

Amorf Şeritlerin Isıtıcı Performanslarının Değerlendirilmesi

M. Fatih Kılıçaslan¹, M. Fatih Işık² ve Bekir Akgül^{3*}

¹Mühendislik ve Temel Bilimler / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Türkiye

²Savunma Teknolojileri / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Türkiye

³Uçak Mühendisliği / Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Türkiye

*bekirakgul@sivas.edu.tr

Özet – Askerlerin giyilebilir giysilerde ve koltuk ısıtma sistemlerinde kullanılabilen mikro ısıtıcılarda esnek ve ince ısıtıcı elemanlar kullanılmaktadır. Bu tür malzemeler çalışma ortamları bakımından genelde 50 – 70 °C sıcaklıkları arasında çalışmaktadır. Giyilebilir ısıtıcılarda yüzey alanının fazla olması ısıtma performansı açısından önemlidir. Bu kapsamda farklı kimyasal kompozisyona sahip ısıtıcı şeritlerinin elektriksel ve termal özellikleri araştırılmıştır. Eriyik eğirme yöntemi ile yaklaşık 50 mikron kalınlığında amorf şeritlerin üretimi yapılmıştır. Şeritler amorf olduğu için esnek formdadır. 0,5 metre uzunluklarda kesilen şeritler elektriksel ve termal özelliklerinin tespit edilmesi için direnç testlerine tabi tutulmuştur. En iyi sıcaklık / direnç performansını 75Co14Fe7.5Si3.5B kimyasal kompozisyonuna sahip numune vermiştir. 74Ni12Cr5.5Fe7Si1.5B kimyasal kompozisyonuna sahip numune ise minimum sıcaklık ve en düşük direnç değerleri ile maksimum 170 °C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Fakat bütün numunelerin askeri uygulamalarda ve koltuk ısıtması gibi uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilmesi açıkça görülmektedir. Ayrıca şeritlerin yüzey alanı muadillerine göre %30 daha fazla olduğu için ısıtma performansının da buna bağlı olarak daha yüksek olmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Amorf malzemeler, rezistans, ısıtma performansı, hızlı katılaştırma, eriyik eğirme.

I. GİRİŞ

Günümüzde kullanılan elektrikli ısıtıcıların birçoğu geleneksel kristalin rezistanslar ile çalışmaktadır. Bu tip rezistansların elektrik rezistivite özellikleri amorf/nano kristalin metallere göre çok daha düşüktür [1]. Geleneksel rezistanslarda tane boyutları nispeten iri olduğu için elektrik iletimi amorf/nano kristalin metallere göre daha kolaydır. Bilindiği gibi elektrik iletimi elektronlar vasıtası ile oluşur ve bu elektronlar tane sınırlarından saçılarak iletimi zorlaştırırlar. Böylece metallere rezistans özellikleri gelişir. Malzemelerin elektriksel iletkenliği; kristal yapılarına (amorf, polikristal veya tek kristal), element bileşiminin ve sıcaklık gibi birçok faktöre bağlıdır. Amorf fazlar, aynı bileşimdeki kristal muadili ile karşılaştırıldığında çok daha küçük hareketlilik (mobility) nedeniyle düşük iletkenliğe sahiptir. Buna bağlı olarak amorf malzemelerin kristalin muadillerine göre elektrik rezistivite özelliklerinin

