

**Yerli nikel oksit tozlarının mikrotüp katı oksit yakıt pillerinde kullanımı****Utilization of domestic nickel oxide powders in microtubular solid oxide fuel cells****Çiğdem Timurkutluk^{1,*}, Gülşah Germen Tutaş², Ahmet Alp Süneçli³, Bora Timurkutluk⁴****Ercin Demirboğa⁵, Orhan Yılmaz⁶, Nuray Demirel⁷**¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Disiplinlerarası Enerji Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı, 51240, Niğde Türkiye² Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Endüstriyel Hammaddeler ve Yapı Malzemeleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, 51240, Niğde Türkiye^{3,4} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye^{1,2,3,4} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi, 51240, Niğde, Türkiye^{5,6,7} Meta Nikel Kobalt Madencilik A.Ş., 45750, Manisa, Türkiye**Öz**

Bu çalışmada, katı oksit yakıt pili (KOYP) için mikrotüp anot destek yapıları, ticari ve yerli kaynaklı çeşitli nikel oksit (NiO) tozları kullanılarak üretilmiştir. Literatürde yaygın olan ekstrüzyon yönteminden farklı olarak, destek yapılar şerit döküm, sarım ve izostatik presleme adımlarını içeren alternatif bir yöntemle imal edilmiştir. Diğer katmanlar, tam hücre oluşturmak üzere daldırma kaplama yöntemiyle uygulanmıştır. Elektrokimyasal testler, özel olarak tasarlanmış tek hücreli bir test sistemiyle 800 °C'de gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal analizler ve tozların kimyasal bileşim değerlendirmeleri, hücre performansındaki farklılıkların özellikle anot destek yapısının mikroyapısı, gözeneklilik düzeyi ve kullanılan NiO tozlarının saflık derecesi ve tane boyutuna bağlı olduğunu göstermiştir. Ticari NiO tozları ile üretilen hücre, 0.286 W/cm² ile en yüksek tepe güç yoğunluğunu sergilemiştir. Yerli tozlarla üretilen hücreler arasında ise, %98.01 saflıktaki NiO tozu ile hazırlanan hücre 0.252 W/cm² maksimum güç yoğunluğuna ulaşmıştır. Bu sonuçlar, yerli NiO tozlarının KOYP'lerde anot malzemesi olarak kullanılabilirliğini göstermekte ve önemli bir potansiyele işaret etmektedir.

Anahtar kelimeler: Katı oksit yakıt pili, Anot, Nikel oksit, Yerli üretim**1 Giriş**

Günümüz küresel enerji üretimi büyük ölçüde petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıt temelli kaynaklara dayanmaktadır. Petrol, özellikle ulaşım sektöründe birincil enerji kaynağı olma özelliğini sürdürmekte; kömür elektrik üretiminde, doğalgaz ise hem elektrik hem de ısıtma uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır. Bu kaynaklar, yüksek enerji yoğunlukları ve mevcut altyapılarla uyumlulukları nedeniyle halen enerji sistemlerinin temel bileşenleri arasındadır. Ancak fosil yakıtların bu merkezi rolü, ciddi çevresel ve sosyoekonomik sorunları beraberinde getirmektedir. Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan sera gazları, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin başlıca nedenlerindendir. Ayrıca bu yakıtların çıkarılması, işlenmesi ve taşınması çevresel tahribata, su kaynaklarının

Abstract

In this study, microtubular anode supports for solid oxide fuel cells (SOFCs) are fabricated using various nickel oxide (NiO) powders from both commercial and domestic sources. Unlike the commonly used extrusion method, an alternative process involving tape casting, winding, and isostatic pressing is employed. Additional cell layers are applied via dip-coating to form complete cells for performance testing. Electrochemical tests are conducted at an operating temperature of 800 °C using a custom-designed single-cell test system. Microstructural analyses and chemical assessments reveal that variations in cell performance are mainly due to differences in anode support microstructure, porosity, and the purity and particle size of the nickel oxide powders. The cell fabricated using commercial nickel oxide powders exhibits the highest peak power density of 0.286 W/cm². Among the cells prepared with domestic powders, the highest maximum performance of 0.252 W/cm² is achieved using powder containing 98.01% nickel oxide. These findings highlight the strong potential of domestically produced NiO powders as viable anode materials in solid oxide fuel cells.

