

AKÜ FEMÜBİD 23 (2023) 055902 (1318-1327)

AKU J. Sci. Eng. 23 (2023) 055902 (1318-1327)

DOI: 10.35414/akufemubid.1207488

Araştırma Makalesi / Research Article

# Nikel Partiküller ile Takviye Edilmiş Magnezyum Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Fevzi KELEN<sup>1</sup>,<sup>1</sup> Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Van, Türkiye.Sorumlu yazar e-posta: fkelen@yyu.edu.tr. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3900-4503>

Geliş Tarihi: 20.11.2022 Kabul Tarihi: 07.09.2023

## Öz

Metal matrisli kompozit malzemeler otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük ağırlığın son derece önemli olduğu bu alanda magnezyum esaslıların tüketim hacimleri her geçen gün artmaktadır. Fakat oda sıcaklığında gözlenen düşük süneklilikleri ve yetersiz dayanımları hem otomotiv sektöründe hem de endüstride demir, çelik ve alüminyuma göre kullanımlarını önemli oranda kısıtlamaktadır. Mevcut çalışmada, hacimce %0-%10 oranlarında, mükemmel süneklilik, iyi tokluk ve yüksek elastik modül gibi üstün özelliklere sahip nikel mikro partiküller ile takviye edilmiş magnezyum matrisli kompozit malzemeler toz metalürjisi yöntemlerinden tek eksenli sıcak presleme tekniği ile imal edilmiştir. Üretim parametrelerinin optimizasyonu sonucu tüm numunelerde yaklaşık olarak tam yoğunluğa ulaşılmış ve gözenek içermedikleri tespit edilmiştir. Mikroyapısal incelemelerde  $\alpha$  (Mg) ve Ni fazlarına ilaveten  $Mg_2Ni$  fazı da gözlenmiştir. Bu bileşik, ayrıca, XRD analizlerinde de belirlenmiştir. Güçlendirici ilavesi ile matris malzemesinin oda sıcaklığı akma ve basma dayanımlarında sırasıyla %37 ve %35 oranlarında iyileşmeler elde edilmiş ve tüm test sıcaklıklarında saf magnezyuma göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür. Kompozit malzemeler gerek mekanik özellikleri gerekse de düşük yoğunlukları ile otomotiv ve endüstride kullanılan geleneksel malzemelere önemli bir alternatif teşkil ettiği saptanmıştır.

### Anahtar kelimeler

Magnezyum;  
Nikel;  
Kompozitler;  
Otomotiv Malzemeleri;  
Mekanik Özellikler;  
Sıcak Presleme

## Processing and Characterization of Magnesium Matrix Composites Reinforced by Nickel Particles

### Abstract

Metal matrix composite materials are prevalently used in the automotive industry. In that of those applications in which lightness is a critical parameter, consumption volumes of magnesium-based materials are continuously increasing. However, their low ductility and insufficient strengths observed at room temperature significantly limit their use compared to iron, steel and aluminum both in the automotive and in industry. In the present study, composites reinforced with nickel microparticles, which have superior properties like excellent ductility, good toughness and high elastic modulus, at volumetric ratios of 0%-10% were successfully produced by the uniaxial hot pressing technique that is the powder metallurgy methods. As a result of the optimized production parameters, full density was almost reached in all samples and it was determined that they did porosity free. In addition to  $\alpha$  (Mg) and Ni phases,  $Mg_2Ni$  phase was also observed in microstructural analysis. This compound was also identified in XRD analysis. By the addition of reinforcement, 37% and 35% improvements were obtained in the room temperature yield and compressive strengths of the matrix material, respectively, and also, it was observed to have higher values than pure magnesium at all test temperatures. The composite materials, with their mechanical properties and low densities, have been established to constitute an important alternative to traditional materials used in the automotive and industry.

### Keywords

Magnesium;  
Nickel;  
Composites;  
Automotive Materials;  
Mechanical Properties;  
Hot Pressing

