

Manufacturing Technologies and Applications

MATECA



Ultra High Frequency Induction System Sintering of Nano Boron Nitride Reinforced Powder Aluminum

Hıdır Sercan Çubuk^{1,*}, Alper Mutlu², Uğur Çavdar³

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı, İzmir, Türkiye, hsercancubuk@gmail.com

²Dokuz Eylül Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik Otomasyon Biyomedikal Cihaz Teknolojisi Alanı, İzmir, Türkiye, alper.mutlu@deu.edu.tr

³İzmir Demokrasi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, ugur.cavdar@idu.edu.tr

ABSTRACT

In the study, powder sintering of Nano Boron Nitride reinforced Aluminum powders was applied with a 2.8 kW power, 900 kHz Ultra High Frequency Induction System. Nano Boron Nitride reinforced aluminum matrix powder compositions were compressed by a cold press in a uniaxial single-acting mold under 20 bar pressure, afterwards sintered with the given parameters. Five different compositions which are 0.1 wt.%, 0.5 wt.%, 1 wt.%, 2 wt.% and 5 wt.% Nano Boron Nitride reinforced aluminum composites were processed. In order to sinter these 5 different compositions, temperatures of 600°C, 650°C and 700°C were determined. These optimizations were carried out separately by subjecting them to Induction Sintering for 3, 5 and 10 minutes. The resulting samples are approximately 16.00 mm in diameter and 4.75 mm in height with a coin-like structure. After the production of 45 samples determined by temperature, time and additive ratio; hardness, density, energy efficiency and SEM results of these samples were compared among themselves and the effects of Nano Boron Nitride reinforcement on Induction Sintering were revealed.

Keywords: Aluminum, Nano boron nitride, Induction sintering, Penetration depth, Powder metallurgy

Nano Bor Nitrür Takviyeli Alüminyum Tozlarının Ultra Yüksek Frekanslı İndüksiyon Sistemi ile Sinterlenmesi

ÖZET

Yapılan çalışmada, Nano Bor Nitrür takviyeli Alüminyum tozlarına; 2.8 kW güç ve 900 kHz'lik Ultra Yüksek Frekanslı İndüksiyon Sistemi'yle toz sinterlenmesi işlemi yapılmıştır. Nano Bor Nitrür katkılı alüminyum matrisli toz kompozisyonları; 20 bar basınç altında tek eksenli tek tesirli bir kalıp içerisinde soğuk pres ile sıkıştırılmış, ardından belirlenen parametreler ile sinterlenmiştir. %0.1, %0.5, %1, %2 ve %5 Nano Bor Nitrür takviyeli alüminyum kompozitleri olmak üzere 5 farklı kompozisyonda işlem yapılmıştır. Bu 5 farklı kompozisyonun sinterleme sıcaklığı olarak 600°C, 650°C ve 700°C sıcaklık belirlenmiştir. Bu optimizasyonlar ayrı ayrı olmak üzere 3, 5 ve 10 dakika İndüksiyon Sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Oluşan numuneler, yaklaşık olarak 16.00 mm çapında ve 4.75 mm yüksekliğinde bozuk para benzeri yapıdadır. Sıcaklık, süre ve katkı oranı ile belirlenen 45 adet numunenin üretiminin ardından; bu numunelerin sertlik, yoğunluk, enerji verim ve SEM sonuçları kendi arasında karşılaştırılmış, Ultra Yüksek Frekanslı sinterlemenin Nano Bor Nitrür takviyeli Alüminyum malzeme üzerine etkileri araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, Nano bor nitrür, İndüksiyon sinterleme, Penetrasyon derinliği, Toz metalurjisi

1. GİRİŞ

Alüminyum (Al) hafif ve kolay şekil verilebilen, diğer metallere kıyasla mukavemet özellikleri düşük bir elementtir. Bu element ulaşımından inşaat sektörüne kadar mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yüzden Al'a mukavemet ve mekanik iyileştirilmeler yapılması ile alakalı birçok çalışma bulunmaktadır [1-4]. Al'a yapılan iyileştirmelerde sıklıkla seramik takviyelerden yararlanılır. Bu takviyeler, seramik malzemelerin mekanik, termal ve kimyasal özelliklerini alüminyum matrisine transfer ederek malzemenin özelliklerini geliştirmektedir. Çünkü seramik takviyeler; yüksek sertlik ve mukavemet, düşük yoğunluk, uzun süreli sıcaklık dayanımı, iyi aşınma ve korozyon direnci gibi birçok avantaj sağlar. Bunun yanı sıra bu takviyeyi fiziksel ve kimyasal olarak daha etkili sonuçlar verdiği bilinen 'nano' boyutta yapmak; yeni ve gelişmeye açık çalışmaların da önünü açabilmektedir [5-11].

Nano Bor Nitrür (NBN), matris elementine iyi bağlanma özellikleri gösterebilen nano boyutta bir seramik türüdür. Bu malzeme yarı iletkenidir. Oksidasyona karşı direnci olup, mekanik ve termal özellikleri ile dikkat

*Corresponding author, e-mail: hsercancubuk@gmail.com

çekmekte ve toz metalürji (TM) tekniklerinde kullanılabilmektedir. Malzemenin nano boyutta taneciklere sahip olması özelliklerini geliştirmiştir [12,13]. NBN, alüminyum matrisle kompozit oluşturulduğunda oluşan yapı iyi mekanik ve termal iletkenlik sağlayabilmektedir [13,14].

Bu ve buna benzer kompozit malzemeler üretilirken indüksiyon sinterleme tekniğinin kullanıldığı görülmüştür. İndüksiyonla sinterlemede, indüksiyon bobinleri yüksek frekanslı elektromanyetik alan üreterek malzemelere ısı işlem uygular ve nihai parça elde edilir [15-17]. Bu yöntem, kısa süreli yüksek sıcaklık oluşturmaya hızlı ve etkili bir sinterleme süreci sağlamaktadır. İşlem; homojen ısıtma, düşük enerji tüketimi, kontrol edilebilir ısıtma hızı ve daha kısa işlem süreleri gibi avantajlar sağlar. Ek olarak, indüksiyon sinterleme yöntemi, özellikle yüksek sıcaklıklarda hızlı sinterleme gerektiren durumlar için kullanılır [18,19].