Keywords: Solid oxide fuel cell, Anode, Nickel oxide, Domestic production

kirlenmesine, hava kalitesinin düşmesine ve ekosistemlerin bozulmasına yol açarak insan sağlığını ve doğal yaşamı tehdit etmektedir. Fosil yakıt rezervlerinin sınırlı oluşu ve belirli bölgelerde yoğunlaşması, enerji güvenliği açısından jeopolitik riskler yaratmaktadır. Bu nedenle enerji politikaları, sürdürülebilirlik, düşük karbonlu kalkınma ve iklim değişikliğiyle mücadele ekseninde yeniden şekillenmektedir. Birçok ülke, Paris Anlaşması kapsamında küresel sıcaklık artışını 1.5°C ile sınırlama hedefiyle ulusal katkı beyanları (NDC–Nationally Determined Contributions) sunmakta ve yenilenebilir enerjinin payını artırmaya yönelik stratejiler geliştirmektedir. Bu çerçevede karbon fiyatlandırması, emisyon ticaret sistemleri, fosil yakıt sübvansiyonlarının azaltılması ve yenilenebilir enerji yatırımlarına teşvik gibi araçlar uygulanmaktadır. Avrupa

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cigdemtimurkutluk@ohu.edu.tr (Ç. Timurkutluk)

Geliş / Received: 18.06.2025 Kabul / Accepted: 22.07.2025 Yayınlanma / Published: 15.10.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1722135

Birliği'nin "Yeşil Mutabakat" (European Green Deal) girişimi ve 2050'ye yönelik karbon nötr hedefler, enerji dönüşümünü küresel politika gündeminin temel unsurlarından biri hâline getirmiştir. Enerji politikalarının yönü artık sadece çevresel değil; aynı zamanda ekonomik büyüme, istihdam, teknoloji ve enerji güvenliği gibi çok boyutlu hedeflerle birlikte belirlenmektedir.

Bu dönüşüm sürecinde yenilenebilir enerji kaynakları, sürdürülebilir bir enerji sistemine geçişin temel yapı taşlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal gibi kaynaklar, doğrudan karbon salımı oluşturmaksızın enerji üretimi sağlama potansiyeline sahiptir. Özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi, teknolojik gelişmeler sayesinde maliyetlerin önemli ölçüde düşmesiyle birlikte birçok ülkede fosil yakıtlarla rekabet edebilir duruma gelmiştir. Hidroelektrik enerji hâlen en yaygın yenilenebilir kaynak olarak öne çıkarken, rüzgâr ve güneş enerjisi yatırımları hızla artmaktadır. Biyokütle ve jeotermal gibi kaynaklar ise özellikle bölgesel düzeyde önemli tamamlayıcı roller üstlenmektedir. Söz konusu yenilenebilir enerji sistemleri, yalnızca çevresel avantajlar sunmakla kalmamakta; aynı zamanda enerji ithalatına olan bağımlılığı azaltarak enerji güvenliğini artırmakta, yerli sanayinin gelişmesine katkı sağlamakta ve yeni istihdam alanları yaratmaktadır. Fakat bu kaynakların doğası gereği gerek coğrafi konum gerekse de gün içerisindeki hava koşulları veya mevsimsel etkilerle kesinti ve değişkenlik göstermesi enerji depolama, akıllı şebeke sistemleri ve talep yönetimi gibi teknolojilerle desteklenmesini zorunlu kılmaktadır.