## 1. Giriş

Motorlu taşıt emisyonları insan sağlığı ve çevre atmosferi açısından ciddi sorunlar ihtiva etmektedir. Özellikle karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salınımı sera gazı etkisine yol açarak küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi önemli problemlere neden olmaktadır. Otomobillerde CO<sub>2</sub> yayılımı aerodinamik yapı, silindir hacmi, motor, dişli ve lastiklerdeki sürtünmeler gibi birçok faktör tarafından etkilenmesine karşın temel etken taşıt ağırlığıdır. Araçlarda kütle azaltımı ile hem CO<sub>2</sub> oluşumu hem de diğer kirletici unsunlar en aza indirgenebilir. Düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet, kolay geri kazanım ve mükemmel sönümleme kapasitesi gibi karakteristikleri ile ön plana çıkan magnezyum otomobillerin temel sistem ve bileşenlerinde geleneksel malzemelerin yerine tercih edilerek ağırlıkta önemli kazanımlar sağlayabilir. Magnezyumun araçlarda konsol dayanağı, radyo kutusu, ayna braketleri ve torpido kapağı gibi uygulamaları bulunmasına rağmen oda sıcaklığı zayıf süneklik, düşük elastik modül, yetersiz sürünme direnci ve kötü korozyon dayanımı gibi dezavantajları demir, çelik ve alüminyuma göre kullanımını oldukça kısıtlamaktadır (Kelen 2014, 2021). Bu malzemelerin düşük mekanik özelliklerini iyileştirmek için partikül ya da tel biçiminde SiC, TiC, B<sub>4</sub>C, TiB<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CNT, Cu, TiNi ve Ni takviye elemanları çoğunlukla sarf edilmiştir. SiC, TiC, B<sub>4</sub>C, TiB<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CNT ve Cu ile güçlendirilmiş kompozitlerin elastisite modülü ve akma mukavemetleri yüksek olmasına rağmen süneklik değerlerinin son derece düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ara yüzeyde oluşan gevrek yapıdaki intermetalikler ve yetersiz ıslatılabilirlikten dolayı zayıf bağ teşekkülü mikroyapıda gözenek oluşumuna yol açarak sünekliğin yanı sıra diğer mekanik özellikleri de olumsuz etkilediği saptanmıştır (Chawla 2012, Ceschini *et al.* 2017, Nguyen and Gupta 2010, Meher *et al.* 2022, Yang *et al.* 2022). TiNi kullanımında sünekliğin iyileştiği, artan takviye oranlarında ise azaldığı belirtilmiştir. Bu takviye materyalinin bilhassa, yüksek sıcaklık mekanik özellikleri üzerinde, kelen (2018), kelen vd. (2018) olumlu etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Fakat yüksek maliyeti nedeni ile pek fazla tercih edilmemektedir (Yan and Li 2005, Esen 2011, 2012, Aydoğmuş 2015). Mükemmel süneklik, yüksek tokluk, kolay şekillendirebilirlik, iyi korozyon direnci ve yüksek elastik modül gibi üstün özelliklerinden dolayı otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan nikel ile yapılan takviyelerde ise az miktarda ilave edilmesi durumunda sünekliğin iyileştiği, artan güçlendirici oranlarında süneklikteki düşüşün az olduğu belirtilmiştir. Bu kompozitlerin kırılmadan önce plastik deformasyon davranışı sergilediği, kırılma yüzeylerinin mat ve pürüzlü olduğu saptanmıştır. Bunların yanı sıra çatlak husulünün sadece iri tanelerde gözlemlendiği, ara yüzeyde iyi bir bağın meydana geldiği ve yüksek gerilme değerlerinde yükün matristen güçlendiriciye etkin biçimde aktarıldığı belirtilmiştir. Diğer taraftan elastik modül, akma mukavemeti, çekme dayanımı ve sertlik gibi diğer mekanik özelliklerde de önemli iyileşmeler olduğu vurgulanmıştır (Hassan and Gupta 2002a, 2002b, Hwang *et al.* 2008, Scharf *et al.* 2009, Singh *et al.* 2010, Gopagoni *et al.* 2011, Anand 2012, Hassan *et al.* 2015, Olalekan *et al.* 2021, Kelen 2023a, 2023b).

Mevcut çalışmada saf magnezyum tozlar, nikel partiküller ile farklı hacimsel oranlarda takviye edilerek tek eksenli sıcak presleme tekniği ile üretilmiştir. Toz metalürjisi yöntemlerinden biri olan sıcak presleme gerek sıcak izostatik presleme gerekse de kıvılcımlı sinterlemeye göre ilk kurulum ve işletme giderleri açısından daha verimli bir imalat tekniğidir. Ayrıca eş zamanlı olarak ısıtma ve pres tatbikine imkan tanıdığından klasik sinterlemeye nazaran çok daha ekonomik bir proses olup, malzemelerin porozitesiz olarak daha düşük sıcaklıklarda, daha kısa sürelerde ve daha az enerji tüketerek imal edilmesine olanak sağlamaktadır (Zhou and Sun 2000, Wang *et al.* 2002). Kompozit malzemelerin mikroyapıları ve akma mukavemeti, basma dayanımı ve süneklik gibi mekanik özellikleri karakterize edilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

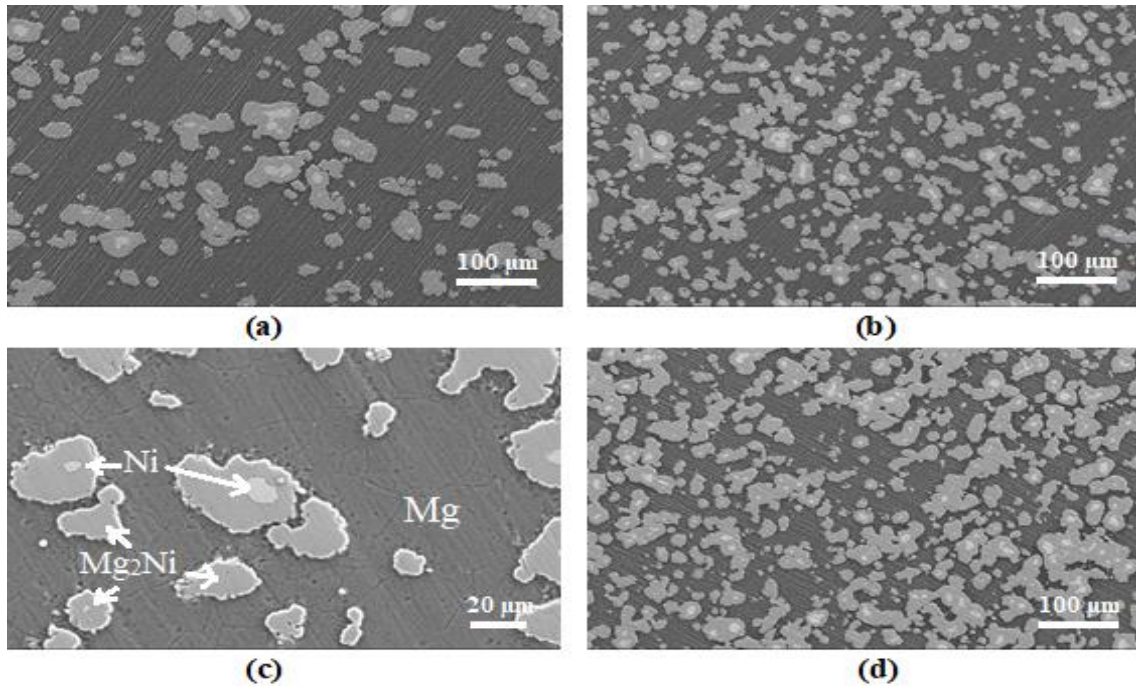
Toz metalürjisi yöntemlerinden tek eksenli sıcak presleme metodu ile magnezyum matrisli kompozit malzemeler nikel mikro partiküller ile hacimsel