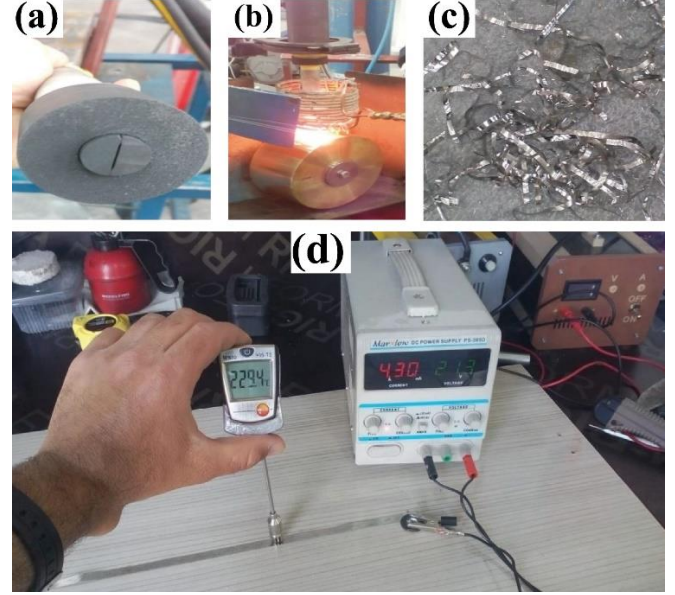
daha iyi olduğu söylenebilir. Ayrıca amorf malzeme yapabilmek için bilindiği gibi alaşım elementlerinin atomik boyutsal olarak birbirinden çok farklı ve karışım entalpilerinin değeri büyük negatif olmalıdır [2–4]. Bu durumda hali hazırda iletimi sağlayan elektronların ara yer ve yaralan atomlarından saçılması ve elektriksel rezistivite özelliğinin gelişmesi ayrıca beklenir [3–9]. Malzemelerin elektriksel iletkenlikleri ara yer ve yer alan atomları ilave edilerek kasıtlı olarak azaltılabilmektedir. Örneğin saf bakıra ilave edilen nikel veya başka bir alaşım elementi ile elektriksel iletkenliğinin bariz bir şekilde düştüğü bilinmektedir. Ayrıca uygulanan plastik deformasyonla oluşan kalıntı gerilimler ve yeni tane sınırları sayesinde elektriksel iletkenliği düşmektedir. Tüm bunlara ek olarak rezistans tellerinin yüzey alanı da ısıtma performansı için oldukça kritik bir konudur. Bilindiği gibi ısının rezistans tellerinden ortama yayılması rezistans

tellerinin yüzeyinden başlamaktadır. Bu yüzden rezistans tellerinin yüzey alanı ne kadar fazla ise ısının ortama yayılması ve ortamı ısıtma performansı o derece iyi olacaktır. Eriyik eğirme tekniği sayesinde oldukça ince (20 – 50 mikron) kalınlıklara sahip şeritlerin üretimi kolaylıkla yapılabilmektedir [10–12]. Ek olarak sahip olduğu yüksek soğuma hızları sayesinde sıvı metalin kristalin faza geçmeden amorf bir şekilde katılaşmasına imkân vermektedir. Bu yüzden eriyik eğirme tekniği amorf metal üretiminde son yıllarda sıklıkla tercih edilen ekonomik tekniklerden biridir.

Bu kapsamda kimyasal kompozisyonları farklı olan Fe, Co ve Ni esaslı 4 farklı alaşım hazırlanarak eriyik eğirme yöntemi ile amorf metal şerit üretimi yapılmıştır. Bu malzemelerin rezistans özellikleri incelenerek kıyaslaması yapılmıştır. 0.5 m'lik şeritler kesilerek kademeli olarak akım verilmiştir. Bu sayede şerit üzerinden geçen akım, oluşan sıcaklık, elektriksel direnç ve harcanan enerji hesaplanmıştır. Ayrıca şeritlerin belirli bir sıcaklıktan sonra kırıldığı fark edilmiştir. Buna göre şerit alaşımlarının kırılana kadar dayanabildiği sıcaklık, akım ve direnç ortaya konulmuştur. Sonuçlara göre en iyi ısıtma performansını 280 °C sıcaklığa kadar çıkabilen 75Co14Fe7.5Si3.5B alaşımı vermiştir. Aynı numunenin elektriksel direnci de diğerlerine göre en yükseğidir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Amorf şerit üretimi için alaşımda bulunan element sayısının en az üç ve bu elementlerin atom boyutları birbirinden oldukça uzak olması gerekmektedir [11,12]. Ayrıca bu elementlerin karışım entalpilerinin değeri negatif olarak büyük olması gerekmektedir. Tüm bu kurallar dikkate alınarak alaşım oluşturmak için element seçimi yapılmıştır. Bunlara ek olarak soğuma hızlarının da en az 10^6 K/s olması gerekmektedir ki seçtiğimiz eriyik eğirme tekniğinde bu hızların üzerinde bir soğuma hızında katılaşma işlemi gerçekleşmektedir. Şekil 1(a)'da görülen Pota-nozul vasıtasıyla ergitilip Şekil 2(b)'de görülen ve 30 m/s hızla dönen pirinç disk üzerine püskürtülen sıvı metal yaklaşık 10^7 K/s soğuma hızı ile amorf bir yapıda katılaştırılmıştır. Şekil 3(c)'de çalışma kapsamında üretilen şeritler görülmektedir.