Bu noktada hidrojen enerjisi, yenilenebilir enerji sistemlerinin karşılaştığı yapısal sorunlara çözüm sunabilecek stratejik bir enerji taşıyıcısı olarak öne çıkmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisi gibi kesintili ve değişken enerji dönüşüm teknolojilerinden elde edilen fazla elektrik, elektroliz yoluyla suyu parçalayarak yeşil hidrojen üretiminde kullanılabilir. Bu şekilde üretilen hidrojen, uzun süreli ve yüksek kapasiteli enerji depolama imkânı sunarak arz-talep dengesinin sağlanmasına katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda sıkıştırılmış ya da sıvı formda taşınabilir olması, bölgesel üretim fazlalarının enerji ihtiyacı olan bölgelere aktarılmasını mümkün kılar. Bu durum enerji sistemlerinin esnekliği artırmanın yanında, farklı bölgeler arasında enerji ticaretini çeşitlendirilerek enerji güvenliğini güçlendirme potansiyeli de sunmaktadır. Aralarında Türkiye'nin de bulunduğu birçok ülkenin ulusal hidrojen stratejileri ve yol haritalarını oluşturmuş olması da hidrojen enerjisinin sürdürülebilir enerji dönüşümündeki stratejik rolünü açıkça ortaya koymaktadır [1]. Hidrojen, yanma teknolojileriyle yakıt olarak kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülebilse de en yüksek verimlilik doğrudan enerji dönüşümü gerçekleştiren elektrokimyasal cihazlar olan yakıt pili teknolojileriyle mümkün olmaktadır. Özellikle katı oksit yakıt pili (KOYP) yüksek çalışma sıcaklıkları (600-1000 °C) ve bu sayede hem elektrik hem ısı üretme yetenekleri sayesinde, elektrik üretiminde %50'nin üzerinde elektrik dönüşüm verimi sağlayabilmekte ve kojenerasyon uygulamalarıyla toplam enerji verimliliği %70'in üzerine ulaşabilmektedir [2-4].

Diğer yakıt pili teknolojilerinde olduğu gibi, KOYP sistemlerinde de elektrik üretiminin gerçekleştiği temel yapı, yoğun bir elektrolit ve gözenekli anot ve katot elektrot katmanlarından oluşmaktadır. Bu katmanlar birlikte, 'membran elektrot grubu' (MEG) olarak adlandırılmakta olup, KOYP sistemlerinin elektrokimyasal performansını doğrudan belirleyen en kritik bileşenini oluşturmaktadır. Seramik esaslı katı malzemelerden üretilen bu yapı KOYP'lerin farklı hücre geometrilerinde tasarlanmasına olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, en yaygın olarak benimsenen KOYP hücre konfigürasyonları düzlemsel ve tüp tasarımlar olarak öne çıkmaktadır [5-7]. Tüp KOYP'ler, özellikle yüksek termal şok dayanımı ve sızdırmazlık avantajları sayesinde güvenilirlik açısından üstünlük sağlarken, uzun akım toplama yolları nedeniyle düzlemsel hücrelere kıyasla daha düşük güç yoğunlukları sergilemektedir [8-10]. Buna karşılık, düzlemsel KOYP tasarımları; daha basitleştirilmiş ve modüler üretim süreçleri, azaltılmış üretim maliyetleri ve daha yüksek güç yoğunluklarına ulaşabilen kompakt hücre mimarileri gibi önemli avantajlar sunmaktadır [11-13]. Ancak, düzlemsel konfigürasyonlar genellikle daha düşük mekanik dayanım göstermekte olup, özellikle termal genleşme farklarından kaynaklanan stresler nedeniyle uzun vadeli dayanıklılığı olumsuz etkileyebilecek termal yönetim zorluklarıyla karşı karşıya kalmaktadır. Bu yönleriyle her iki geleneksel hücre tasarımı da performans, güvenilirlik, maliyet etkinliği ve sistem entegrasyon potansiyeli açısından çeşitli sınırlamalar içermekte olup, özellikle sabit uygulamalar için daha uygun bir çözüm sunmaktadır [14]. 1990'lı yıllarda, mikrotüp KOYP konsepti literatürde ilk kez ortaya konmuştur [15]. Tüp hücre tasarımının minyatürize edilmiş bir versiyonu olarak değerlendirilebilen mikrotüp KOYP'ler, 5 mm'nin altındaki çapları sayesinde düzlemsel hücrelerin sunduğu yüksek güç yoğunluğu ile tüp hücrelerin sahip olduğu hızlı başlatma ve yüksek termal dayanım avantajlarını bir arada sunmaktadır. Bu durum KOYP teknolojilerinin mobil uygulamadaki kullanımının önünü açmıştır [16-19].

