şekil Bellek Eğitimi” Doktora Tezi, **Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 115, 2005.
  7. Li, B.Y., Rong, L.J., Li, Y.Y. and Gjunter, V.E., “Synthesis of porous Ni-Ti shape-memory alloys by self-propagating high-temperature synthesis: Reaction mechanism and anisotropy in pore structure”, **Acta Materials**, 48, 3895-3904, 2000.
  8. Shearwood, C., Fu, Y.Q., Yu, L., Khor, K.A., “Spark plasma sintering of TiNi nano-powder”, **Scripta Materialia**, 52, 455–460, 2005.
  9. Krone, L., Schüller, E., Bram, M., Hamed, O., Buchkremer, H.-P., Stöver, D., “Mechanical behavior of NiTi parts prepared by powder metallurgical methods”, **Materials Science and Engineering**, A 378, 185–190, 2004.
  10. Man, H.C., Zhang, S., Cheng, F.T., Guo, X., “Laser fabrication of porous surface layer on NiTi shape memory alloy”, **Materials Science and Engineering**, A 404, 173–178, 2005.
  11. Yeh, C.L., Sung, W.Y., “Synthesis of NiTi intermetallics by self-propagating combustion”, **Journal of Alloys and Compounds**, 376, 79-88, 2004.
  12. Chu, C.L., Chung, C.Y., Lin, P.H., Wang, S.D., “Fabrication and properties of porous NiTi shape memory alloys for heavy load-bearing medical applications”, **Journal of materials processing technology**, 169, 103-107, 2005.
  13. Zanotti, C., Giuliani, P., Terrosu, A., Gennari, S., Maglia, F., “Porous NiTi ignition and combustion synthesis”, **Intermetallics**, 15, 404-412, 2007.
  14. Goh, C.W., Gu, Y.W., Lim, C.S., Tay, B.Y., “Influence of nanocrystalline Ni-Ti reaction agent on self-propagating high-temperature synthesized porous NiTi”, **Intermetallics**, 15, 461-467, 2007.
  15. Tay, B.Y., Goh, C.W., Yong, M.S., Soutar, A.M., Li, Q., Ho, M.K., Myint, M.H., Gu, Y.W., Lim, C.S., “Self-propagating high-temperature synthesis of porous NiTi”, **SIMTech technical reports**, 7-1, 21-25, 2006.
  16. Kaya, M., “Toz metalürjisi ile üretilen NiTi şekil hatırlamalı alaşımların metalürjik ve mekanik karakteristiklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, **F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 122, 2008.
  17. Kaya, M., Orhan, N., Kurt, B., “Gözenekli NiTi ŞHA’ın toz metalürjisi ile üretimi ve ön ısıtma sıcaklığının gözenek oluşumu üzerindeki etkisi”, **F.Ü. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları**, 6, 154-158, 2008.
  18. Li, Y.H., Rong, L.J. and Li, Y.Y., “Compressive property of porous NiTi alloy synthesized by combustion synthesis”, **Journal of Alloys and Compounds**, 345, 271-274, 2002.
  19. Yuan, B., Chung, C.Y., Huang, P., Zhu, M., “Superelastic properties of porous TiNi shape memory prepared by hot isostatic pressing”, **Materials Science and Engineering**, A 438–440, 657–660, 2006.
  20. Zhu, S.L., Yang, X.J., Deng, F., Hu, S.H., Cui, Z.D., “Processing of porous TiNi shape memory alloy from elemental powders by Ar-sintering”, **Materials Letters**, 58, 2369-2373, 2004.
  21. Mihalcz, I., “Fundamental characteristics and design method for nickel-titanium shape memory alloy”, **Periodica Polytechnica ser. Mech. Eng.**, 45, 1, 75-86, 2001.