



Gözenekli biyomedikal Ti-Al-Nb malzemelerinin mikroyapısal ve mekanik karakterizasyonu

Microstructural and mechanical characterization of porous biomedical Ti-Al-Nb materials

Eyyup Murat Karakurt^{1,*} 

¹ Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 80000, Osmaniye, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle üretilen gözenekli Ti-Al-Nb esaslı biyomedikal malzemelerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri sistematik olarak incelenmiştir. Saf Ti, Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb örnekleri, 300 MPa presleme basıncı altında 1300 °C'de 2 saat sinterlenmiştir. Mikroyapısal karakterizasyonlar optik mikroskop, enerji dağılımlı spektroskopisi (EDS) ve X-ışını difraksiyonu (XRD) ile gerçekleştirilmiştir; mekanik performans ise oda sıcaklığında basma testleriyle değerlendirilmiştir. Elde edilen gözeneklilik oranları sırasıyla %27, %28 ve %26; basma dayanımları ise saf Ti için 358.8 MPa, Ti-3Al-5Nb için 324.8 MPa ve Ti-1Al-10Nb için 314.9 MPa olarak belirlenmiştir. Bulgular, kontrollü gözeneklilik ve uygun faz bileşimi sayesinde Ti-Al-Nb alaşımlarının kemik dokusuyla mekanik uyum sağlayan ve stres kalkanı etkisini minimize eden implant uygulamaları için uygun adaylar olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Gözenekli titanyum alaşımları, Toz metalurjisi, Ti-Al-Nb alaşımları, Biyomedikal implantlar

1 Giriş

İmplant malzemeleri günümüzde ihtiyacı her geçen gün daha fazla hissedilen araştırılması gereken öncelikli alanlardan biridir ve bu malzemelerin seçimi; klinik gereksinimlere, malzeme özelliklerine ve üretim maliyetine vb. bağlıdır [1]. İmplant malzeme dizaynı da implantasyon için hayati öneme sahiptir. Çoğu biyomedikal uygulama için implant malzemeleri, bu kapsamda gözenekli bir yapıya sahip olacak şekilde üretilmektedir [2]. Çünkü gözenekli yapı, kemik doku hücreleri için kemik büyümesi ve fizyolojik taşımaya olanak sağlayarak implant ile kemik dokusu arasındaki bütünleşmeyi artırır [3]. Ayrıca, implant malzemesi içindeki gözeneklilik, implantın mekanik özelliklerini süngerimsi kemiğe (0.02–3 GPa) ve kortikal kemiğe (3–30 GPa) daha da yakınlıştırır [4, 5]. Bu durum, kemik ile implant malzeme arasındaki stres kalkanı etkisini minimum seviyede tutmasına yardımcı olur [6, 7]. Bu nedenle, implant malzemesinin gözenekliliği ve mekanik özellikleri arasında hassas bir denge vardır. Bu noktada, dikkat edilmesi gereken en önemli hususlar gözenekliliğin dağılımı, morfolojisi ve kontrolüdür [8]. Böylece

Abstract

In this study, the microstructural and mechanical properties of porous Ti-Al-Nb based biomedical materials produced by powder metallurgy were systematically investigated. Pure Ti, Ti-3Al-5Nb and Ti-1Al-10Nb samples were sintered at 1300°C for 2 hours under a pressing pressure of 300 MPa. Microstructural characterizations were performed using optical microscopy, energy dispersive spectroscopy (EDS), and X-ray diffraction (XRD); mechanical performance was evaluated by compression tests at room temperature. The obtained porosity percentages were 27%, 28%, and 26%, respectively; and the compressive strengths were determined as 358.8 MPa for pure Ti, 324.8 MPa for Ti-3Al-5Nb, and 314.9 MPa for Ti-1Al-10Nb. The findings demonstrate that Ti-Al-Nb alloys are suitable candidates for implant applications due to their controlled porosity and appropriate phase composition, providing mechanical compatibility with bone tissue and minimizing stress shielding effects.

Keywords: Porous titanium alloys, Powder metallurgy, Ti-Al-Nb alloys, Biomedical implants

gözenekliliğe sahip implant malzemesinin üretimi toz metalurjisi kullanılmasıyla gerçekleştirilebilmektedir [9]. Bu teknikte üretilen implant malzemesinin gözenek oranı; başlangıç partikül boyutu, presleme basıncını, sinterleme sıcaklığını ve zamanı gibi birçok parametreye dayanmaktadır [10]. Dolayısıyla, üretim parametrelerinin kontrollü biçimde ayarlanması, hedeflenen gözenek morfolojisi ve mekanik özelliklerin elde edilmesi açısından kritik önem taşımaktadır. Bu çalışmada, gözenekli yapıya sahip saf Ti, Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb (ağ.%) malzemeleri toz metalurjisi tekniği ile üretilmiştir.

Titanyum ve alaşımları, makul özgül dayanım, üstün korozyon direnci ve iyi biyoyumlu özellikleri sayesinde biyomedikal uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [11]. Ancak, implant malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılan Ti-6Al-4V titanyum alaşımı, bünyesinde bulunan vanadyum elementinin olası sitotoksik etkileri ve yüksek elastik modül değerinden dolayı, vanadyum içermeyen alternatif titanyum alaşımlarının geliştirilmesine yönelik araştırmalar, yoğun bir şekilde artmıştır [12, 13]. Bu doğrultuda, biyoyumlu özellik

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: eyyupmuratkarakurt@osmaniye.edu.tr (E. M. Karakurt)
Geliş / Received: 20.02.2026 Kabul / Accepted: 08.04.2026 Yayınlanma / Published: 13.05.2026
doi: 10.28948/ngumuh.1893955

sergileyen niyobyum elementi ile alaşımlandırılmış titanyum esaslı alaşımlar, iyi biyoyumlulukları ve kabul edilebilir mekanik özellikleri sayesinde implant uygulamaları için dikkat çekici alternatifler olarak öne çıkmaktadır [14, 15]. Özellikle titanyum-alüminyum-niyobyum esaslı alaşımlar, α -Ti + β -Ti fazlarını bünyelerinde barındırarak mekanik performans ve mikroyapı kararlılığı açısından çok önemli avantaj sağlamaktadırlar [16, 17].