Geometriden bağımsız olarak KOYP'lerde MEG bileşenlerinden birisi genellikle birincil mekanik destek görevi görmesi için diğerlerinden önemli ölçüde daha kalın üretilmektedir. Bu kapsamda KOYP'ler destek katmana göre elektrolit destekli veya elektrot destekli hücreler olarak sınıflandırılmaktadır. Elektrolit destekli tasarım yüksek kimyasal kararlılık, uzun ömür ve yoğun elektrolit tabakası sayesinde yüksek mekanik dayanım sunmaktadır [20-22]. Öte yandan, elektrolit destekli KOYP'lerdeki temel zorluk, yeterli iyonik iletkenliği ve dolayısıyla kabul edilebilir elektrokimyasal performansı sağlamak için oldukça yüksek çalışma sıcaklıkları (~1000 °C) gerektiren elektrolit tabakasının yüksek kalınlığıdır [23-25]. Kalın gözenekli bir elektrot desteğinin kullanımıyla ilişkili kütle taşıma sınırlamalarına rağmen, anot veya katot destekli MEG tasarımları elektrolitin önemli ölçüde azaltılmış kalınlığı nedeniyle gelişmiş performans göstermektedir [26-28]. Ancak, tipik olarak, KOYP katotları elektrolit ve anot katmanlarından nispeten daha düşük sinterleme sıcaklıklarına ihtiyaç duymaktadır. Bu durum, hücreyi bir katot desteği üzerine inşa ederken katodun gözenekli

mikroyapısının bütünlüğünün korunmasında önemli zorluklara yol açmaktadır. Bu kendinden destekli MEG yapılandırmalarına ek olarak, gözenekli tabaka destekli ve metal destekli gibi harici destekli tasarımlar da KOYP'lerde kullanılmaktadır. Ancak, bu tasarımlar MEG malzemesinden farklı bir destek malzemesi kullandıkları için daha karmaşık olup maliyetli üretim gerektirmekte ve destek yapılarının ek gereksinimleri nedeniyle gaz iletimi kısıtlanabilmektedir [29-31]. Bu nedenle, anot destekli tasarım mikrotüp geometri de dahil olmak üzere KOYP'ler için en yaygın kullanılan MEG yapılandırması olarak dikkat çekmektedir [32-34].

Oksijen iyonu iletken elektrolit teknolojisini kullanan ve hidrojenle çalışan tipik bir KOYP'de anot elektrokimyasal reaksiyonu dikkate alındığında ($2H_2 + 2O^{2-} \rightarrow 2H_2O + 4e^-$), reaksiyonların etkin bir şekilde gerçekleşebilmesi için oksijen iyonu iletkenliği, elektron iletkenliği ve hidrojen gazının aynı anda bulunması gerekmektedir. Bu bağlamda, elektrokimyasal reaksiyonların, üçlü faz sınırı (ÜFS) olarak adlandırılan oksijen iyon iletken faz, elektron iletken faz ve gaz fazının kesişim bölgelerinde gerçekleşmesi beklenmektedir. Bu kapsamda ÜFS'lerin uzunluğu ve yoğunluğu, anot reaksiyonlarının gerçekleşebileceği aktif elektrokimyasal bölgeleri belirlediğinden, KOYP hücre performansını doğrudan etkileyen temel parametreler arasında yer almaktadır. Nikel, yüksek katalitik aktivitesi ve maliyet etkinliği nedeniyle, KOYP'lerde en yaygın kullanılan anot katalizörü olarak dikkat çekmektedir [35-37]. Bu nedenle, literatürde nikel bazlı KOYP anotlarına yönelik malzeme geliştirme, mikroyapı tasarımı, üretim yöntemleri, kararlılık ve degradasyon mekanizmaları gibi çeşitli konularda çok sayıda deneysel çalışma bulunmaktadır [38-47]. Öte yandan, üretim süreci sonrasında nikel genellikle nikel oksit (NiO) formunda bulunmaktadır. Bu nedenle, KOYP'ler devreye alınmadan önce, NiO'nun metalik nikel (Ni) fazına indirgenmesi gerekmektedir. Bu indirgeme işlemi, nikelin katalitik olarak aktif hale gelmesini ve elektrot içerisinde gerekli elektronik iletkenliğin sağlanmasını mümkün kılmaktadır. Fakat nikel önemli bir oksijen iyon iletkenliği göstermemektedir. Bu noktada, oksijen iyonlarının anot elektrokimyasal reaksiyonlar için gerekli olduğu dikkate alındığında, nikelin tek başına anot olarak kullanılması durumunda elektrokimyasal aktivite yalnızca anot-elektrolit arayüzleriyle sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle, KOYP anot elektrotları, nikel bir miktar elektrolit malzemesi katılarak kompozit yapılar olarak üretilmektedir. Böylece iyonik iletkenlik tüm elektrot hacmine aktararak ÜFS'lerin yoğunluğu artırılmakta ve elektrokimyasal performans geliştirilmektedir. Bu bağlamda, itriyum oksit ile stabilize edilmiş zirkonyum oksit (YSZ), hem yoğun elektrolit hem de anot bileşeni olarak KOYP'lerde sıklıkla elektrolit malzemesi olarak kullanılmaktadır.