Şekil 1. Alaşımların ergitilip pirinç diske gönderildiği 1x10 mm ebatlarında pota-nozul takımı (a), indüksiyon ısıtıcı, nozul, pirinç disk ve gaz püskürtmeden oluşan eriyik eğirme cihazı (b), eriyik eğirme prosesi sonunda üretilen şeritler (c) ve ısıtma performansını ölçmek için güç kaynağı ve termometreden oluşan bir deney düzeneği (d).

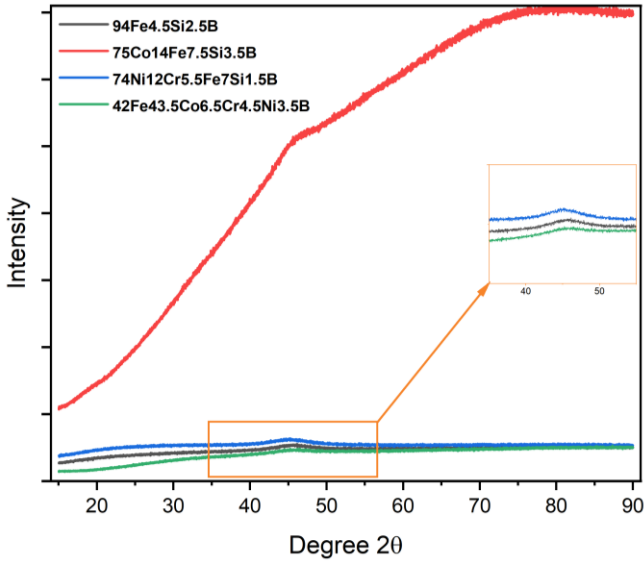
Ayrıca Tablo 1'de üretilen şerit numunelerinin kimyasal analizleri verilmiştir. Analizler Bruker marka XRF cihazında ölçülmüştür. Şeritlerin amorf karakteristiği Rigaku marka XRD cihazında 2 °/dk tarama hızında kontrol edilmiştir. Öte yandan amorf şeritlerin ısıtma performansını ölçmek için Şekil 1(d)'de görüldüğü gibi hassas ölçüm aralığına sahip güç kaynağı ve manuel termometre kullanılarak bir deney düzeneği kurulmuştur. Buna göre 1 ila 5 Amper(A) arasında ölçümler kademeli olarak (0.1 A) alınarak gerekli datalar (voltaj, direnç, sıcaklık ve güç) toplanmıştır.

Tablo 1. Üretilen şerit numunelerin kimyasal analizleri.

Alaşım Elementi (Ağırlıkça %)	Fe	Ni	Co	Cr	Si	B
FeSiB	93	-	-	-	4,5	2,5
CoFeSiB	14	-	75	-	7,5	3,5
NiCrFeSiB	5,5	74	-	12	7	1,5
FeCoCrNiB	42	4,5	43,5	6,5	-	3,5

III. BULGULAR

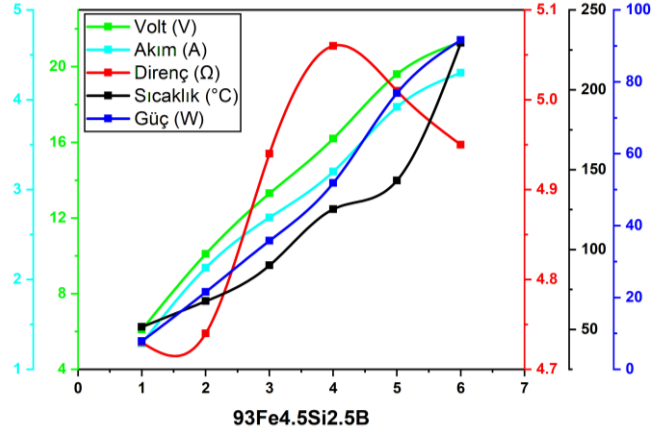
Şekil 2’de numunelerin XRD analizleri görülmektedir. Buna göre bütün numunelerde amorf yapının hâkim olduğu açıkça görülmektedir. Bilindiği gibi XRD analizlerinde herhangi bir pik oluşumu yok ise yapının tamamen amorf bir karakteristiğe sahip olduğu değerlendirilir. Yapılan şerit üretim denemelerinde soğuma hızının metalik cam (amorf) malzeme üretimi için yeterli olduğu söylenebilir. Fakat en güçlü amorf karakteristiğinin CoFeSiB numunesinde olduğu görülmektedir. Diğer numuneler kendi aralarında benzer bir amorf karakteristiğe sahiptirler. Çünkü XRD piklerinin karakteristiği neredeyse aynıdır. Fakat numunelerin tamamının amorf yapıda olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 2. Numunelerin XRD sonuçları