Bu çalışma, biyoyumlu ve uygun mekanik özelliklere sahip yeni nesil biyomedikal malzemelerin optimizasyonuna bilimsel düzeyde katkı sunmayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, farklı oranlarda alüminyum (1 ve 3 ağı.) ve niyobyum (5 ve 10 ağı.) içeren titanyum esaslı gözenekli malzemeler kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

2 Materyal ve metod

2.1 Malzeme üretimi

Titanyum (Ti), alüminyum (Al) ve niyobyum (Nb) tozlarına ait elementel analiz sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur. Başlangıç tozları olarak Ti (Alfa Aesar), Nb (Alfa Aesar) ve Al (Alfa Aesar) kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan elementel tozlara ait partikül boyut analizleri Tablo 2'de verilmiştir. Bu tozlar, gözenekli yapıya sahip saf Ti, Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb (ağı.) malzemelerinin üretiminde değerlendirilmiştir. Ayrıca, deneylerde kullanılan kimyasal bileşimler ile toz metalurjisi işlem parametrelerine ilişkin ayrıntılı bilgiler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 1. Titanyum, alüminyum ve niyobyum tozlarının elementel analizi

	Ti	Nb	Al	Ag	Cu	Co
Titanyum	Kal.	-	-	-	0.03	0.1
Niyobyum	0.02	Kal.	0.01	0.01	0.23	0.004
Alüminyum	-	-	Kal.	-	0.025	0.05

Tablo 2. Titanyum, alüminyum ve niyobyum tozlarına ait partikül boyut analizi (μm)

	D10	D20	D50	D90
Titanyum	12.2	18.1	46.80	>350
Niyobyum	10.8	11.6	45.21	>270
Alüminyum	11.2	13.7	44.5	>300

Tablo 3. Malzemelerin kimyasal bileşimi ve toz metalurjisi işleminin parametreleri

Kimyasal Bileşim (ağı.)	Karıştırma süresi (saat)	Basma basıncı (MPa)	Sinterleme sıcaklığı (°C)	Sinterleme süresi (saat)
Saf Ti	4	300	1300	2
Ti-3Al-5Nb	4	300	1300	2
Ti-1Al-10Nb	4	300	1300	2

Kompozisyonel homojenliğin sağlanması amacıyla Ti, Nb ve Al elementel tozları, 24 dev/dk hızda çalışan Turbulax karıştırıcıda 4 saat karıştırılmıştır. Karıştırma işleminin ardından toz karışımları, oda sıcaklığında (~ 24 °C) 300 MPa basınç altında, $\Phi 10 \times 15$ mm boyutlarındaki çelik kalıplarda tek eksenli olarak preslenmiştir. Elde edilen tüm kompaktlar, argon atmosferi altında 1300 °C'de 2 saat sinterlenmiş;

ardından 10 °C/dk soğuma hızıyla kontrollü biçimde 200 °C'ye kadar soğutulmuştur.

2.2 Metalografik incelemeler

Sinterlenmiş malzemeler gözlem gereksinimlerine bağlı olarak farklı bölgelerden kesilmiştir. Numuneler, 2500 grit SiC (silisyum karbür) zımpara kâğıtları ile zımparalanmış ve ardından 3-5 μm boyutundaki OP-S (su bazlı SiO₂ süspansiyonu) ile parlatılmıştır. Mikroyapısal özelliklerin belirginleştirilmesi amacıyla numuneler, Keller çözeltisi (190 ml H₂O, 5 ml HNO₃, 3 ml HCl ve 2 ml HF) ile 5–8 saniye süreyle kimyasal olarak dağlanmıştır. Mikroyapısal incelemeler; optik mikroskop (Olympus BX53M) ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS; Bruker-125 eV) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Faz analizi ise Cu-K α radyasyonu altında, 30°–80° aralığında tarama yapılarak Rigaku D/Max 2200 cihazı ile yapılmıştır. Ayrıca, her grup alaşım için üç adet olan 10 mm \times 15 mm boyutlarındaki numunelere ortam sıcaklığında (25 ± 5 °C), Shimadzu AGS-X (10 kN) test cihazında 1 mm/dk basma hızında tek eksenli basma testleri uygulanmıştır.

2.3 Gözeneklilik hesaplamaları

Üretilen malzemelerin teorik yoğunluğu, sinterlenmiş (gerçek) yoğunluğu ve gözeneklilik oranı, aşağıda verilen matematiksel denklemler kullanılarak hesaplanmıştır [18]. Teorik yoğunluk (ρ_0), alaşımı oluşturan elementlerin atom kütleleri ve özgül yoğunlukları dikkate alınarak belirlenmiştir (Bk. Denklem (1)). Sinterlenmiş yoğunluk (ρ) ise doğrudan numunelerin kütle-hacim oranları üzerinden hesaplanmıştır (Bk. Denklem (2)). Gözeneklilik (ε) değeri ise teorik ve sinterlenmiş yoğunluk verileri kullanılarak elde edilmiştir (Bk. Denklem (3)).