KOYP anot katalizörü olmasının yanında farklı teknolojik malzemeler ve endüstriyel alanlar için vazgeçilmez bir metal olan nikel, doğada sülfür ve laterit olarak bulunmaktadır ve birçok ülkede kritik cevher olarak kabul edilmiştir [48,49]. Dünyada tespit edilen nikel rezervlerinin %75'i laterit olarak bulunmaktadır ve birincil

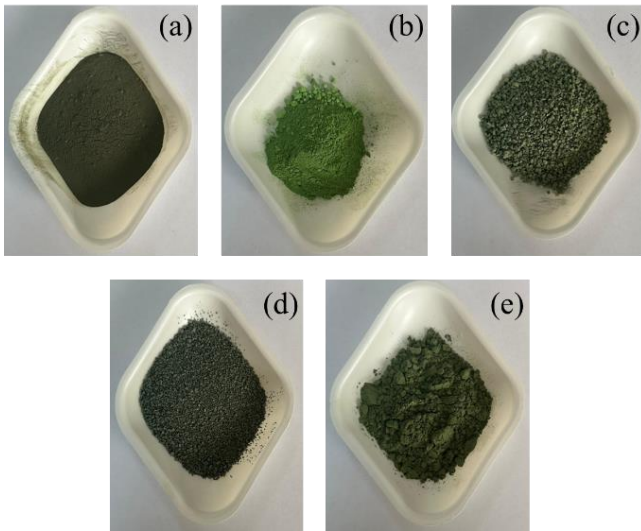
nikel üretiminin neredeyse yarısı laterit kaynaklardan sağlanmaktadır [50]. Nikel lateritler, tropikal ve subtropikal koşullar altında mafik ve ultramafik kayaların kimyasal ve fiziksel aşınmasıyla oluşan süperjen ürünler olup ve genellikle ekvator'dan 22 derece enlem kuşakları arasında yayılım göstermektedir [51]. Ülkemizin jeolojik konumu sebebiyle Anadolu'nun çok farklı yerlerinde hem lateritik hem sülfid tip nikel cevherleşmesi tespit edilmiştir. Son yıllarda kurulan tesislerle ülkemizde nikel üretiminin yapıldığı da bilinmektedir [48]. Fakat ülkemizde geliştirme aşamasında olan ve gelecek vaat eden yüksek saflıkta nikel eldesi faaliyetleri, nikelin kullanım alanının çok geniş olması ve kaynaklarının tükenmesi nedeni ile büyük önem arz etmektedir [52].

Bu çalışma ile yerli kaynaklardan elde edilen ve ülkemizde geliştirilen NiO tozlarının, KOYP gibi elektrokimyasal enerji dönüşüm sistemlerinde anot katalizörü olarak kullanılabilirliği detaylı biçimde araştırılmıştır. Çalışmanın özgünlüğü, literatürde yaygın olarak kullanılan ithal ticari NiO tozları yerine, tamamen yerli üretim nikel tozlarının KOYP anot yapılarında kullanılması ve bu tozların mikroyapısal özellikleri ile elektrokimyasal performansa etkisinin sistematik olarak değerlendirilmesinde yatmaktadır. Elde edilen sonuçlar, hem ülkemizde üretilen nikel hammaddesinin ileri enerji teknolojilerinde değerlendirilmesine yönelik bilimsel bir temel oluşturmakta hem de bu alanda dışa bağımlılığın azaltılmasına katkı sunacak uygulamalı çıktılar sağlamaktadır. Ayrıca, yerli nikel tozlarının KOYP uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılması durumunda, söz konusu malzemelerin yalnızca yakıt pilleriyle sınırlı kalmayıp elektrolizörler, bataryalar ve katalitik sistemler gibi diğer enerji teknolojilerinde de değerlendirilebilme potansiyeli ortaya konmaktadır. Bu kapsamda çalışma, yüksek katma değerli teknolojik ürünlerin yerli girdilerle üretimini destekleyerek sürdürülebilir kaynak kullanımı, stratejik madencilik politikaları ve döngüsel ekonomi ilkeleriyle doğrudan ilişkili özgün ve yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