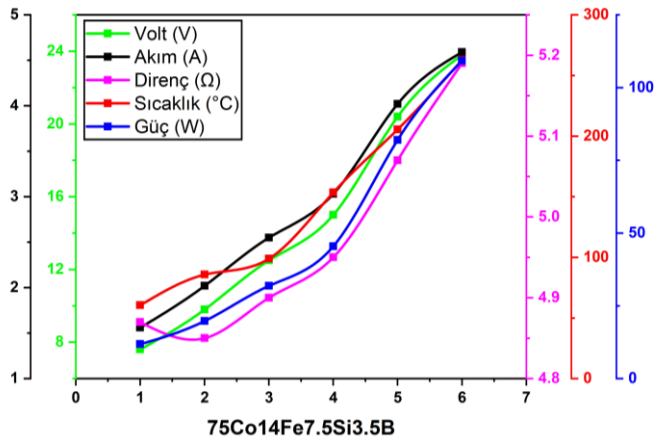
Şekil 3’de 93Fe4.5Si2.5B numunesinin elektriksel ve termal özelliklerinin grafikleri verilmiştir. 0,5 m uzunluğundaki şerit numunelere 1 amperden 5 amper değerine kadar kademeli olarak akım verilmiştir. Verilen akım sonucunda oluşan direnç ve sıcaklıklar ölçülmüştür. Bunlara bağlı olarak da oluşan güç (W) hesaplanmıştır. FeSiB numunesinde erişilen maksimum sıcaklık değeri 230 °C olarak kayıt edilmiştir. 200 °C sıcaklığın üzerine kadar şeridin rahatlıkla kopmadan dayandığı gözlenmiştir. Yani amorf yapının 230 °C’de bozulduğu söylenebilir. Sıcaklığın artmasıyla artan atomik hareketlilik sayesinde atomlar kısa mesafeli difüzyon ederek kristal kafes düzenine geçmektedir [13]. Bunun sonucunda nano kristalin bir yapıya kavuşmaktadır. Amorf yapıda esnek olan şeritler nano kristalin yapıya geçerken kırılmalı bir

karakteristiğe evrilmektedir. Buda şeritlerin kırılmasına sebep olmaktadır.



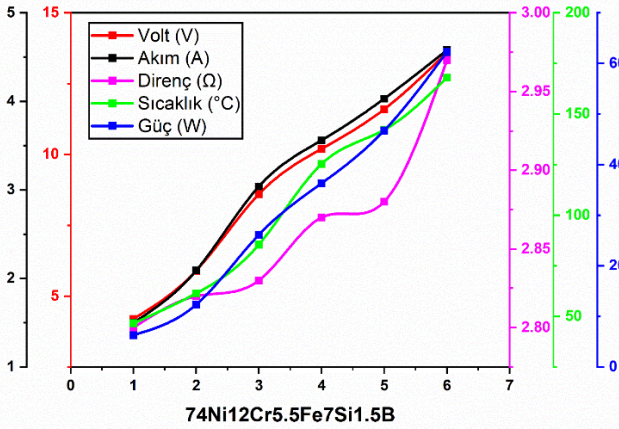
Şekil 3. 93Fe4.5Si2.5B numunesinin verilen akım değerlerine göre elektriksel ve termal performansı.

Aslında şeritlerin dayandığı maksimum sıcaklık değerlerine kristalizasyon sıcaklıkları olarak da değerlendirmek mümkündür. Şekil 4’de görüldüğü gibi en yüksek kristalizasyon sıcaklığı CoFeSiB numunesinde 280 °C olarak tespit edilmiştir. CoFeSiB şeridinden elde edilen maksimum güç değeri de diğer numunelerin üzerinde çıkmıştır. Şerit kırılana kadar 120 W’lık bir güç üretebilmiştir. Aynı numunenin direnci de en yüksek seviyede çıkmıştır. CoFeSiB numunesinin iletme katkısı sunan elektronların iletim sırasında daha fazla saçıldığı direnç değerinden anlaşılmaktadır. İletimin zayıf olması yapı içinde daha fazla titreşim oluşturmakta ve böylece şeritlerin daha fazla ısınmasına yol açmaktadır. CoFeSiB numunesinin şeritler arasında en iyi direnç ve sıcaklık performansı sergilediği görülmüştür.