$$\rho_0 = \frac{m_{\text{Ti}} + m_{\text{Nb}} + m_{\text{Al}}}{V_{\text{Ti}} + V_{\text{Nb}} + V_{\text{Al}}} \quad (1)$$

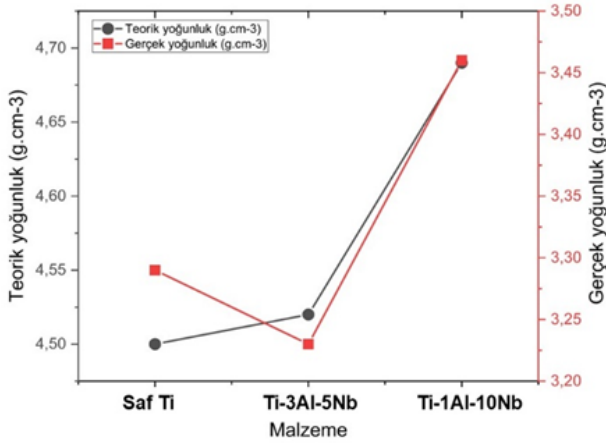
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_{\text{teorik}}}{\rho_{\text{gerçek}}} \right) * 100 \quad (3)$$

3 Bulgular ve tartışma

Geleneksel sinterleme prosedürü ile üretilen numunelere ait teorik ve gerçek yoğunluk değerleri Şekil 1'de sunulmuştur. Teorik yoğunluklar, malzemelerin kimyasal bileşimleri esas alınarak hesaplanmış (Bk. Denklem (1)) olup saf Ti, Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb (ağı.) için sırasıyla 4.50, 4.52 ve 4.69 g·cm⁻³ olarak belirlenmiştir. Gerçek yoğunluk değerleri ise kütle/hacim oranı kullanılarak hesaplanmış (Bk. Denklem (2)) ve aynı malzemeler için sırasıyla 3.29, 3.23 ve 3.46 g·cm⁻³ olarak elde edilmiştir. Teorik ve gerçek yoğunluklar arasındaki belirgin fark, uygulanan toz metalurjisi parametreleri (presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresi gibi) sonucunda tam yoğunlaşmanın sağlanamamasına ve numunelerde gözenekli yapının korunmasına bağlanmaktadır. Bu nedenle tüm malzemelerde ölçülen gerçek yoğunluk değerleri teorik yoğunlukların altında kalmıştır. Ayrıca alaşım bileşiminde

yer alan Ti, Nb ve Al elementlerinin özgül yoğunlukları teorik yoğunluk üzerinde doğrudan etkili olmuş; artan Nb içeriği teorik yoğunluğu yükseltirken, Al oranındaki artış ise teorik yoğunlukta düşüş eğilimi oluşturmuştur. Hesaplanan gözenek oranları saf Ti, Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb malzemeleri için sırasıyla %27, %28 ve %26 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu yakın değerler, alaşım bileşimindeki değişimlerin gözeneklilik üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, kullanılan Ti, Nb ve Al tozlarının benzer partikül boyut dağılımına sahip olmasıyla ilişkilendirilebilir; zira benzer boyutlu tozlar presleme ve sinterleme aşamalarında daha homojen bir sıkışma ve gözenek dağılımı sağlayarak elementel farklılıkların gözenek oranı üzerindeki etkisini azaltmaktadır [19]. Literatürde de başlangıç toz boyutunun gözenek morfolojisi ve oranı üzerinde belirleyici bir parametre olduğu rapor edilmektedir. Kayani vd. yaptığı çalışmada, başlangıç tozlarına ait toz boyutlarının gözenek özellikleri ve oranı üzerinde belirgin bir etkisinin olduğunu ortaya koymuştur [20]. Bununla birlikte, alaşım kompozisyonu değişmesine rağmen benzer gözenek oranlarının elde edilmesi, gözenek oluşumunun büyük ölçüde üretim parametreleri tarafından kontrol edildiğini ortaya koymaktadır.