2 Deneysel çalışma

Meta Nikel Kobalt Madencilik A.Ş. tarafından geliştirilen yerli üretim dört farklı nikel oksit tozu (N1-N4) kullanılarak mikrotüp anot destekler ve bu anot destekler üzerine inşa edilmiş mikrotüp KOYP hücreleri (H1-H4) imal edilmiştir. Söz konusu nikel oksit tozları, nikel içeriğine sahip lateritik cevherlerin işlenmesiyle elde edilen karışık hidroksit çökeltisi ara ürünlerinden türetilmiştir. Oksidatif asit liç prosesi sonucunda nikel içeren solüsyonlar elde edilmiş olup liç aşamasında önemli ölçüde safsızlıklardan arındırılan bu çözeltiler, ikincil saflaştırma süreçlerine tabi tutulmuştur. Takip eden kalsinasyon işlemi sonucunda nihai nikel oksit ürünleri elde edilmiştir. Bununla birlikte, safsızlık giderimi tam anlamıyla gerçekleştirilemeyen ve özellikle alüminyum ve çinko gibi elementlerin iz miktarda kaldığı bazı çözeltilerden de ürünler elde edilerek, bu safsızlıkların nihai ürün performansına olan etkileri değerlendirilmek istenmiştir. Karşılaştırmalı performans değerlendirmeleri yapılabilmesi amacıyla, Novamet firmasından (NiO-A, New

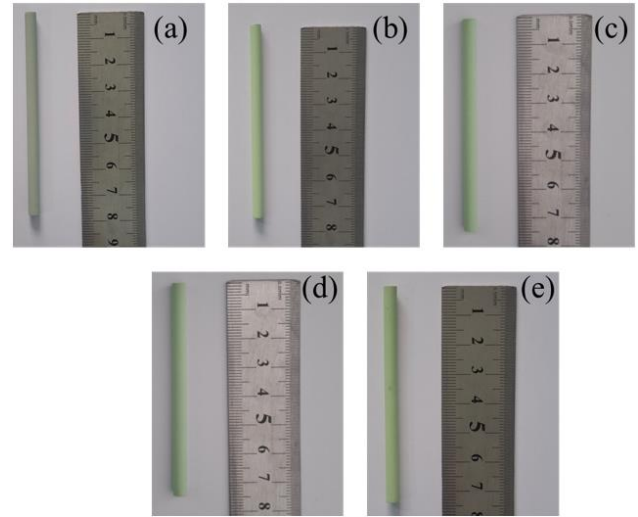
Jersey, ABD) ithal edilen ticari nikel oksit tozu (TN) ile aynı geometrik özelliklere sahip anot destek mikrotüpler ve KOYP hücreleri de ayrıca imal edilmiştir. Ancak, **Şekil 1**'de gösterildiği üzere, kullanılan tozlar birbirinden farklı partikül boyut dağılımlarına sahiptir. Özellikle N3 ve N4 numaralı tozların granüler morfolojide (iri taneli) oldukları tespit edilmiştir. Bu nedenle, toz boyutunun elde edilen anot destek mikroyapısı üzerindeki etkisini ve dolayısıyla elektrokimyasal performansa olan olası yansımalarını azaltmak amacıyla, N3 ve N4 tozları tungsten karbür bilyeler kullanılarak bilyeli değirmende (PM100, Retsch, Almanya) 500 devir/dakika hızında 30 dakika süreyle öğütülmüştür. Diğer tozlar ise mevcut formlarında herhangi bir ön işleme tabi tutulmaksızın üretim sürecine dahil edilmiştir. Tozların parçacık boyutları Mastersizer 3000 (Malvern Panalytical, Birleşik Krallık) ile ölçülmüştür. Kimyasal içeriklerinin belirlenmesi için X-ışını floresans spektroskopisi (XRF) analizleri gerçekleştirilmiştir (Zetium, Malvern Panalytical).