Bu çalışmada; Saf Al tozuna, ağırlıkça %0.1, %0.5, %1, %2 ve %5 NBN katkısı eklenerek Ultra Yüksek Frekanslı İndüksiyon Sistemi (UYFIS) ile sinterlemesi sağlanmıştır. Sinterleme yoluyla elde edilen numunelerin sertlik, SEM, yoğunluk ve elektrik kullanımı sonuçları kendi arasında karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Deney Düzenegi

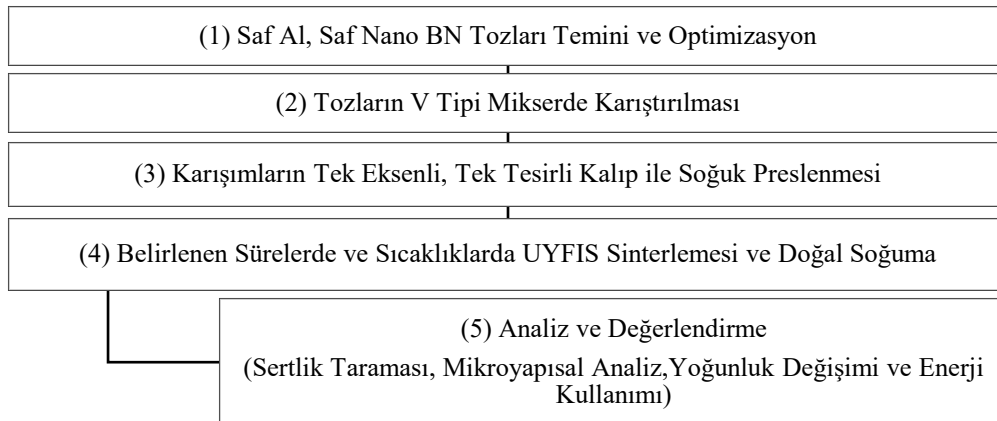
Çalışmada malzeme olarak Saf Al ile NBN tozları kullanılmıştır. Kullanılan Al tozları %98.50-98.85 saflığa sahip 15 mikron boyutunda küresel ve pul görünümüne sahip tozlardır. Tozun yoğunluğu 1.25 gr/cm^3 – 1.45 gr/cm^3 arasında değişmektedir (Nanokar, İstanbul). Takviye elemanı olarak ise NBN kullanılmıştır. Bu malzemenin saflığı %99.8 ve boyutu 65-75 nm'dur. Yapısı Hegzagonal (h-BN) 'dir. Gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilmiştir (Nanografi, Ankara). NBN'ün diğer özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. NBN özellikleri.

Nano Bor Nitrür (NBN) Parametreleri	Değeri	Birimi
Gerçek Yoğunluk	2.3	g/cm^3
Moleküler Ağırlık	24.82	g
Kristalite	Hegzagonal	-
Termal İletkenlik	29 ila 60	W/m
Termal Genleşme	0.54 ila 18	$\mu\text{m/m}$
Gencin Modülü	14 ila 60	GPa
Tam Kütle	25.0124	g
Monoizotropik Kütle	25.012	g

2.2. Deney Yöntemi

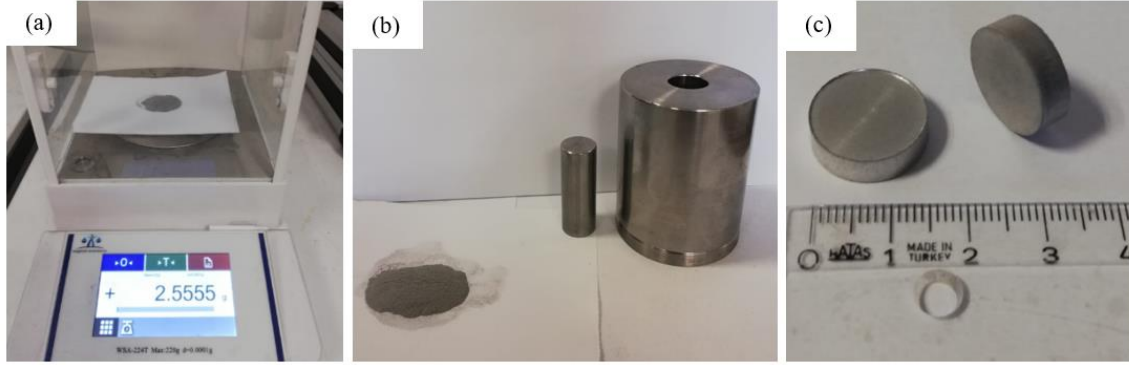
Bu çalışmada üretim; TM yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de numunelerin üretim yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 1. Saf Al matrisli, NBN katkılı kompozitlerin üretim aşamaları.

Çalışma; yüzde katkı, sıcaklık ve süre optimizasyonu ile başlamıştır. Yüzde katkı için Al'a eklenen NBN katkı oranları %0.1, %0.5, %1, %2 ve %5 olarak belirlenmiştir. Bu 5 farklı NBN katkılı Al matrisli toz kompozitlerinin oluşması için İzmir Demokrasi Üniversitesi Laboratuvarında bulunan Weightlab Instruments marka WSA-224T model 0.0001 g hassasiyetli elektronik terazi kullanılmıştır. Hazırlanan tozlar, sızdırmaz V-Tipi bir karıştırıcıda 1 saat boyunca 40 devir/dakika olacak şekilde homojen olarak karıştırılmıştır.

Ardından sıcaklık optimizasyonu için 600°C, 650°C ve 700°C sıcaklıklar belirlenmiştir. Her sıcaklık için 5 farklı katkı oranına sahip Al matrisli NBN tozları hazırlanmıştır. Farklı sıcaklıklardaki sinterleme için hazırlanan bu 15 farklı toz karışımının süre optimizasyonu belirlenmiştir. Ayrı ayrı 3, 5 ve 10 dakika bekleme süreleriyle toplam 45 adet toz karışımı hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan bu karışımlar ortalama 2.5 gramdır. Al matrisli NBN toz karışımlarının sıkıştırılması için tek eksenli tek tesirli kalıp kullanılmıştır. Sıkıştırma, 20 bar basınç altında Hidropir marka pres kullanılarak yapılmıştır. Kullanılacak kalıp ise alaşımlı sertleştirilmiş çelik silindirdir. Kalıbın dış çapı 56 mm, yüksekliği 61 mm'dir. İçeriye giren zımbanın dış çapı 16 mm'dir. Sıkıştırma sonrası oluşan numune 16 mm çap ($\pm 2\%$) ve 4.96 ($\pm 2\%$) kalınlığa sahiptir. Şekil 2'de (a) karıştırılmış ve tartılmış Al matrisli NBN toz kompoziti (2.55gr ($\pm 2\%$)), (b) karıştırılan tozun kalıp içine doldurulması, (c) pres sonrası elde edilen ham malzeme gösterilmektedir.