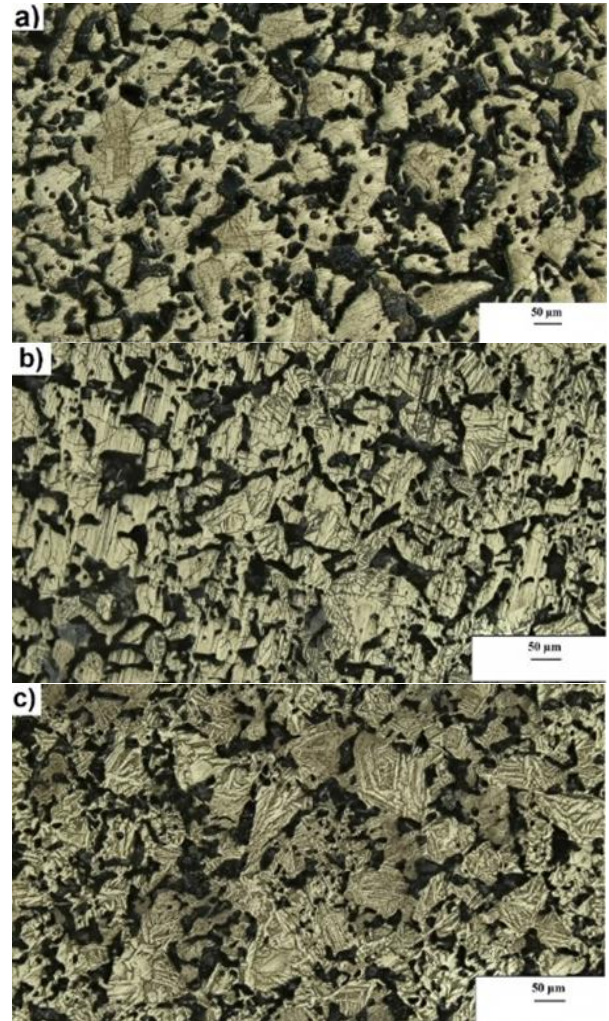


Şekil 1. Malzemelerin teorik ve gerçek yoğunlukları

1300 °C'de 2 saat sinterlenen gözenekli saf Ti, Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb (ağ.%) numunelerinin morfolojik özellikleri optik mikroskop analizleri ile incelenmiş olup ilgili mikroyapı görüntüleri Şekil 2'de sunulmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda tüm numunelerde keskin kenarlı ve düzensiz geometrilere sahip gözeneklerin yaygın biçimde dağıldığı belirlenmiştir. Optik mikroskop görüntülerinden hesaplanan ortalama gözenek çapları saf Ti, Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb malzemeleri için sırasıyla yaklaşık 119 µm, 112 µm ve 109 µm olarak ölçülmüştür. Gözenek boyutlarındaki bu dağılımın, gözeneklilik oranlarında gözlenen eğilimle uyumlu biçimde birbirine oldukça yakın değerler sergilediği görülmüştür. Yao vd. yaptıkları çalışmada, implantasyon için kullanılan ideal gözenek boyutlarının 100 µm ile 400 µm arasında olduğunu rapor etmişlerdir [21]. Bu çalışma kapsamında elde edilen ortalama gözenek çapları ve gözeneklilik oranları söz konusu

aralık içerisinde yer almakta olup kemik dokusu büyümesi, hücre tutunması ve besin/kan taşınımı açısından elverişli bir mikro mimari sunduğunu göstermektedir. Dolayısıyla üretilen gözenekli yapıların biyolojik açıdan olumsuz bir etki oluşturması beklenmemekte, aksine implant yüzey biyoyumluluğunu destekleyici nitelikte olduğu değerlendirilmektedir.

Ti matrisi içerisinde Nb bakımından zengin ve Al bakımından fakir olarak gözlenen koyu kontrastlı bölgeler bcc β-Ti fazı olarak sınıflandırılırken; Nb içeriği görece düşük ve Al içeriği yüksek olan açık renkli bölgeler ise hcp α-Ti fazı olarak tanımlanmıştır. Ayrıca matris içerisindeki Nb konsantrasyonunun artması ve Al oranının azalmasıyla birlikte β-Ti fazının mikroyapıdaki hacimsel oranında belirgin bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Literatürde rapor edilen benzer bulgularla uyumlu olarak, Karakurt vd. titanyum matrisinde artan Nb içeriğine bağlı biçimde β-Ti fazının daha baskın hale geldiğini ve Ti-Nb ikili alaşımlarında dubleks (β-Ti + α-Ti) mikroyapıların oluştuğunu bildirmiştir [22]. Bu çalışmada da Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb bileşimlerinde hem hcp α-Ti hem de bcc β-Ti fazlarının birlikte var olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2. Malzemelerin optik fotoğrafları (a) Ti, (b) Ti-3Al-5Nb, (c) Ti-1Al-10Nb

Elde edilen sonuçlar, Ti-Al-Nb sistemindeki faz dönüşüm davranışının Nb ve Al konsantrasyonlarına duyarlı olduğunu göstermektedir. Nitekim literatürde, Nb miktarındaki artış ve Al oranındaki azalışın β -Ti fazının termodinamik stabilitesini artırdığı, buna karşılık α -Ti fazının stabilitesini azalttığı ifade edilmektedir [23]. Bu gözlemler, çalışmada gerçekleştirilen XRD analizlerinden elde edilen bulgular ile de tutarlılık göstermektedir.