Şekil 1. Ticari ve yerli üretim nikel oksit tozları: (a) N1, (b) N2, (c) N3, (d) N4 ve (e) TN

Anot destek mikrotüplerin üretiminde literatürün aksine ekstrüzyon yöntemi yerine şerit döküm, sarım ve izostatik presleme yöntemleri kullanılmıştır. Bu doğrultuda öncelikle uygun bir şerit döküm çamuru hazırlanması için ön hazırlık işlemleri tamamlanan nikel oksit tozların her biri yüksek yoğunluklu polietilen şişeler içerisine alınarak YSZ (Tosoh, Tokyo, Japonya) elektrolit tozları ile ağırlıkça sırası ile %66:34 oranında karıştırılmıştır. Dağıtıcı olarak balık yağı (Sigma-Aldrich, Münih, Almanya), plastikleştirici olarak polietilen glikol (Sigma-Aldrich), bağlayıcı olarak butvar (Sigma-Aldrich) ve çözücü olarak yüksek saflıkta metil etil keton ve etanol (her ikisi de Sigma-Aldrich) karışımı şişelere eklenmiştir. Elde edilen solüsyonlar zirkonyum bilyeler eşliğinde 120 devir/dakika hızda 24 saat boyunca karıştırılarak homojenize edilmiştir. Şerit döküm için istenilen viskoziteye ulaştırılması için manyetik karıştırıcıda karıştırılan döküm çamurları daha sonra doctor blade yüksekliği 300 µm olarak ayarlanan bir şerit döküm cihazında (L-Series, Keko Equipment, Slovenya) 9 cm

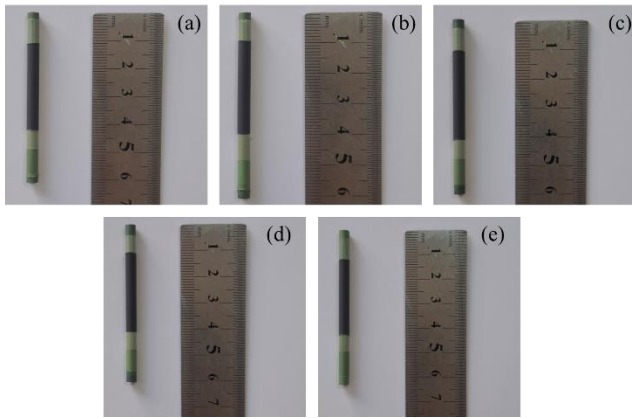
genişlikte dökülmüştür. Atmosferik koşullarda 30 dakika süreyle kurumaya bırakılan şeritler 17.5 cm uzunluğunda küçük parçalara kesilmiştir. Her bir şerit, çapı 4 mm olan çelik millerin etrafına sarıldıktan sonra bir izostatik pres cihazında (ILS-66S, Keko Equipment) millerle birlikte 70 MPa basınç ve 60°C sıcaklıkta 4 dakika süreyle lamine edilmiştir. Pres işleminden sonra miller uzaklaştırılarak farklı nikel oksit tozlarla üretilmiş mikrotüp anot destekler elde edilmiştir. Lazer cihazı ile 8 cm uzunluğuna sahip olacak şekilde her iki ucundan kısaltılan anot destek mikrotüpler 1100°C sıcaklıkta 2 saat süreyle bir ön sinterleme işlemine tabii tutulmuştur. Ticari nikel oksit tozları kullanılarak üretilen anot destek mikrotüp TAD olarak isimlendirilirken yerli nikel oksit tozlarıyla hazırlanan mikrotüp anot destekler ise toz isimlendirmesine benzer şekilde AD1-AD4 olarak adlandırılmıştır. Ön sinterleme aşaması sonrasında mikrotüp anot destek fotoğrafları **Şekil 2**'de verilmiştir.



Şekil 2. Ön sinterleme aşaması sonrası mikrotüp anot destekler: (a) AD1, (b) AD2, (c) AD3, (d) AD4 ve (e) TAD

Anot işlevsel tabaka, elektrolit, katot işlevsel tabaka ve katot akım toplayıcı tabaka olmak üzere diğer hücre bileşenleri ise daldırma kaplama yöntemi kullanılarak verilen sırada üretilmiştir. Bu kapsamda, hazırlanan bütün kaplama solüsyonları ilgili katı tozlara göre ağırlıkça %30 oranında bir inceltici (HVS 100, Heraeus, Hanau, Almanya), ağırlıkça %10 oranında bir bağlayıcı (5005, Heraeus) ve ağırlıkça %80 oranında etanol çözücü (Sigma-Aldrich) eklenmesiyle hazırlanmıştır. Solüsyonlar, zirkonyum bilyeler eşliğinde 120 devir/dakika hızda 24 saat boyunca bilyeli değirmende karıştırılmış ve daha sonra üç millli bir değirmende (EXAKT Technologies, Inc., Oklahoma, ABD) homojenize edilmiştir. Kaplama işlemleri bir daldırma kaplama cihazı (L2006A1, Ossila, Birleşik Krallık) kullanılarak 10 mm/sn'lik daldırma hızı, 5 saniyelik bekleme süresi ve 10 mm/sn'lik geri çekme hızı altında gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak ağırlıkça %50-%50 NiO (NiO-F, Novamet) ve YSZ tozları içeren süspansiyon anot destek üzerine kaplanmıştır. 1200 °C'de 2 saat süreyle gerçekleştirilen bir ön sinterleme sonrası YSZ