olarak %0, %5, %7,5 ve %10 oranlarında takviye edilerek başarılı bir şekilde üretilmiştir. Matris ve takviye tozlar Nanografi A.Ş.'den (Türkiye) satın alınmıştır. Metalik partiküllerin saflıkları, tedarikçi şirket tarafından en az %99 olarak belirtilmiştir. Magnezyum ve nikel mikro partiküller ifade edilen oranlarda seramik bir kap içerisinde manuel olarak 10 dk karıştırıldıktan sonra silindirik grafit kalıplarda inert atmosferde 500°C sıcaklıkta, 50 MPa basınç altında 1 saat süre ile sinterlenmiştir. Mikroyapısal analizler ve mekanik testlerde kullanılmak üzere referans ve kompozit malzemelerden tel erozyon yöntemi ile 5X5X10 mm<sup>3</sup> boyutlarında numuneler elde edilmiştir. Metalografik hazırlamadan sonra numuneler etil alkol içerisinde 5 dakika ultrasonik temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Referans ve kompozit malzemelerin yoğunluk değerleri Arşimet metodu ile ölçülmüş, bunun için, hassas analitik terazi ve yoğunluk kitinden faydalanılmıştır. Başlangıç tozlarında ve imal edilen tüm malzemelerde bulunan fazları saptamak için X-ışını kırınım (XRD) analizleri PANalytical marka Empyrean model Cu-K $\alpha$  ışınımlı difraktometre cihazda yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri Zeiss Sigma 300 model cihaz ile hem parlattılmış hem de dağlanmış numunelerde gerçekleştirilmiştir.

%5 nital solüsyonu dağlama için kullanılmış, dağlama süre, 2 dakika olarak uygulanmıştır. Mekanik basma deneyleri, 30 kN sığalı, 750 Watt kapasiteli ve dakikada 0.2 mm test hızına sahip cihaz ile yapılmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

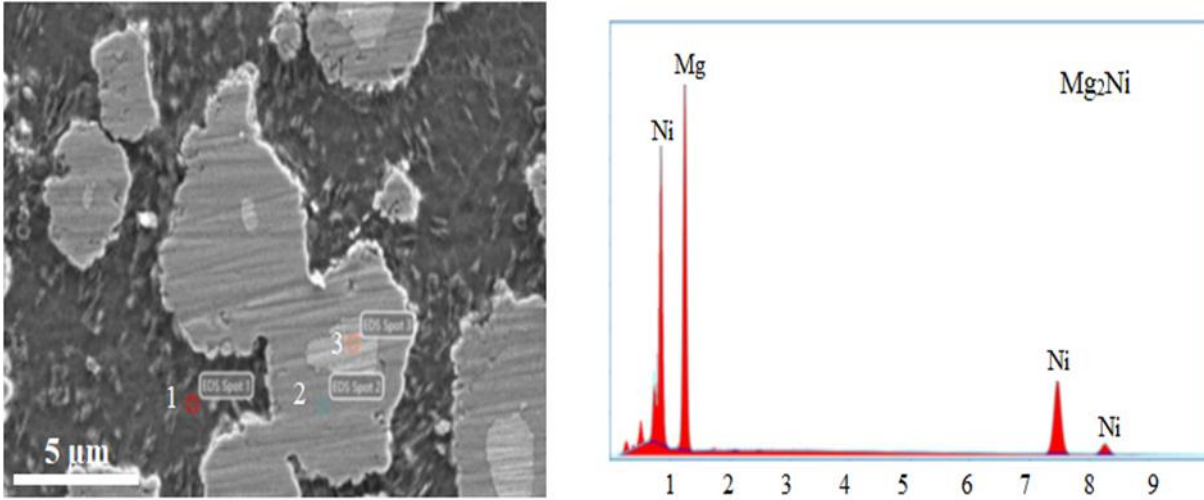
Nikel mikro partiküller ile takviye edilmiş magnezyum matrisli kompozit malzemelerin teorik yoğunlukları karışım kuralından hesaplanmıştır. Üretilen tüm numunelerde yaklaşık olarak tam yoğunluğa ulaşılmış ve gözenek içermedikleri tespit edilmiştir. Şekil 1'de verilen SEM analizleri bu durumu doğrular niteliktedir. Saf magnezyum numune sadece  $\alpha$ -Mg tanelerinden meydana gelmekte ve taneler uygulanan yüke dik bir doğrultuda yönelime sahiptir. Kompozit malzemelerde ise nikel mikro partiküllerin yapı içerisinde homojen bir dağılım sergilediği ve matris fazın tane sınırlarında yer aldığı gözlenmiştir. Takviye tozların çok iyi sinterlendikleri, aralarındaki birkaç mikron boyuttaki çok küçük boşlukların dahi magnezyum tozları ile dolduğu ve ana faz ile porozitesiz bir ara yüzey meydana getirdiği saptanmıştır (Şekil 1c).