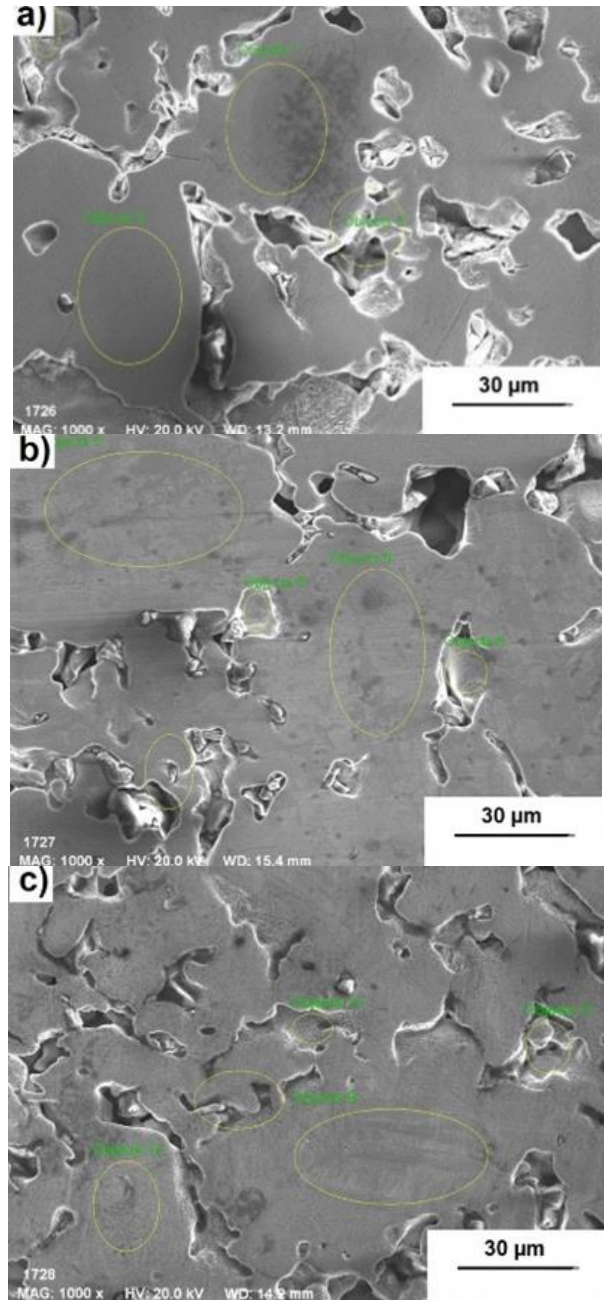
Geleneksel sinterleme yöntemiyle üretilen gözenekli saf Ti, Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb (ağ.%) numunelerine ait enerji dağılım spektroskopisi (EDS) analiz sonuçları Şekil 3'te sunulmuştur. Elde edilen spektrumlarda yalnızca Ti (22 K-serisi), Al (13 K-serisi) ve Nb (41 L-serisi) elementlerine karşılık gelen karakteristik pikler gözlemlenmiş, bunun dışında herhangi bir safsızlık ya da istenmeyen element pikine rastlanmamıştır (Bk. Tablo 4). EDS bulguları, sinterleme süreci boyunca gerçekleşen faz dönüşümlerinin Ti, Al ve Nb elementlerinin mikroyapı içerisindeki yerel dağılımlarında belirgin farklılıklara neden olduğunu ortaya koymuştur. SEM görüntülerinde belirlenen EDS analiz noktalarının konumları dikkate alındığında, Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb alaşımlarında Nb elementinin bazı bölgelerde nominal bileşime kıyasla daha düşük konsantrasyonlarda bulunduğu ve bu alanların hcp α -Ti fazına karşılık geldiği tespit edilmiştir [24]. Buna karşılık, Nb bakımından zengin bölgelerin ise Nb'nin tercihli çözünmesi sonucu oluşan bcc β -Ti fazı ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Ti matrisi içerisindeki Al dağılımında da benzer bir eğilim gözlenmiş; β -Ti fazı olarak sınıflandırılan bölgelerde Al içeriğinin görece düşük, α -Ti fazına karşılık gelen alanlarda ise daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu bulgular literatürde rapor edilen çalışmalarla uyum göstermektedir. Wang vd. Ti matrisi içerisinde Nb elementinin β -Ti fazında yüksek çözünürlüğe sahip olduğunu, buna karşın α -Ti fazındaki çözünürlüğünün sınırlı kaldığını deneysel olarak ortaya koymuştur [25]. Bu durum, Ti esaslı alaşımlarda faz dağılımının elementel çözünürlük farklılıkları tarafından kontrol edildiğini ve mikroyapısal heterojenliğin temel belirleyicilerinden birinin yerel kimyasal kompozisyon olduğunu desteklemektedir.

Tablo 4. Malzemelere ait EDS analiz noktaları

Analiz Bölgeleri	Ti (22 K-serisi)	Al (13 K-serisi)	Nb (41 L-serisi)	
Object 1	100			
Object 2	100			
Saf Ti	Object 3	100		
	Object 4	100		
	Object 5	90.23	5.27	4.51
	Object 6	86.01	5.30	8.70
Ti-3Al-5Nb	Object 7	83.52	5.02	11.46
	Object 8	88.31	3.66	8.03
	Object 9	81.73	3.64	14.63
	Object 10	79.53	3.51	16.96
Ti-1Al-10Nb	Object 11	74.31	4.17	21.53
	Object 12	82.26	2.86	14.88

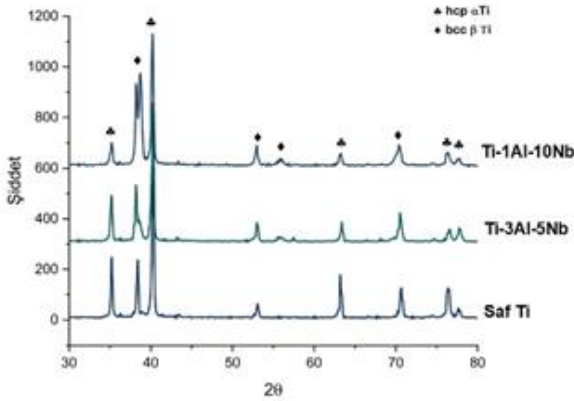
Geleneksel sinterleme yöntemiyle üretilen saf Ti, Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb (ağ.%) numunelerine ait X-ışını kırınımı (XRD) spektrumları Şekil 4'te sunulmaktadır. XRD analiz sonuçları, Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb alaşımlarında

Ti fazlarına ait hem hekzagonal sıkı paket (hcp) α -Ti hem de hacim merkezli kübik (bcc) β -Ti fazlarının birlikte bulunduğunu ortaya koymuştur. Saf Ti numunesinde baskın fazın hcp α -Ti olduğu belirlenirken, alaşıma %1 Al ve %10 Nb ilavesi sonrasında baskın fazın bcc β -Ti fazına kaydığı gözlemlenmiştir. Bu faz dönüşümü; artan Nb konsantrasyonu ve eş zamanlı olarak azalan Al içeriğinin α -Ti fazının stabilitesini baskılaması ve buna bağlı olarak α -Ti fazına ait karakteristik pik şiddetlerinde kademeli bir azalmaya yol açması ile açıklanabilir [26]. Ti matrisi içerisinde Nb çözünürlüğünün artması, α -Ti \rightarrow β -Ti faz geçişini termodinamik açıdan teşvik eden temel etkenlerden biri olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 3. Malzemelerin EDS analiz noktalarını gösteren SEM fotoğrafları (a) Ti, (b) Ti-3Al-5Nb, (c) Ti-1Al-10Nb