Şekil 4. 75Co14Fe7.5Si3.5B numunesinin verilen akım değerlerine göre elektriksel ve termal performansı.

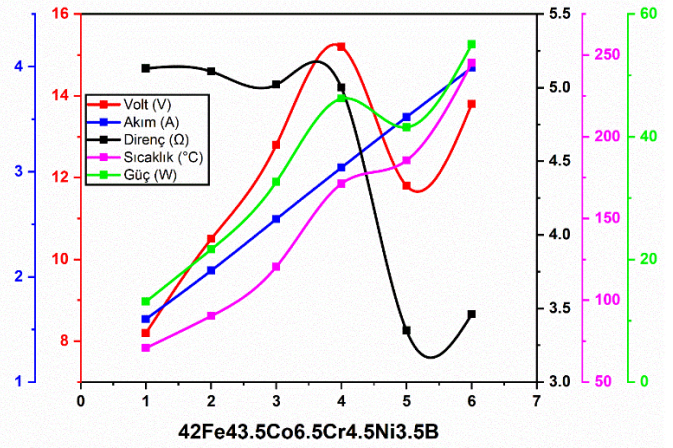
Şekil 5’de NiCrFeSiB numunesinin elektriksel ve termal sonuçları görülmektedir. CoFeSiB numunesi gibi doğrusal bir grafik elde edilmiştir. Fakat elektriksel olarak yüksek akım verilememiştir ve malzemenin direnci diğer numunelere kıyasla en düşük seviyede kalmıştır. İletimin diğer numunelerden daha iyi olduğu görülmektedir. Bunun için daha az direnç göstermişler ve bunun sonucunda daha az sıcaklık elde edilmiştir. NiCrFeSiB numunesinde elde edilen maksimum sıcaklık değeri 170 °C olarak kayıt edilmiştir. Aynı zamanda kristalizasyon sıcaklığının da düşük olduğu anlaşılmaktadır. Öte yandan her ne kadar daha düşük sıcaklıkta çalışabilse de silindirik rezistans muadillerine göre yüzey alanları %30 daha fazla olduğu için ısıtma performansı açısından daha iyi bir sonuç verdiği bilinmektedir.



Şekil 5. 74Ni12Cr5.5Fe7Si1.5B numunesinin verilen akım değerlerine göre elektriksel ve termal performansı.

IV. TARTIŞMA

Şekil 6’da FeCoCrNiB numunesinin termal ve elektriksel özelliklerinin deneysel sonuçları görülmektedir. Düzenli bir akım artışına karşın numunenin göstermiş olduğu direnç ve buna bağlı olarak diğer tüm değerlerde bir dalgalanma görülmektedir. Fakat yaklaşık 250 °C maksimum sıcaklığa erişebilmiştir. Dikkat edilmelidir ki FeCoCrNiB numunesinde oluşan güç diğer numunelere göre oldukça düşüktür. Düşük güçte elde edilen yüksek sıcaklık değeri direncin yüksek olmasıyla ilişkilidir. Atom çeşitliliğinin ve karışım entalpilerindeki farkın negatif fazla olması amorf oluşum kabiliyetini arttırmaktadır. Buna bağlı olarak atom sayısında ve boyutlarında gözlenen farklılıklar elektron saçılımına daha fazla katkı sağlayacak ve iletim elektronlarının saçılımından dolayı zorlaşacaktır. Tüm bunların sonucunda direnç artarken şeritlerin sıcaklığı artmaktadır.



Şekil 6. 42Fe43.5Co6.5Cr4.5Ni3.5B numunesinin verilen akım değerlerine göre elektriksel ve termal performansı.

Hızlı katılaşmanın etkisiyle şeritlerin bütünü amorf olarak oluşmuştur. Malzemelerin amorf kabiliyetini arttırmak için Si ve B gibi atom çapları farklı elementlerinde ilavesi yapılmıştır. Böylece karışım entalpileri farkı negatif olarak artırılmıştır. Sonuç olarak hem elementlerin sayıca miktarı fazla hem atom çapları farklı hem de karışım entalpileri büyük negatif olduğu için amorf şeritlerin üretimi kolaylıkla yapılabilmektedir. Amorf metallerde atomlar düzensiz bir formda olduğu için elektronların iletimi daha zordur ve bu yüzden kristalin muadillerine göre amorf malzemelerin rezistans özellikleri daha iyidir.