Şekil 1. Kompozit malzemelerin SEM görüntüleri, (a) Mg-%5Ni, (b-c) Mg-%7.5Ni ve (d) Mg-%10Ni

Şekil 2’de maksimum oranda takviye içeren kompozit malzemeye ait noktasal EDS analizi görülmektedir. Bu analizlerde farklı bölgelerde gerçekleştirilen incelemelerde matris ve takviye fazlarına ilaveten Mg<sub>2</sub>Ni fazı da (2 nolu nokta) gözlenmiştir. Kompozit malzemeler tamamen katı fazda sinterlendiği için intermetalik bileşiğin oluşumu beklenmemektedir. Fakat Mg-Ni ikili faz diyagramı detaylı olarak tetkik edildiğinde Mg<sub>2</sub>Ni fazının meydana gelme nedeni anlaşılmaktadır. Denge diyagramında da görülebileceği üzere üretim sıcaklığı (500°C), ötektik reaksiyon

sıcaklığına (506°C) oldukça yakındır. Bu sebeple Mg<sub>2</sub>Ni bileşiğin teşekkülü son derece olağan olarak değerlendirilmektedir. Literatürde intermetalik fazın ötektik noktanın altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilen katı faz üretimlerinde meydana geldiği rapor edilmektedir (Shao et al. 2003a, Shao et al. 2003b, Ueda et al. 2005, Iturbe-García et al. 2010, Shao et al. 2013, Wen et al. 2020, Kelen 2023a). Bu fazın varlığı XRD analizleriyle de doğrulanmıştır. 1 (koyu gri renkli) ve 3 (açık gri renkli) nolu noktalar ise sırası ile matris ve takviye fazlarından oluşmaktadır.

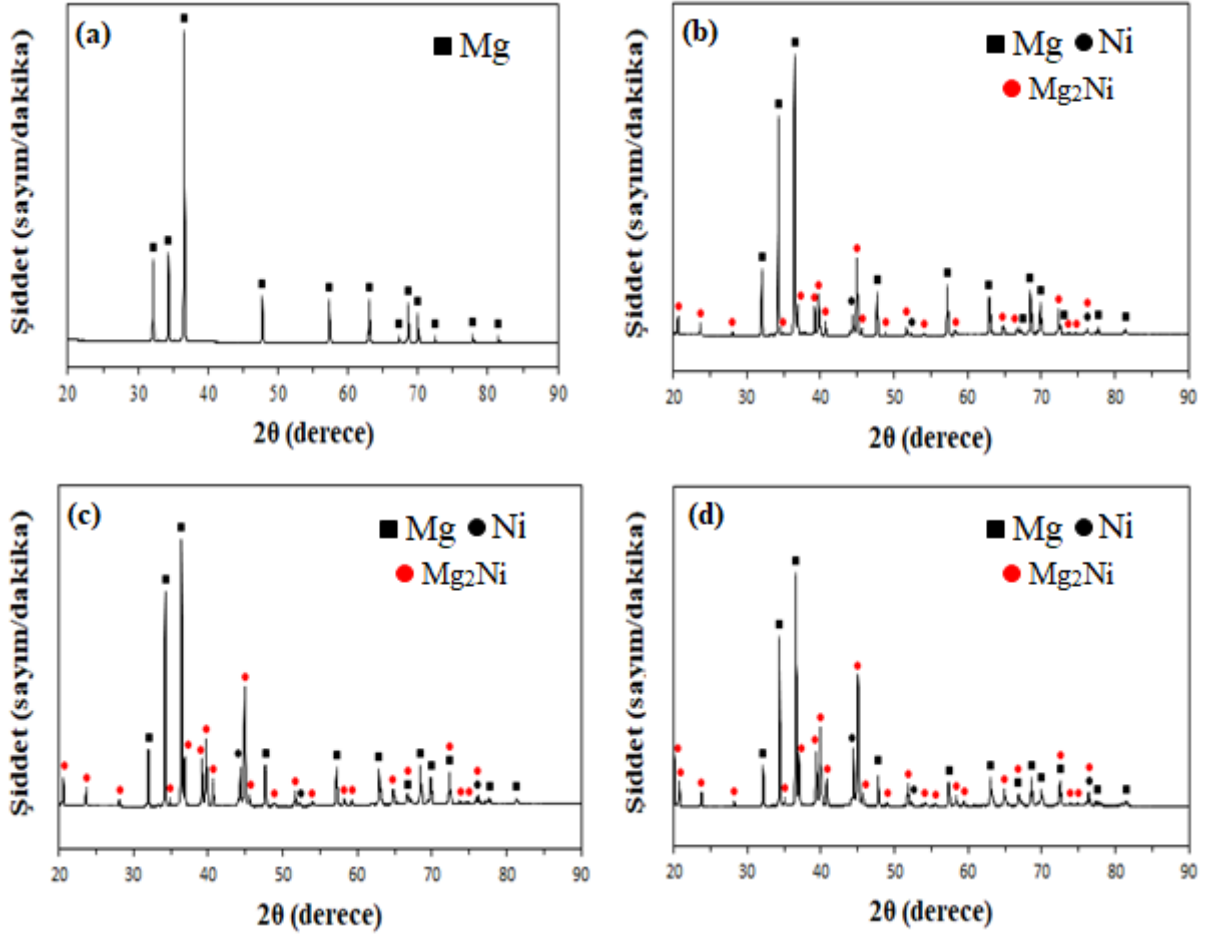


Element	1		2		3	
	Ağırlık (%)	Atomik (%)	Ağırlık (%)	Atomik (%)	Ağırlık (%)	Atomik (%)
Mg	97.95	99.14	39.64	61.33	1.73	4.07
Ni	2.05	0.86	60.36	38.67	98.27	95.93