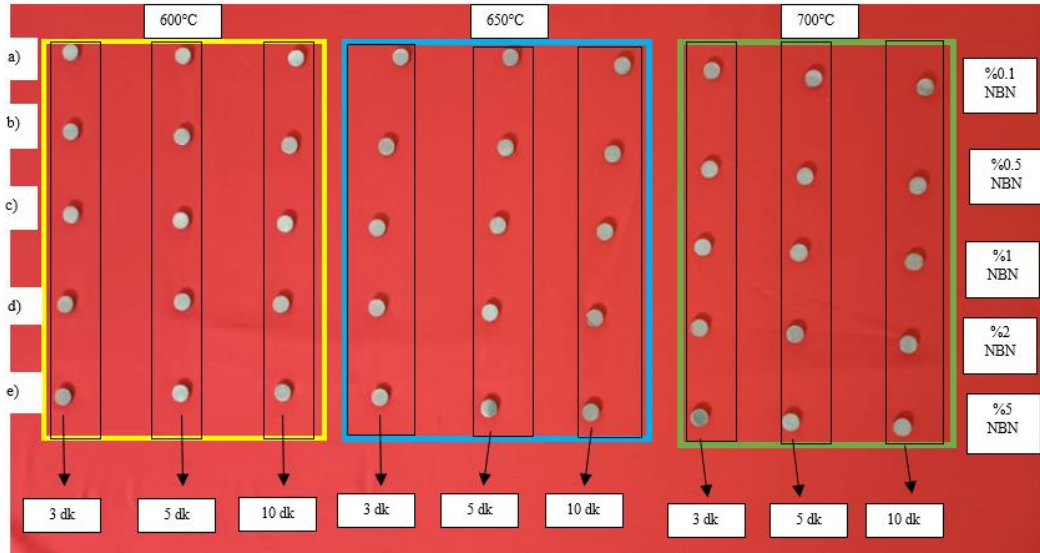


Şekil 2. a) %0.5 NBN katkılı Al tozu (2.55gr ($\pm 1\%$)), b) karıştırılan tozun kalıp içine doldurulması, c) pres sonrası elde edilen ham numune paketi.

Elde edilen 45 adet ham silindir paketleri, belirlenen sıcaklık ve sürelerde UYFIS kullanılarak sinterlenmiştir. İndüksiyon cihazı 2.8 kW güç, 900 kHz'lik Ultra Yüksek Frekanslı İndüksiyon cihazıdır. Işıma hızı ~20 0C/s'dir. Cihazın indüksiyon bobini tek sarımlıdır. Bobinin dış çapı 26 mm, et kalınlığı 0.5 mm'dir. Sinterlemeden sonra doğal soğumaya bırakılan numunelerin yüzeyleri, mekanik ve mikroyapısal analizin yapılabilmesi için Metkon Forcipol 202 marka cihazla 100'den 2500 kuma kadar SiC zımparası ile zımparalanmış ardından 6µ ve 1µ elmas süspansiyon çuha ile parlatılmıştır. Şekil 3' de 600°C, 5 dk'da %1 NBN katkılı Al kompozitinin (8 numaralı numune) UYFIS ile sinterlemesi verilmiştir. Şekil 4'te ise UYFIS Sinterlemesi sonrası hazır hale getirilmiş tüm numuneler gösterilmektedir. Harflendirilen her satır farklı NBN katkı oranına sahip numuneleri sunmaktadır.



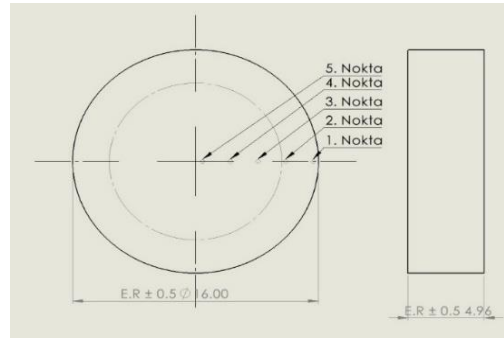
Şekil 3. 600°C 5 dk'da %1 NBN katkılı Al kompozitinin (8) UYFIS sinterlemesi işlemi.



Şekil 4. Özellikleri ile birlikte 45 adet numune.

2.3. Analiz

NBN taktiyeli Saf Al kompozitlerin sertlik deneyleri, Metkon Duroline-LV Vickers Hardness Tester (HV) sertlik ölçme cihazında ASTM E92 standardına uygun olarak 10 saniye süre ve 3 kgf yükte gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri numunenin dıştan içeri doğru 5 farklı noktasından yapılmıştır. Her noktada ise 5 kez ölçüm yapılmıştır. Bu anlamda; her noktada kabul edilen sertlik değeri, o noktadan alınan 5 sertlik değerinin ortalamasıdır. Bu da hata payını (Error Range: E.R.) en aza indirmiştir. Her bir kompozisyon için malzemenin yüzeyinde belirlenen noktalardan sertlik taraması 45 numunenin tamamında gerçekleştirilmiştir. Sertlik taraması penetrasyon derinliğinden (ısıtılma bölgesi), yani malzemenin en dışından 2 nokta (1.ve 2.nokta), ardından malzemenin merkezine doğru sırasıyla 3 noktadan (3,4 ve 5.nokta) alınmasıyla yapılmıştır. Numunenin 1.noktası çapı, 5. noktası merkezidir. Ayrıca analizlerdeki E.R. gösterilmektedir. Şekil 5'te numune üzerinden ölçülen sertlik noktalarının şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 5. Numune üzerinden ölçülen sertlik noktalarının şematik gösterilmiş hali.

Numunelerden SEM görüntüleri alınmadan önce %1 hidroflüorik asit; %1.5 klorhidrik asit; %2.5 nitrik asit ve %95 saf su içeriğine sahip Keller sıvısıyla 4 saniye boyunca dağlanmıştır. Ardından mikro yapı analizleri SEM ile incelenmiştir. SEM incelemeleri İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Araştırma Merkezi Laboratuvarı'nda bulunan FEI marka QUANTA FEG 250 model cihaz ile yapılmıştır.