V. SONUÇLAR

Savunma ve askeri endüstrisinde koltuk veya askerlerin giyilebilir giysilerde kullanılabilen mikro ısıtıcılarda esnek ve ince ısıtıcı elemanlar kullanılmaktadır. Bu tür malzemeler çalışma ortamları bakımından genelde 50 – 70 °C sıcaklıkları arasında çalışmaktadır. Bu kapsamda farklı kimyasal kompozisyona sahip ısıtıcı elemanların elektriksel ve termal özellikleri araştırılmıştır. En iyi sıcaklık / direnç performansını 75Co14Fe7.5Si3.5B kimyasal kompozisyonuna sahip numune vermiştir. 74Ni12Cr5.5Fe7Si1.5B kimyasal kompozisyonuna sahip numune ise minimum sıcaklık ve en düşük direnç değerleri ile maksimum 170 °C sıcaklığa kadar ısıtılabilir. Fakat bütün numunelerin askeri uygulamalarda ve koltuk ısıtması gibi uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilmesi açıkça görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] S. Sulejmanovi, I. Gazdi, K. Hrvat, A.S. Feti, M. Lozani, N. Bajrovi, The Electrical Resistivity Of Partially Crystalline Zrcual Metallic Glasses, *J. Trends Dev. Mach. Assoc. Technol.* 19 (2015) 57–60.
- [2] C. Chattopadhyay, B.S. Murty, Kinetic modification of the ‘confusion principle’ for metallic glass formation, *Scr. Mater.* 116 (2016) 7–10. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.01.022>.
- [3] A. Takeuchi, A. Inoue, Classification of Bulk Metallic Glasses by Atomic Size Difference , Heat of Mixing and Period of Constituent Elements and Its Application to Characterization of the Main Alloying Element, 46 (2005).
- [4] A. Inoue, Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys, *Acta Mater.* 48 (2000) 279–306. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00300-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00300-6).
- [5] C. Chang, T. Kubota, A. Makino, A. Inoue, Synthesis of ferromagnetic Fe-based bulk glassy alloys in the Fe – Si – B – P – C system, 473 (2009) 368–372. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.05.088>.
- [6] A. Inoue, Y. Shinohara, J.S. Gook, Thermal and Magnetic Properties of Bulk Fe-Based Glassy Alloys Prepared by Copper Mold Casting, *Mater. Trans. JIM.* 36 (1995) 1427–1433. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.36.1427>.
- [7] A. Inoue, A. Takeuchi, T. Zhang, Ferromagnetic bulk amorphous alloys, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 29 (1998) 1779–1793. <https://doi.org/10.1007/s11661-998-0001-9>.
- [8] A. Inoue, T. Masumoto, Mg-based amorphous alloys, *Mater. Sci. Eng. A.* 173 (1993) 1–8. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(93\)90175-E](https://doi.org/10.1016/0921-5093(93)90175-E).
- [9] K. Sato, M. Ichinose, Y. Hirotsu, Y. Inoue, Effects of deformation induced phase transformation and twinning on the mechanical properties of austenitic Fe-Mn-Al alloys., *ISIJ Int.* 29 (1989) 868–877. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.29.868>.
- [10] M.F. Kılıçaslan, Y. Yılmaz, B. Akgül, H. Karataş, C.D. Vurdu, Effect of Fe-Ni Substitution in FeNiSiB Soft Magnetic Alloys Produced by Melt Spinning, *Adv. Mater. Sci.* 21 (2021) 79–89. <https://doi.org/10.2478/adms-2021-0026>.
- [11] M.F. Kılıçaslan, Y. Yılmaz, B. Akgül, H. Tiryaki, Effects of flash annealing and external magnetic field on magnetic properties of relatively high Nd content (37% by weight) NdFeB alloy, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 33 (2022) 22728–22735. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08992-2>.
- [12] M.F. Kılıçaslan, Y. Yılmaz, B. Akgül, Effects of Heat Treatment and on Magnetic Properties of NdFeB Based Permanent Magnet Alloys, *Eur. J. Sci. Technol.* (2022). <https://doi.org/10.31590/ejosat.1142054>.
- [13] B. Akgul, M. Kul, F. Erden, The puzzling thermal expansion behavior of invar alloys: a review on process-structure-property relationship, *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* (2023) 1–54. <https://doi.org/10.1080/10408436.2023.2170975>.