Bununla birlikte, α -Ti fazını dengeleyici bir alaşım elementi olarak bilinen Al oranının %3 seviyelerinden %1 düzeyine düşmesi de β -Ti fazının oluşumunu destekleyen bir diğer önemli parametre olarak öne çıkmaktadır. Elde edilen bulgular literatürde bildirilen çalışmalarla uyum göstermektedir. Miao vd. Ti matrisine %5–%35 aralığında Nb ilavesi yapılması durumunda artan Nb içeriğine paralel olarak XRD desenlerinde β -Ti fazına ait pik yoğunluklarının belirgin biçimde arttığını ve yüksek Nb konsantrasyonlarında β -Ti fazının baskın hâle geldiğini rapor etmiştir [27]. Bu durum, Ti esaslı alaşımlarda faz stabilitesinin alaşım kompozisyonuna duyarlı olduğunu ve özellikle Nb elementinin β -faz stabilizatörü olarak etkin bir rol oynadığını doğrulamaktadır.

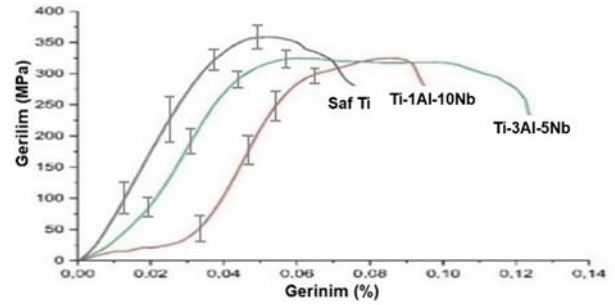


Şekil 4. Malzemelerin XRD spektrumları

Geleneksel sinterleme yöntemiyle üretilen saf Ti, Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb (ağ.%) numunelerinin mekanik davranışları tek eksenli basma testleri ile değerlendirilmiş; elde edilen gerilme–gerinim eğrilerinden ortalama elastik modül ve nihai basma dayanımı değerleri belirlenmiştir. Gözeneklilik oranları sırasıyla %27, %28 ve %26 olan saf Ti, Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb malzemelerinin maksimum basma dayanımı değerleri sırasıyla 358.8 MPa, 324.8 MPa ve 314.9 MPa olarak ölçülürken, elastik modül değerleri ise 18 GPa, 7.5 GPa ve 6 GPa olarak kaydedilmiştir (Bk. Şekil 5). Elde edilen mekanik performansların, gözeneklilik oranlarının birbirine oldukça yakın (%26–28 aralığında) olması nedeniyle doğrudan gözenek miktarından ziyade alaşım kompozisyonu ve faz bileşimi ile ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. Saf Ti numunesinde baskın olarak gözlenen α -Ti fazı, yüksek mukavemet ve yüksek elastik modül değerlerinin elde edilmesinde belirleyici bir rol oynamıştır. Buna karşılık, en düşük gözeneklilik oranına (%26) sahip olmasına rağmen Ti-1Al-10Nb malzemesinin nihai basma dayanımının, en yüksek gözenekliliğe (%28) sahip Ti-3Al-5Nb numunesine kıyasla yaklaşık %3 daha düşük olması; gözenek oranındaki sınırlı azalmanın β -faz artışının neden olduğu mukavemet kaybını telafi edemediğini göstermektedir. Gözeneklilik oranlarının birbirine oldukça yakın olmasına karşın mekanik özelliklerde gözlenen bu azalma, esas olarak Nb içeriğinin %5 ve %10 seviyelerine çıkarılmasıyla birlikte α -Ti \rightarrow β -Ti faz dönüşüm sıcaklığının (solvus çizgisinin) düşmesine ve

mikroyapıda β -Ti fazının oluşumunun kolaylaşmasına bağlanabilir [28-30]. Faz dönüşümündeki bu eğilim, maksimum basma dayanımı ve elastik modül değerlerinde gözlenen düşüşü açıklayan temel mikroyapısal mekanizma olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, β -Ti fazının artışı Ti-1Al-10Nb malzemesine kısmi bir süneklik kazandırmış olup bu durum özellikle düşük elastik modül değerlerinde (7.5 GPa ve 6 GPa) daha belirgin biçimde ortaya çıkmaktadır. Benzer eğilimler, düşük elastik modül değerleri sayesinde kemik dokusuna daha iyi mekanik uyum sağlayan Ti–Nb esaslı biyomalzemelerde de rapor edilmiştir [31, 32]. Gökçe (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Ti matrisi içerisindeki Nb oranının %16’dan %26’ya yükseltmesinin sertlik, eğme mukavemeti ve elastik modül gibi temel mekanik özelliklerde belirgin düşüşlere yol açtığı bildirilmiştir [33].

Biyomekanik açıdan değerlendirildiğinde, üretilen saf Ti, Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb numunelerinin elastik modül değerlerinin (6-18 GPa aralığında) kortikal kemiğin mekanik özellikleriyle (yaklaşık 3–30 GPa) uyumlu bir skalada yer aldığı görülmektedir [34]. Bu durum, söz konusu malzemelerin kemik doku ile elastik uyumsuzluktan kaynaklanan gerilim kalkanı (stress shielding) etkisini azaltabilecek nitelikte olduğunu göstermektedir. Özellikle Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb alaşımlarında gözlenen düşük elastik modül değerleri, biyomedikal implant uygulamaları açısından önemli bir avantaj ve potansiyel kullanım üstünlüğü sunmaktadır.