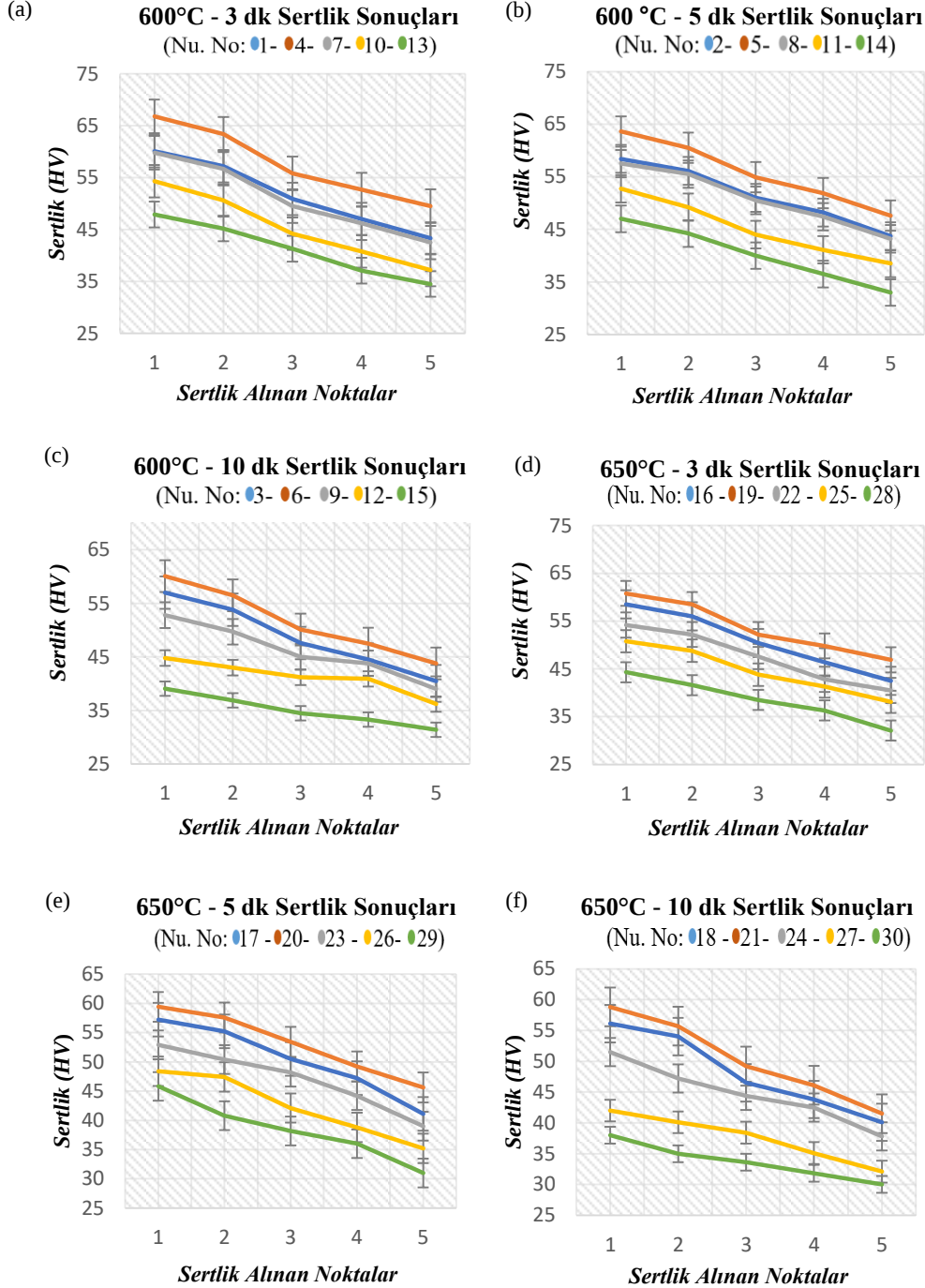
%0.1, %0.5, %1, %2 ve %5 NBN takviyeli Saf Al kompozitlerin deneysel yoğunlukları ASTM B962-17 standardına uygun olarak Arşimet Prensibine göre yapılmıştır. Öncelikle, 0.0001 gr hassasiyete sahip dijital terazi yardımıyla kompozitlerin ağırlıkları (m_A) ölçülmüştür. Ardından su içerisinde bekletilen kompozitlerin suya doymuş ağırlıkları (m_D) ölçülmüştür. Sonrasında 40°C sıcaklıkta etüv fırını içerisinde kurutulan kompozitlerin kuru ağırlıkları (m_K) dijital terazi ile belirlenmiş ve deneysel yoğunluklar hesaplanmıştır.

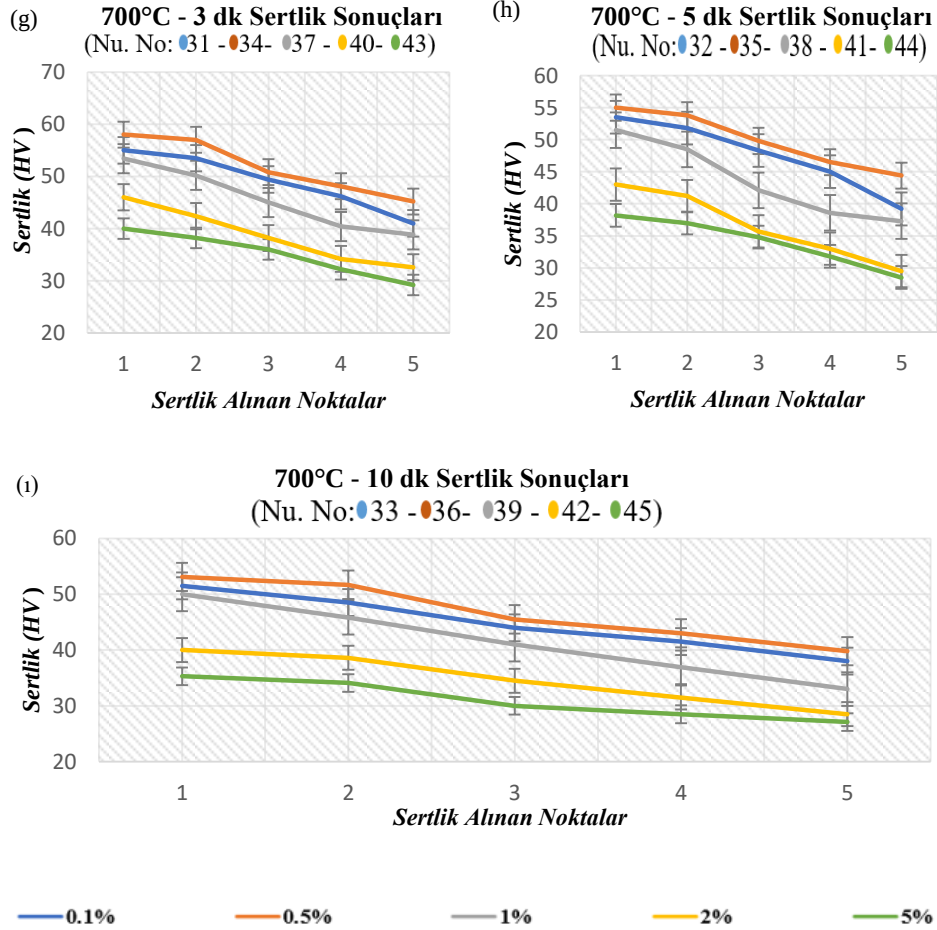
Çalışmada UYFIS sinterlerlemesi yapılırken enerji verileri kaydedilmiştir. Buna göre her bir numunenin indüksiyon sinterlemesi sırasında harcadıkları enerji kWh cinsinden yazılmıştır. Elektrik maliyetinin hesaplanması amacıyla güç kalite analizörü kullanılmıştır.