Şekil 2. Maksimum oranda takviye içeren kompozit malzemeye ait noktasal EDS analizi

Şekil 3’te üretilen tüm numunelerin XRD desenleri verilmiştir. Referans numune başlangıç tozu ile aynı fazı içerirken kompozit malzemeler Mg, Ni ve Mg<sub>2</sub>Ni fazlarından oluşmaktadır. Takviye fazına ait (111), (200) ve (220) ana pikler tüm kompozitlerde gözlenmiş, şiddetleri artan güçlendirici miktarı ile birlikte artmıştır. Mg<sub>2</sub>Ni intermetalik piklerin ise çalışılan tüm oranlarda standart pikler (JCPDS Kart No:75–1250) ile birebir örtüştüğü tespit edilmiştir. Bu faza ait 2θ:32,108, 2θ:63,096, 2θ:67,035, 2θ:68,558, 2θ:69,871 derecelerdeki pikler

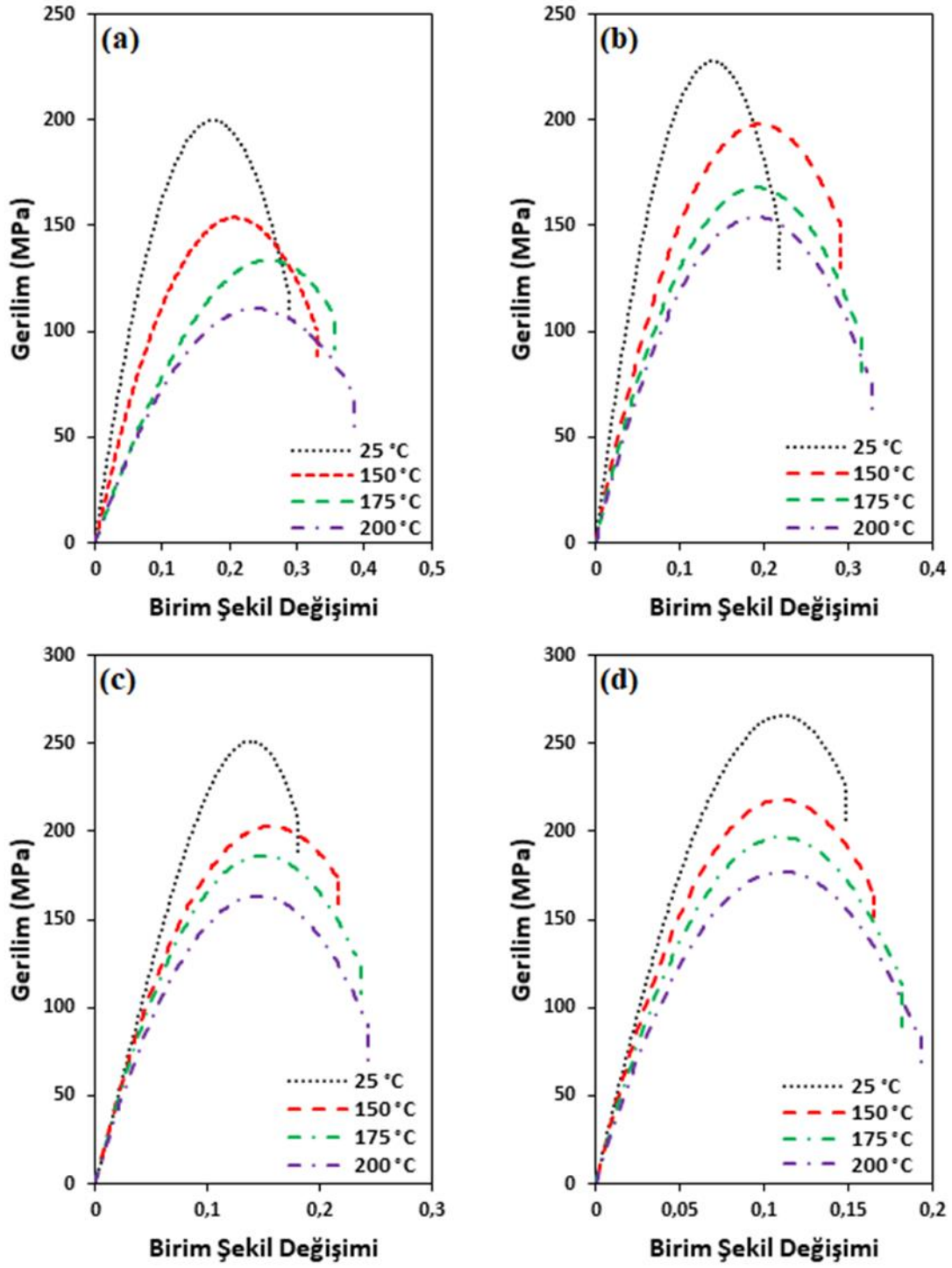
magnezyumun 2θ:32,161, 2θ:63,174, 2θ:67,113, 2θ:68,584, 2θ:69,976 derecedeki pikleri tarafından perdelenmektedir. 2θ:52,200 ve 2θ:76,383 derecedeki pikleri ise nikelin 2θ:51,847 ve 2θ:76,3 derecedeki pikleri ile çakışmaktadır. Diğer taraftan 2θ:72,707 derecedeki piki magnezyumun 2θ:72,523 derecedeki pikini 2θ:45,160 derecedeki piki ise nikelin 2θ:44,566 derecedeki pikini perdelemiştir. Dolayısıyla bu piklerin matris/takviye ve intermetalik bileşik fazlarına ait olduğu açık bir şekilde anlaşılmaktadır.