Şekil 5. Malzemelerin gerilim gerinim eğrileri (Hata çubukları standart sapmayı temsil etmektedir)

4 Sonuçlar

Farklı oranlarda Al (1 ve 3 ağ.%) ve Nb (5 ve 10 ağ.%) içeren gözenekli saf Ti, Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb (ağ.%) malzemeler kapsamlı biçimde incelenmiştir. Mikroyapısal karakterizasyon optik mikroskopi, enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) ve X-ışını kırınımı (XRD) analizleri kullanılarak gerçekleştirilmiş; mekanik davranış ise tek eksenli basma testleri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Geleneksel sinterleme yöntemi, gözenekli saf Ti ve Ti–Al–Nb esaslı alaşımların üretiminde uygulanabilir ve etkin bir üretim tekniği olarak belirlenmiştir.
- Üretilen numunelerin toplam gözeneklilik oranları saf Ti, Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb malzemeleri için sırasıyla %27, %28 ve %26 olarak hesaplanmıştır.

- Faz analizleri sonucunda gözenekli saf Ti numunesinde baskın fazın hcp α -Ti olduğu; Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb alaşımlarında ise hcp α -Ti + bcc β -Ti fazlarının birlikte bulunduğu belirlenmiştir. Ti matrisindeki Nb oranının %5'ten %10'a yükselmesiyle birlikte mikroyapıda β -Ti fazının hacimsel oranında artış gözlenmiştir.
- EDS analizlerinde tüm numunelerde yalnızca Ti-K, Al-K ve Nb-L karakteristik pikleri tespit edilmiş, mikroyapıda istenmeyen herhangi bir element sinyaline rastlanmamıştır.
- Alaşım elementi olarak ilave edilen Al ve Nb, özellikle Ti-3Al-5Nb ve Ti-1Al-10Nb bileşimlerinde elastik modül değerlerinin düşmesine katkı sağlayarak kemik dokusu ile mekanik uyumu artırmış ve gerilim kalkanı (stress shielding) etkisinin azaltılması açısından saf Ti'ye kıyasla daha avantajlı bir biyomekanik performans sunmuştur.

Teşekkür

Bu çalışmada sunulan bulguların bir bölümü daha önce IMEAMTC'25 Sempozyumu'nda sözlü bildiri olarak paylaşılmış ve ilgili sempozyumun özet kitabında yayımlanmıştır. Mevcut makale, söz konusu sunumun genişletilmiş ve geliştirilmiş hâlini içermektedir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

- [1] E. M. Karakurt, Y. Huang, M. Kaya, H. Demirtaş, A. Açıkgöz ve G. Demircan, Effect of relative density on microstructure, corrosion resistance and mechanical performance of porous Ti-20Zr alloys fabricated by powder metallurgy. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49 (2), 1479-1489, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07889-4>
- [2] E. Balcı ve F. Dağdelen, Biyomalzeme türleri ve biyouyumlu metalik elementler. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9, 1179-1195, 2022. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.1165914>
- [3] M. Kaya, A. Yolun, Ö. Çakmak, F. Yakuphanoglu, E. Elibol, M. Köm ve M. Güvenç, Biyomedikal uygulamalar için titanyum esaslı gözenekli TiNb alaşımının üretimi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7, 49-59, 2018. <https://doi.org/10.17100/nevbittek.417354>
- [4] E. Balcı, Metalik biyomalzemelerin yaşam döngüsü değerlendirmesi. *Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 7, 59-71, 2023. <https://doi.org/10.47137/usufedbid.1307658>
- [5] E. M. Karakurt, Y. Çetin, A. İncesu, H. Demirtaş, M. Kaya, Y. Yıldızhan ve Y. Huang Microstructural, biomechanical, and in vitro studies of Ti-Nb-Zr alloys fabricated by powder metallurgy. *Materials*, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16124240>
- [6] G. Senesi, G. Barone, S. Pinelli, M. Scoppolini Massini, R. Zinno, D. Alesi ve L. Bragonzoni, The relationship between stress shielding, bone density changes and implant migration, failure and fracture after total knee arthroplasty: A systematic review. *Journal of Experimental Orthopaedics*, 12, e70350, 2025. <https://doi.org/10.1002/jeo2.70350>
- [7] Q. H. Zhang, A. Cossey and J. Tong, Stress shielding in bone of a bone-cement interface. *Medical Engineering & Physics*, 38, 423-426, 2016.
- [8] B. Kaymak ve F. Öztürk, Investigating the influence of machining parameters and tool coatings on surface quality of titanium parts in aerospace industry. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14 (1), 27-35, 2025. <https://doi.org/10.28948/ngmuh.1525630>
- [9] D. Savio ve A. Bagno When the total hip replacement fails: A review on the stress-shielding effect. *Processes*, 10 (3), 612, 2022. <https://doi.org/10.3390/pr10030612>
- [10] Ö. Çakmak, M. Kaya, E. Annaç ve M. Köm İmplantasyon uygulamaları için toz metalurjisi ile üretilen Ti-16Nb-4Sn alaşımının mikroyapı ve biyouyumluluk özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 8 (1), 29-40, 2022. <https://doi.org/10.30855/gmbd.2022.01.03>
- [11] E. M. Karakurt Effect of space holder agent on microstructural and mechanical properties of commercially pure titanium. *Materials Testing*, 67 (7), 1168-1174, 2025. <https://doi.org/10.1515/mt-2025-0021>
- [12] A. M. Abraham ve S. Venkatesan A critical review on biomaterials using powder metallurgy method. *Engineering Research Express*, 6 (1), 012508, 2024. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad35a6>
- [13] C. M. Murphy, M. G. Haugh ve F. J. O'Brien The effect of mean pore size on cell attachment, proliferation and migration in collagen-glycosaminoglycan scaffolds for bone tissue engineering. *Biomaterials*, 31 (3), 461-466, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.09.063>
- [14] L. J. Guo Preparation of porous Ti35Nb alloy and its mechanical properties under monotonic and cyclic loading. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20, 390-394, 2010. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60151-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60151-5)
- [15] M. Topuz ve B. Dikici, In-vitro corrosion performance of hydroxyapatite-coated Al2024 in simulated body fluid: A comparative study. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12 (3), 926-934, 2023. <https://doi.org/10.28948/ngmuh.1263697>
- [16] R. P. Verma, Titanium based biomaterial for bone implants: A mini review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 3148-3151, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.649>
- [17] E. M. Karakurt, H. Yan, M. Kaya, H. Demirtaş ve Ö. Çakmak Effect of Zr concentration on the microstructure and mechanical performance of porous Ti-Zr system by powder metallurgy. *Key Engineering Materials*, 936, 25-31, 2022. <https://doi.org/10.4028/p-db512a>