3. DENEY VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI

3.1. Sertlik Bulguları

600°C, 650°C ve 700°C’de yapılan; %0.1, %0.5, %1, %2 ve %5 NBN takviyeli Saf Al kompozitlerinin UYFIS sinterlemesi sonucu sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik alınan noktalar dış çaptan merkeze doğru sırasıyla 1,2,3,4 ve 5. noktayı göstermektedir. En yüksek sertlik tüm numunelerde 1. noktada (çap) ; en düşük sertlik ise 5.noktada (merkez) görülmektedir. Numunelerdeki E.R.± %2.28 olarak belirlenmiştir. HV cinsinden yapılan ölçüm sonuçları Şekil 6’da verilmektedir.

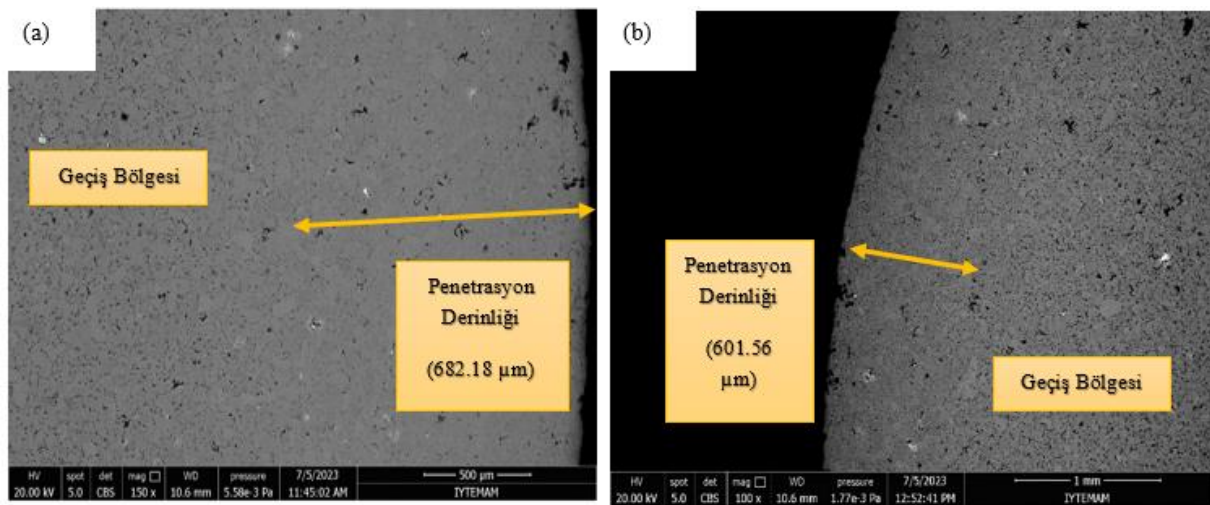




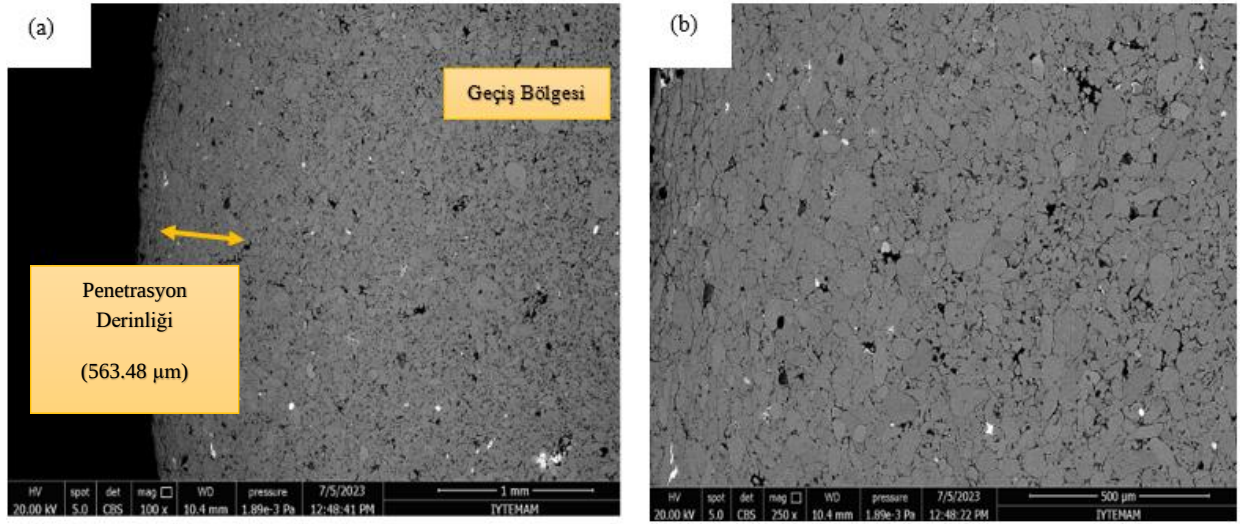
Şekil 6. 600°C'de a) 3 dakika (1-4-7-10-13), b) 5 dakika (2-5-8-11-14), c) 10 dakika (3-6-9-12-15); 650°C d) 3 dakika (16-19-22-25-28), e) 5 dakika (17-20-23-26-29), f) 10 dakika (18-21-24-27-30) ve 700°C'de g) 3 dakika (31-34-37-40-43), h) 5 dakika (32-35-38-41-44), i) 10 dakikadaki (33-36-39-42-45) HV sertlik sonuçları.