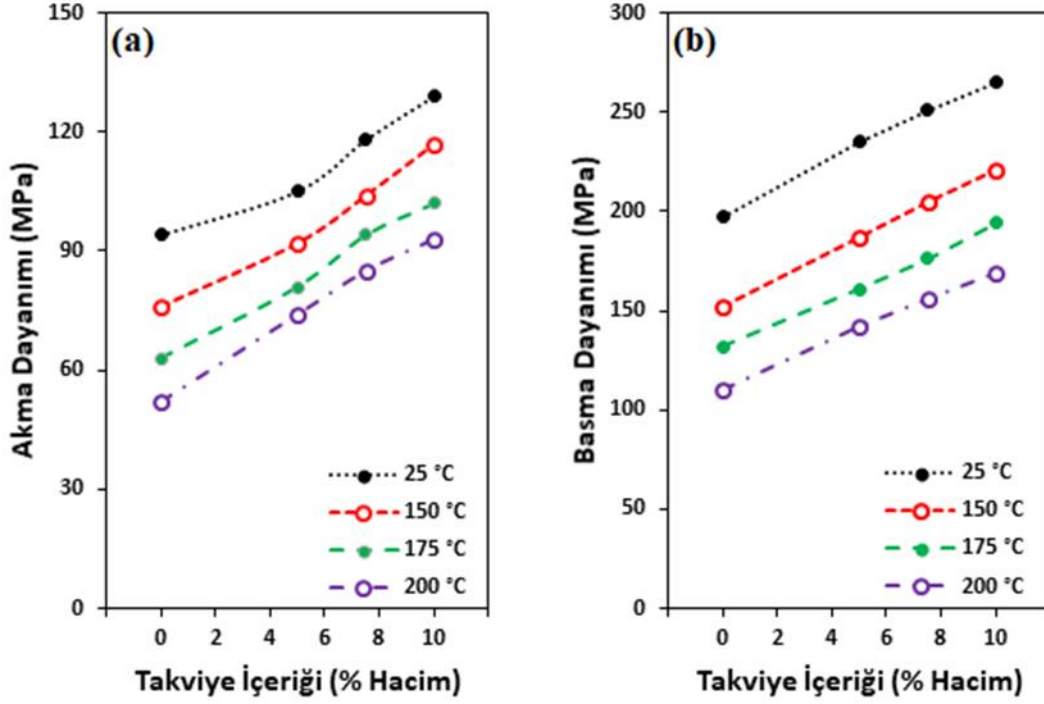
Şekil 3. Matris malzemesi ve kompozitlere ait XRD analizleri (a) Saf Mg, (b) Mg-%5Ni, (c) Mg-%7.5Ni, (d) Mg-%10Ni

Şekil 4'te referans ve kompozit malzemelerin oda sıcaklığında ve 150°C, 175°C ve 200°C sıcaklıklarda gerçekleştirilen mekanik basma deneylerin gerilim - birim şekil değişimi eğrileri verilmiştir. Üretilen tüm numunelerde akma ve basma dayanımlarının artan sıcaklıkla birlikte azaldığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan süneklik değerlerinin ise sıcaklıkla arttığı saptanmıştır. Yüksek sıcaklıklarda da benzer durum gözlenmiş ve gerilim değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Saf magnezyuma nikel ilavesinin akma dayanımı, basma mukavemeti ve süneklik gibi mekanik özellikler üzerindeki etkisi Şekil 5'te ve Çizelge 1'de verilmiştir. Matris malzemesinin oda sıcaklığı akma ve basma dayanımları sırası ile 94 MPa ve 197 MPa iken %5Ni ilave edilmesi durumunda 105 MPa ve 235 MPa değerlerine %10Ni eklenmesi halinde ise 129 MPa ve 265 MPa seviyelerine çıktığı görülmüştür. Nikel ilavesi saf magnezyumun akma ve basma dayanımlarında sırasıyla ortalama %37 ve %35 düzeylerinde iyileşme sağlamıştır. 150°C'de akma

mukavemetinin 76 MPa'dan 117 MPa değerine, 175°C'de 63 MPa'dan 102 MPa seviyesine ve 200°C'de ise 52 MPa'dan 93 MPa düzeyine çıktığı görülmüştür. Bu sıcaklıklardaki akma dayanımı değerlerinde sırası ile %54, %62 ve %79 oranında artışlar gözlenmiştir. Basma mukavemetinde ise aynı sıcaklıklarda sırası ile %45, %47 ve %54 miktarında iyileşmeler saptanmıştır. Süneklik değerlerinde matris malzemesine maksimum takviye ilave edilmesi durumunda %28,70'ten %14,96'a düştüğü tespit edilmiştir. Saf magnezyum numunede artan sıcaklıkla birlikte süneklik değerlerinde ciddi artışlar gözlenirken kompozit malzemede artışların sınırlı olduğu belirlenmiştir. Örneğin %7,5Ni ihtiva eden kompozit numunelerin ~25°C, 150°C, 175°C ve 200°C'deki süneklik değerleri sırası ile %18,93, %20,97, %23,29 ve %24,92 olarak ölçülmüştür. Takviye materyali saf magnezyumun sünekliğinde ciddi bir düşüşe neden olmaz iken akma ve basma mukavemetlerinde önemli iyileşmeler sağlamıştır.