- [18] B. Y. Li, L. J. Rong, Y. Y. Li ve V. E. Gjunter Synthesis of porous Ni–Ti shape-memory alloys by self-propagating high-temperature synthesis: reaction mechanism and anisotropy in pore structure. *Acta Materialia*, 48 (15), 3895-3904, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00184-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00184-1)
- [19] A. A. Azeez, Y. Danyuo ve J. D. Obayemi, Effect of particle size and sintering time on the mechanical properties of porous Ti–6Al–4V implant. *SN Applied Sciences*, 2, 819, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2637-z>
- [20] S. H. Kayani, H. M. S. Ajmal, B. J. Kim, N. K. Park ve K. Euh, Influence of Powder Size on Pore Characteristics and Intermetallic Phase Kinetics in Porous Ti-Al Alloys. *Crystals*, 14, 559, 2024. <https://doi.org/10.3390/cryst14060559>
- [21] Y. T. Yao, Y. Yang, Q. Ye, S. S. Cao, X. P. Zhang, K. Zhao ve Y. Jian, Effects of pore size and porosity on cytocompatibility and osteogenic differentiation of porous titanium. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 32, 72, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10856-021-06548-0>
- [22] E. M. Karakurt, Y. Huang, Y. Çetin, A. İncesu, H. Demirtaş, M. Kaya ve G. Akbaş Assessing microstructural, biomechanical, and biocompatible properties of TiNb alloys for potential use as load-bearing implants. *Journal of Functional Biomaterials*, 15 (9), 253, 2024. <https://doi.org/10.3390/jfb15090253>
- [23] R. Wang, S. Ni, L. Ma ve M. Li, Porous construction and surface modification of titanium-based materials for osteogenesis: A review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 973297, 2022. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.973297>
- [24] C. Y. Hung, S. Antonov, P. D. Jablonski ve M. Detrois, Phase stability and phase transformation related to Nb/Ta additions in a Ni-based superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 952, 170071, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170071>
- [25] J. Wang, L. Liu, L. Zhang, B. Tuo, W. Bai ve D. Wu, Experimental investigation of the Ti-Nb-Sn isothermal section at 1173 K. *Metals*, 6, 60, 2016. <https://doi.org/10.3390/met6030060>
- [26] W. F. Ho, W. K. Chen, S. C. Wu ve H. C. Hsu, Structure, mechanical properties, and grindability of dental Ti–Zr alloys. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 19, 3179–3186, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10856-008-3454-x>
- [27] Q. M. Hu, S. J. Li, Y. L. Hao, R. Yang, B. Johansson ve L. Vitos, Phase stability and elastic modulus of Ti alloys containing Nb, Zr, and/or Sn from first-principles calculations. *Applied Physics Letters*, 93, 121902, 2008. <https://doi.org/10.1063/1.2988270>
- [28] L. J. Gibson, Mechanical behavior of metallic foams. *Annual Review of Materials Research*, 30, 191, 2000.
- [29] H. Chang, J. F. Liu, Y. S. Sun, C. P. Wu, H. H. Huang ve Y. Han, Mesoporous surface topography promotes bone cell differentiation on low elastic modulus Ti–25Nb–25Zr alloys for bone implant applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 707, 220–226, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.206>
- [30] Q. Liu, Q. Meng, S. Guo ve X. Zhao, α' type Ti–Nb–Zr alloys with ultra-low Young's modulus and high strength. *Progress in Natural Science: Materials International*, 23, 562–565, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2013.11.005>
- [31] E. Ö. Dengiz ve M. Gürbüz, Grafen takviyeli magnezyum kompozitlerin biyomedikal amaçlı üretimi ve biyouyumluluk çalışmaları. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15, 1–9, 2026. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1793201>
- [32] W. Elmay, E. Patoor, B. Bolle, T. Gloriant, F. Prima, A. Eberhardt ve P. Laheurte, Optimisation of mechanical properties of Ti–Nb binary alloys for biomedical applications. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 14, 119–120, 2011. <https://doi.org/10.1080/10255842.2011.593760>
- [33] A. Gökçe, Effect of Nb addition on microstructural and mechanical properties of Ti-Nb based alloys produced by powder metallurgy. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23 (8), 945–948, 2017. <https://doi.org/10.5505/pajes.2017.26539>
- [34] M. R. Senra ve M. D. F. V. Marques, Synthetic polymeric materials for bone replacement. *Journal of Composites Science*, 4 (4), 191, 2020. <https://doi.org/10.3390/jcs4040191>