3.2. SEM Bulguları

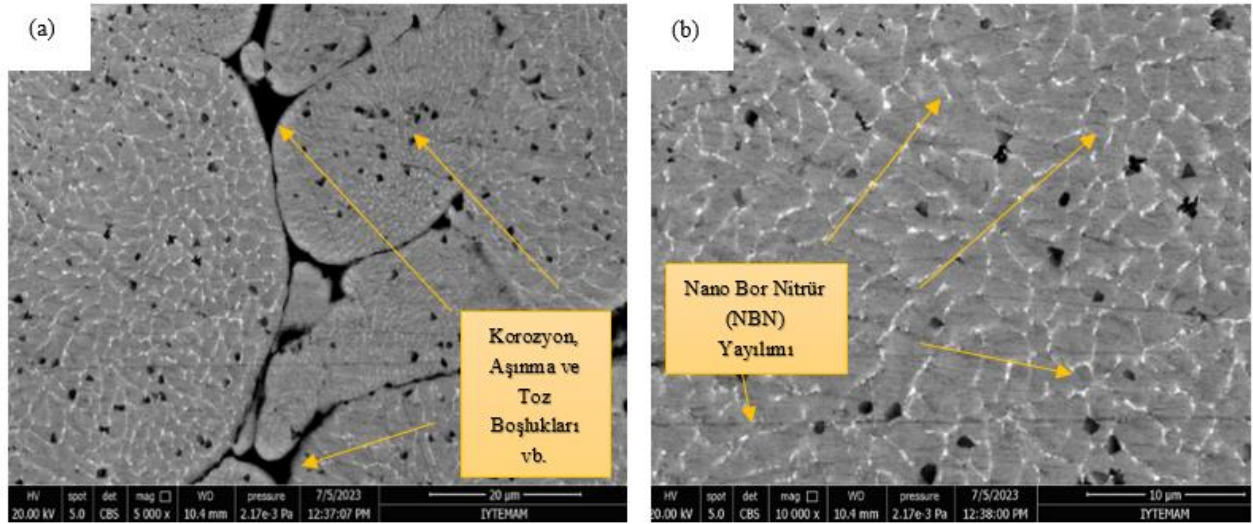
Keller sıvısı ile dağlanan numuneler SEM yardımıyla incelenmiştir. Numuneler 10x – 1000x arası değerlerde büyütülmüştür. Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da bazı numunelere dair SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 7. a) 600°C - 3 dk- %0.5 NBN katkılı indüksiyon ile sinterlenmiş numunenin (4) penetrasyon derinliğinden alınmış 500 µm boyutunda SEM görüntüsü, b) 600°C - 3 dk- %1 NBN katkılı indüksiyon ile sinterlenmiş numunenin (7) penetrasyon derinliğinden alınmış 1 mm boyutunda SEM görüntüsü.



Şekil 8. 650°C - 10 dk- %2 NBN katkılı indüksiyon ile sinterlenmiş numuneden (27) a) penetrasyon derinliğinden 1 mm ölçeğinde ve b) merkezinden 500 µm ölçeğinde alınmış SEM görüntüsü.



Şekil 9. 700°C- 3 dk- %1 NBN katkılı indüksiyon ile sinterlenmiş numuneden (37) alınmış NBN takviyesinin, Al malzeme matrisindeki penetrasyon bölgesinde iyi yayıldığını gösteren (a) 20 µm, (b) 10 µm'den SEM görüntüsü.

3.3.Yoğunluk Bulguları

600°C, 650°C ve 700°C’de yapılan;%0.1, %0.5, %1, %2 ve %5 NBN takviyeli Saf Al kompozitlerinin UYFIS sinterlemesi sonucu yoğunluk deneyleri yapılmıştır. Hata payı ortalama E.R. ± 0.254 olarak Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. NBN katkılı Al numumelerinin yoğunluk sonuçları.

Num. No	Sıcaklık (°C)	Saf Al’a Eklenen NBN Katkı Oranı (%)	Süre (dakika)	Ham Yoğunluk (g/cm ³)	Sinterleme Sonrası Yoğunluk (g/cm ³)	Yüzdece Değişim (%-g/cm ³)
1	600°C	0.1	3	2.561	2.586	0.976
2	600°C	0.1	5	2.551	2.575	0.940
3	600°C	0.1	10	2.585	2.604	0.735
4	600°C	0.5	3	2.575	2.608	1.281
5	600°C	0.5	5	2.554	2.584	1.174
6	600°C	0.5	10	2.56	2.589	1.132
7	600°C	1	3	2.575	2.608	1.281
8	600°C	1	5	2.568	2.600	1.246
9	600°C	1	10	2.584	2.614	1.160

10	600°C	2	3	2.555	2.579	0.939
11	600°C	2	5	2.594	2.617	0.886
12	600°C	2	10	2.584	2.601	0.657
13	600°C	5	3	2.531	2.568	1.145
14	600°C	5	5	2.562	2.589	1.053
15	600°C	5	10	2.561	2.583	0.859
16	650°C	0.1	3	2.561	2.605	1.718
17	650°C	0.1	5	2.564	2.601	1.443
18	650°C	0.1	10	2.574	2.591	0.660
19	650°C	0.5	3	2.588	2.624	1.391
20	650°C	0.5	5	2.575	2.608	1.281
21	600°C	0.5	10	2.584	2.614	1.160
22	650°C	1	3	2.558	2.599	1.602
23	650°C	1	5	2.579	2.614	1.357
24	650°C	1	10	2.575	2.608	1.281
25	650°C	2	3	2.594	2.627	1.272
26	650°C	2	5	2.584	2.621	1.431
27	650°C	2	10	2.573	2.619	1.787
28	650°C	5	3	2.561	2.598	1.444
29	650°C	5	5	2.561	2.593	1.249
30	650°C	5	10	2.552	2.581	1.136
31	700°C	0.1	3	2.547	2.577	1.177
32	700°C	0.1	5	2.594	2.622	1.079
33	700°C	0.1	10	2.589	2.615	1.004
34	700°C	0.5	3	2.58	2.619	1.511
35	700°C	0.5	5	2.564	2.598	1.326
36	700°C	0.5	10	2.555	2.579	0.939
37	700°C	1	3	2.573	2.609	1.399
38	700°C	1	5	2.601	2.634	1.268
39	700°C	1	10	2.579	2.594	0.581
40	700°C	2	3	2.572	2.607	1.360
41	700°C	2	5	2.594	2.627	1.272
42	700°C	2	10	2.584	2.601	0.657
43	700°C	5	3	2.597	2.625	1.078
44	700°C	5	5	2.538	2.559	0.827
45	700°C	5	10	2.555	2.575	0.782