Şekil 4. Matris malzemesi ve kompozitlerin güçlendirici içeriğine bağlı farklı sıcaklıklardaki gerilim-birim şekil değişimleri (a) Saf Mg, (b) Mg-%5Ni, (c) Mg-%7.5Ni, (d) Mg-%10Ni



Şekil 5. Takviye materyalinin kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi

(a) Akma mukavemeti, (b) Basma dayanımı

Çizelge 1. Referans ve kompozit malzemelerin oda ve yüksek sıcaklıklardaki mekanik özellikleri

Sıcaklık (°C)	Takviye oranı (% hacim)	Akma dayanımı (MPa)	Basma dayanımı (MPa)	Süneklik (%)
25 °C	0	94	197	28.70
	5	105	235	23.65
	7.5	118	251	18.93
	10	129	265	14.96
150 °C	0	76	152	32.94
	5	92	187	29.21
	7.5	104	205	20.97
	10	117	221	17.14
175 °C	0	63	132	35.11
	5	81	161	31.55
	7.5	94	176	23.29
	10	102	194	18.44
200 °C	0	52	110	38.71
	5	74	142	33.22
	7.5	85	156	24.92
	10	93	169	19.67

Mekanik basma testlerinde tüm kompozitlerin referans malzeme, saf magnezyuma, kıyasla daha yüksek dayanım değerlerine sahip olduğu görülmüştür. İmal edilen numuneler akma

mukavemeti, basma dayanımı ve süneklik gibi mekanik özellikleri ile otomobillerin iç donanım, karoseri, şasi, güç aktarma organları ve araç ön alanı gibi ana sistem ve aksamalarında yüksek sıcaklık ve

gerilmelere maruz kalmayan çelik ve alüminyum gibi konvansiyonel malzemelerin yerine tercih edilebilir. Kompozitlerin geleneksel malzemelerin yerine kullanılması ile araç ağırlığında meydana gelecek hafifleme yakıt sarfiyatı ve emisyon kontrolünde önemli iyileşmeler sağlayabilir. Zira üretilen numunelerin minimum ve maksimum takviye oranında sırasıyla 2,10 g/cm<sup>3</sup>- 2,47 g/cm<sup>3</sup> sahip oldukları düşük yoğunluk değerleri çelik ( $\rho=7,86$  g/cm<sup>3</sup>) ve alüminyuma ( $\rho=2,71$  g/cm<sup>3</sup>) kıyasla önemli bir avantaj teşkil etmektedir. Böylece otomobillerde hafif malzeme içeriği artırılarak yakıt sarfiyatı ve yanma sonu açığa çıkan egzoz emisyonlarının minimize edilmesinin yanı sıra ivmelenme, frenleme ve manevra kabiliyetleri de geliştirilebilir.

#### 4. Sonuç

Magnezyum matrisli kompozit malzemeler toz metalürjisi metotlarından tek eksenli sıcak presleme tekniği kullanılarak başarılı bir şekilde üretilmiştir. Otomobillerde hafif malzeme içeriğini artırmak amacıyla geliştirilen kompozitlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin karakterizasyonu neticesi aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Kompozitlerde üretim parametrelerinin optimizasyonu ile tüm numunelerde hemen hemen tam yoğunluğa ulaşılmış ve gözenek içermedikleri belirlenmiştir.
- Morfolojik incelemelerde güçlendirici materyalinin içyapıda homojen dağıldığı ve ana faz ile porozitesiz bir ara yüzey meydana getirdiği saptanmıştır.
- Mikroyapısal incelemelerde matris ve takviye fazlarına ilaveten Mg<sub>2</sub>Ni fazı da tespit edilmiştir. Bu faz, ayrıca, XRD analizlerinde de gözlenmiştir.
- Takviye materyali saf magnezyumun akma mukavemeti ve basma dayanımında sırası ile %37 ve %35 oranında iyileşmeler sağladığı görülmüş, süneklik değerlerinde ise ciddi bir azalmaya neden olmamıştır.
- Mekanik testlerde kompozit numunelerin referans malzeme, saf magnezyuma, kıyasla daha yüksek dayanım değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

- Kompozit numunelerin mekanik özellikleri ve düşük yoğunlukları ile otomotiv ve endüstride kullanılan alışlagelmiş malzemelere önemli bir alternatif teşkil ettiği görülmüştür.

#### Teşekkür

Bu çalışma Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FHD-2022-10019 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

#### 5. Kaynaklar

- Anand, T.J.S., 2012. Nickel as an alternative automotive body material. *J. Mech. Eng*, **2**, 187-197.
- Aydogmus, T., 2015. Processing of interpenetrating Mg-TiNi composites by spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A*, **624**, 261-270.
- Borkar, T., Mohseni, H., Hwang, J., Scharf, T. W., Tiley, J. S., Hong, S. H., Banerjee, R., 2015. Excellent strength-ductility combination in nickel-graphite nanoplatelet (GNP/Ni) nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*, **646**, 135-144.
- Chawla, K.K., 2012. Composite materials: science and engineering, Springer Science & Business Media, 3-250.
- Ceschini, L., Dahle, A., Gupta, M., Jarfors, A.E.W., Jayalakshmi, S., Morri, A., Singh, R.A. 2017. Aluminum and magnesium metal matrix nanocomposites, Springer, 1-151.
- Esen, Z., 2012. The effect of processing routes on the structure and properties of magnesium-TiNi composites. *Materials Science and Engineering: A*, **558**, 632-640.
- Gopagoni, S., Hwang, J. Y., Singh, A. R. P., Mensah, B. A., Bunce, N., Tiley, J., Banerjee, R., 2011. Microstructural evolution in laser deposited nickel-titanium-carbon in situ metal matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, **509(4)**, 1255-1260.
- Hassan, S.F., Gupta, M., 2002a. Development of a novel magnesium/nickel composite with improved mechanical properties. *Journal of alloys and compounds*, **335(1-2)**, L10-L15.