3.4. Enerji Verim Bulguları

Çalışmanın her aşamasında enerji kullanım verileri kaydedilmiştir. Buna göre her bir numunenin indüksiyon sinterlemesi sırasında harcadıkları enerji verileri bulunmuştur. Elektrik maliyetinin hesaplanması amacıyla güç kalite analizörü kullanılmıştır. Ortalama E.R. $\% \pm 4$ 'dür. 600°C, 650°C ve 700°C'de yapılan; %0,1, %0,5, %1, %2 ve %5 NBN takviyeli Saf Al kompozitlerinin UYFIS sinterlemesi sonucu oluşan elektrik verim sonuçları kWh cinsinden Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. NBN katkılı Al numumelerinin elektrik verim sonuçları.

Num. No	Sıcaklık (°C)	Saf Al'a NBN Katkı Oranı (%)	Süre (dakika)	Enerji Sonuçları (kWh)
1	600°C	0.1	3	361
2	600°C	0.1	5	506
3	600°C	0.1	10	1086
4	600°C	0.5	3	358
5	600°C	0.5	5	510.3
6	600°C	0.5	10	1090
7	600°C	1	3	363
8	600°C	1	5	503.7
9	600°C	1	10	1088
10	600°C	2	3	357
11	600°C	2	5	509
12	600°C	2	10	1091
13	600°C	5	3	354

14	600°C	5	5	508
15	600°C	5	10	1092
16	650°C	0.1	3	292
17	650°C	0.1	5	662
18	650°C	0.1	10	1270
19	650°C	0.5	3	300
20	650°C	0.5	5	670
21	600°C	0.5	10	1280
22	650°C	1	3	288
23	650°C	1	5	660
24	650°C	1	10	1267
25	650°C	2	3	282
26	650°C	2	5	670
27	650°C	2	10	1276
28	650°C	5	3	279
29	650°C	5	5	667
30	650°C	5	10	1278
31	700°C	0.1	3	419
32	700°C	0.1	5	718.7
33	700°C	0.1	10	1448
34	700°C	0.5	3	423
35	700°C	0.5	5	722.7
36	700°C	0.5	10	1460
37	700°C	1	3	430
38	700°C	1	5	730
39	700°C	1	10	1502
40	700°C	2	3	445
41	700°C	2	5	742.2
42	700°C	2	10	1592
43	700°C	5	3	452
44	700°C	5	5	792.3
45	700°C	5	10	1623.3

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada %98.85 saflığa sahip alüminyum tozuna; farklı sıcaklıkta ve sürelerde, yüzdece %0.1, %0.2, %0.5, %1 ve %5 NBN eklenerek UYFIS sinterlemesi yapılmıştır. Sinterlemeden elde edilen sertlik, SEM, yoğunluk ve elektrik verim sonuçları aşağıda verilmektedir;

- Al esaslı toz metal kompozitler için en yüksek sertlik değeri 66.1 HV ile 600°C, 3 dakika ve %0.5 NBN katkılı 4 numaralı numunede bulunmaktadır.
- En düşük sertlik 700°C'de 10 dakika sinterlenen %5 NBN katkılı 45 numaralı numunede 27.1 HV olarak ölçülmüştür.
- İndüksiyonla sinterlenen Al matrisli toz metal numunelerde, katkı oranı arttıkça penetrasyon derinliğinde azalma görülmektedir. İncelenen SEM görüntülerinde; %0.5 katkı oranına sahip 4 numaralı numunede ortalama 682.18 µm uzunluğunda penetrasyon derinliği ölçülürken, %2 NBN katkılı 7 numaralı numunede ortalama uzunluğu 563.48 µm penetrasyon derinliği ölçülmüştür. Bu da “katkı oranının penetrasyon derinliğiyle doğrudan ilişkili olduğu” sonucunu vermektedir.
- Penetrasyon bölgesindeki tane yapıları diğer bölgelere göre iri ve büyüktür.
- Üretilen tüm kompozitlerde yüksek sertlik için en uygun NBN katkı oranı %0.5 ve 3 dakika indüksiyon sinterleme süresi olarak bulunmaktadır.
- SEM görüntülerinde ağırlıkça %0.1, %0.5 ve %1 NBN takviyesinin, malzeme matrisindeki penetrasyon bölgesinde iyi yayıldığı görülmüş ve bunun sonucunda malzemenin mukavemetinin arttığı anlaşılmıştır.
- Sertlik değerinin %0.5 NBN takviyesine kadar arttığı görülmektedir. Bu katkı oranı, kompozit için sertlik değerindeki tepe noktadır. %0.5 NBN katkısından sonra katkı oranı arttıkça sertlik azalmıştır.
- Aynı kimyasal kompozisyona sahip malzemelerde sıcaklık veya sinterleme süresi arttıkça sertliğin düştüğü saptanmıştır.
- İndüksiyonla sinterleme sonrası tüm numunelerde yoğunluk artmaktadır. İndüksiyon süresi arttıkça yüzdece yoğunluk değişimi azalmaktadır. En yüksek yüzdece yoğunluk değişimi %1.787g/cm³ ile 27

numaralı numunede, en düşük yüzdede yoğunluk değişimi ise 0.581 g/cm^3 ile 39 numaralı numunede görülmektedir.

- En düşük elektrik enerjisi kullanımı 279 kWh ile 28 numaralı numunede, en yüksek elektrik enerjisi kullanımı ise 1623.3 kWh ile 45 numaralı numunede gerçekleşmiştir.

Bu çalışmasının devamında aşağıda belirtilen çalışmaların yapılması önerilmektedir.

- NBN katkılı Saf Alüminyum kompozitlerin üretilebilirliği bakımından %0.1 ila %0.5 NBN katkı aralığı ile (%0.2; %0.3; %0.4) ; %0.5 ila %1 NBN katkı aralığında (%0.6; %0.7; %0.8; %0.9) farklı kompozit alaşımlar oluşturularak mekanik özelliklere etkisi araştırılabilir. Bu durum sıcaklık optimizasyonunun netleşmesinde de önemli parametreler sağlayabilir.

- Üretilen kompozitlere sıcak pres yoluyla indüksiyon sinterleme yapılarak mekanik özelliklere etkisi araştırılabilir. Bu durum mekanik özelliklerin, malzemenin her yerine homojen bir şekilde yayılmasını sağlayabilir mi sorusunun cevabını verebilir.

- Kompozitlerin preste sıkıştırılması sağlanırken uygulanan basınç için bir optimizasyon yapılarak mekanik özelliklere etkileri incelenebilir.

- Matris malzemesine, ısı iletkenliği daha yüksek olan bakır ve çelik gibi başka metal malzemeler eklenip hibrit kompozit üretimi yapılarak mekanik özelliklere etkisi araştırılabilir.

- Üretilen kompozitlerin işlenebilirlik, aşınma ve korozyon özellikleri saptanabilir.

- İndüksiyon Sinterleme esnasında oluşan penetrasyon derinliğinin malzemelere ve katkı oranına bağlı matematiksel modellemesi çıkarılabilir.

- Yapılan bu çalışmayla ilgili mühendislik disiplinleriyle alakalı bir optimizasyon çalışması yapılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 2023 yılında İzmir Demokrasi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Prof. Dr. Uğur Çavdar danışmanlığında Hıdır Sercan Çubuk tarafından gerçekleştirilen 'Nano Bor Nitrür Takviyeli Alüminyum Tozlarının Ultra Yüksek Frekanslı İndüksiyon Sistemi ile Sinterlenmesi' başlıklı Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir. Çalışma, TÜBİTAK BİDEB 2210-C Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı (Proje No: 1649B022215401) kapsamında desteklenmiş olup, araştırmanın kapsamının genişlemesine sağladığı katkılardan dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] M. Sekmen, M. Günay, U. Şeker, Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde kesme hızı ve talaş açısının yüzey pürüzlülüğü, yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşumu üzerine etkisi, Politeknik Dergisi, 18(3) (2015) 141-148.
- [2] V. Guerra, C. Wan, T. McNally, Thermal conductivity of 2D nanostructured boron nitride (BN) and its composites with polymers, Progress in Materials Science, 100 (2019) 170-186.
- [3] M. Loeblein, S. H. Tsang, M. Pawlik, E. J. R. Phua, H. Yong, X. W. Zhang & E. H. T. Teo, High-density 3D-boron nitride and 3D-graphene for highperformance nano-thermal interface material. ACS Nano, 11(2), 2017, 2033-2044.
- [4] M. K. Gupta, M. E. Korkmaz, M. Sarıkaya, G. M. Krolczyk, M. Günay, S. Wojciechowski, Cutting forces and temperature measurements in cryogenic assisted turning of AA2024-T351 alloy: An experimentally validated simulation approach, Measurement, 188 (2022) 110594.
- [5] H. Ateş, E. Bahçeci, Nano malzemeler için üretim yöntemleri, Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 3(2) (2015) 483-499.
- [6] İ. A. Karamanli, M. Günay, Seramik malzemelerin işlenmesinde uygulanan alışılmamış imalat yöntemleri, Konya Journal of Engineering Sciences, 10(4) (2022) 1061-1082.
- [7] M. Pul, Karbon nanotüp (cnt) ve nano grafen (g) takviyeli al 2024 kompozitlerin vorteks yöntemiyle üretilerek aşınma ve işlenebilme özelliklerinin incelenmesi, International Journal of Engineering Research and Development, 11(1), 2019, 370-382.
- A. Kaçal, F. Yıldırım, M. Koyunbakan, Sac malzeme yüzey pürüzlülüğünün fiber-metal tabakalı kompozitlerin mekanik özelliklerine olan etkisi, El-Cezeri, 8(3) (2021) 1215-1228.
- [8] P. L. Niu, W. Y. Li, N. Li, Y. X. Xu, D. L. Chen, Exfoliation corrosion of friction stir welded dissimilar 2024-to-7075 aluminum alloys, Materials Characterization, 147 (2019) 93-100.
- [9] S. T. Mavhungu, E. T. Akinlabi, M. A. Onitiri, F. M. Varachia, Aluminum matrix composites for industrial use: advances and trends, Procedia Manufacturing, 7 (2017) 178-182.
- [10] H. Dedeakayoğulları, A. Kaçal, Eklemleri imalat teknolojileri ve kullanılan talaşlı imalat yöntemleri üzerine yapılan çalışmaların değerlendirilmesi, İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları, 1(1), 2020, 1-12.
- [11] Arenal, A. Lopez-Bezanilla, Boron nitride materials: an overview from 0D to 3D (nano) structures. wiley interdisciplinary reviews: Computational Molecular Science, 5(4) (2024) 299-309.

- [12] H. Aydın, Nanoyapılı Hegzagonal bor nitrür üretimi ve karakterizasyonu, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30(2) (2018) 269-275.
- [13] M. Clausi, M. Zahid, A. Shayganpour, I.S. Bayer, Polyimide foam composites with nano-boron nitride (BN) and silicon carbide (SiC) for latent heat storage, Advanced Composites and Hybrid Materials, 5(2), 2022, 798-812.
- [14] B. Karaca, U. Çavdar, Saf ve bor karbür takviyeli alüminyum tozlarının ultra yüksek frekanslı indüksiyon jeneratörü ile sinterlenmesi, Mühendis ve Makina, 55 (2014) 59-64.
- [15] C. Çivi, E. Atik, Bakır ve grafit içeren demir esaslı malzemelerin indüksiyon ile sinterlenmesinde sinterleme sıcaklığının malzeme dayanımına etkisi, Celal Bayar University Journal of Science, 13(2) (2017) 467-473.
- [16] E. Atik, C. Çivi, C. Kökey, G. Eyici, Toz metal parçalar ile çelik parçaların indüksiyon ile sinterleme yöntemiyle birleştirilmesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31 (2016) 117-122.
- [17] M. Ortega Varela de Seijas, M. A. Bardenhagen, T. Rohr, & E. Stoll, Indirect induction sintering of metal parts produced through material extrusion additive manufacturing, Materials, 16(2), (2023) 885.
- [18] B. Gül, U. Gezici, M. Ayvaz, U. Çavdar, The comparative study of conventional and ultra-high frequency induction sintering behavior of pure aluminum, International Advanced Researches and Engineering Journal, 4(3) (2020) 173-179.