- Hassan, S.F., Gupta, M., 2002b. Development of high strength magnesium based composites using elemental nickel particulates as reinforcement. *Journal of Materials Science*, **37(12)**, 2467-2474.
- Hassan, S.F., Nasirudeen, O.O., Al-Aqeeli, N., Saheb, N., Patel, F., Baig, M.M.A., 2015. Magnesium–nickel composite: Preparation, microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, **646**, 333-338.
- Iturbe-García, J. L., García-Núñez, M.R., López-Muño, B.E., 2010. Synthesis of the Mg<sub>2</sub>Ni alloy prepared by mechanical alloying using a high energy ball mill. *Journal of the Mexican Chemical Society*, **54(1)**, 46-50.
- Kelen, F., 2014. Motorlu taşıt emisyonlarının insan sağlığı ve çevre üzerine etkileri. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **19(1-2)**, 80-87.
- Kelen, F., 2018. TiNi ile takviye edilmiş Mg/AZ91 matrisli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 197.
- Kelen, F., 2023a. Novel Magnesium Matrix Hybrid Composites Manufactured Through Powder Metallurgy Technique. *Materials Today Communications*, 106348.
- Kelen, F., 2023b. Fabrication, microstructure and mechanical properties of novel titanium and nickel micro-particulates reinforced AZ91D magnesium alloy metal matrix hybrid composites, *Journal of Alloys and Compounds*, 171999.
- Kelen, F., Gavgali, M., Aydogmus, T., 2018. Microstructure and mechanical properties of a novel TiNi particulate reinforced AZ91 metal matrix composite. *Materials Letters*, **233**, 12-15.
- Kelen, F., 2021. Magnezyum ve alaşımlarının otomotiv endüstrisindeki önemi ve uygulamaları. *Journal of the Institute of Science and Technology*, **11(1)**, 548-562.
- Meher, A., Mahapatra, M.M., Samal, P., Vundavilli, P.R. 2022. A review on manufacturability of magnesium matrix composites: Processing, tribology, joining, and machining, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, **39**, 134-158.
- Nguyen, Q.B., Gupta, M., 2010. Enhancing mechanical response of AZ31B using Cu+ nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition, *Materials Science and Engineering, A*, **527(6)**, 1411-1416.
- Olalekan, O.N., Abdul Samad, M., Hassan, S.F., Elhady, M.M.I., 2021. Tribological evaluations of spark plasma sintered Mg–Ni composite. *Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces*, 1-9.
- Scharf, T.W., Neira, A., Hwang, J.Y., Tiley, J., Banerjee, R., 2009. Self-lubricating carbon nanotube reinforced nickel matrix composites. *Journal of applied physics*, **106(1)**, 013508.
- Shao, H., Liu, T., Li, X., Zhang, L., 2003a. Preparation of Mg<sub>2</sub>Ni intermetallic compound from nanoparticles. *Scripta Materialia*, **49(6)**, 595-599.
- Shao, H., Liu, T., Li, X., 2003b. Preparation of the Mg<sub>2</sub>Ni compound from ultrafine particles and its hydrogen storage properties. *Nanotechnology*, **14(3)**, L1.
- Shao, H., Xin, G., Li, X., Akiba, E., 2013. Thermodynamic property study of nanostructured mg-H, mg-Ni-H, and mg-cu-H systems by high pressure DSC method. *Journal of Nanomaterials*, 2013.
- Singh, A.R.P., Hwang, J.Y., Scharf, T.W., Tiley, J., Banerjee, R. 2010. Bulk nickel–carbon nanotube nanocomposites by laser deposition. *Materials Science and Technology*, **26(11)**, 1393-1400.
- Trojanová, Z., Gärtnerová, V., Jäger, A., Námešný, A., Chalupová, M., Palček, P., Lukáč, P., 2009. Mechanical and fracture properties of an AZ91 Magnesium alloy reinforced by Si and SiC particles, *Composites Science and technology*, **69(13)**, 2256-2264.
- Ueda, T.T., Tsukahara, M., Kamiya, Y., Kikuchi, S. 2005. Preparation and hydrogen storage properties of Mg–Ni–Mg<sub>2</sub>Ni laminate composites. *Journal of Alloys and Compounds*, **386(1-2)**, 253-257.
- Yan, B., Li, G., 2005. Mg alloy matrix composite reinforced with TiNi continuous fiber prepared by ball-milling/hot-pressing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **36(11)**, 1590-1594.

- Yang, H., Chen, X., Huang, G., Song, J., She, J., Tan, J., Pan, F., 2022. Microstructures and mechanical properties of titanium-reinforced magnesium matrix composites: Review and perspective, *Journal of Magnesium and Alloys*, **10**, 2311-2323.
- Zhou, Y., Sun, Z., 2000. Temperature fluctuation/hot pressing synthesis of  $Ti_3SiC_2$ . *Journal of Materials Science*, **35(17)**, 4343-4346.
- Wang, W., Fu, Z., Wang, H., Yuan, R., 2002. Influence of hot pressing sintering temperature and time on microstructure and mechanical properties of  $TiB_2$  ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, **22(7)**, 1045-1049.
- Wen, J., de Rango, P., Allain, N., Laversenne, L., Grosdidier, T., 2020. Improving hydrogen storage performance of Mg-based alloy through microstructure optimization. *Journal of Power Sources*, **480**, 228823.