elektrolit tabakası, benzer kaplama parametreleriyle anot işlevsel tabaka üzerine uygulanmıştır. Anot ve elektrolit tabakalarının 1400 °C’de 2 saat süreyle sinterlemesini takiben LSM((La_{0.80}Sr_{0.20})_{0.95}MnO_{3-x}; LSM20-HP, Nexceris, Ohio, ABD)-YSZ (ağırlıkça %40-%60) katot işlevsel tabaka ve LSM (LSM20-P, Nexceris)-YSZ (ağırlıkça %90-%10) katot akım toplama tabakaları benzer şekilde kaplanmıştır. ~3 cm uzunluğunda kaplanan katot katmanlarının 1000 °C’de 2 saat süreyle birlikte sinterlenmesinin ardından hücreler test aşamasına hazır hale getirilmiştir. Hücrelerin mikroyapıları bir taramalı elektron mikroskobunda (Carl Zeiss, Evo 40, Almanya) incelenmiştir. Üretimi tamamlanan anot destekli mikrotüp KOYP hücrelerine ilişkin fotoğraflar Şekil 3’te sunulmuş olup hücreler önceki isimlendirmelere benzer şekilde TH ve H1-H4 olarak adlandırılmıştır.



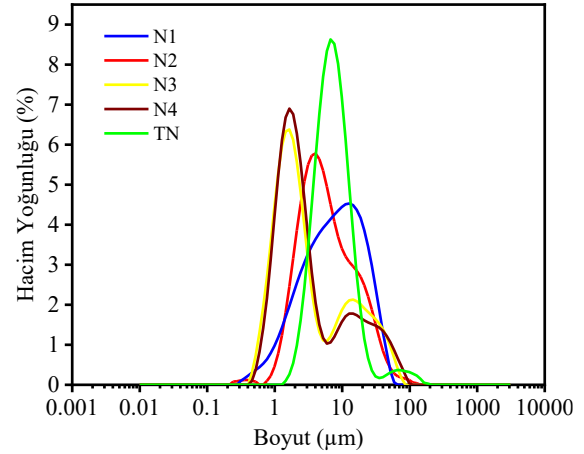
Şekil 3. Nihai mikrotüp hücreler: (a) H1, (b) H2, (c) H3, (d) H4 ve (e) TH

Hücrelerin elektrokimyasal performans ölçümleri bir test istasyonu (Arbin Instruments, FCTS, Teksas, ABD) yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda üretilen akımın toplanması için katot bölgelerinin üzerine 45 cm, anot bölgesinin üzerine ise 30 cm uzunluğunda 0.5 mm çapa sahip gümüş teller sarılmıştır. Mikrotüp hücreler Crofer 22 APU (Thyssen Krupp, Essen, Almanya) malzemeden üretilen ve hücre yuvaları işlenmiş iki manifold arasına yerleştirilmiştir. Gerek sızdırmazlık sağlanması gerekse de hücrelerin montajı için Ceramabond™ 571 yüksek sıcaklık seramik yapıştırıcı (Aremco, ABD) kullanılmış ve bu sayede mikrotüp hücreler manifold yuvalarına sabitlenmiştir. Montajlanan yapı daha sonra bir fırın içerisine alınarak seramik yapıştırıcının üretici reçetesine uygun olarak ~93 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle kürlenmesi gerçekleştirilmiştir. Performans testleri için fırın 800 °C sıcaklığa ısıtılmış ve ölçümler öncesinde anot bölgesi 0.3 NL/dk debi ile beslenen hidrojen gazı altında 1 saat boyunca indirgenmiştir. Bu işlemin ardından hücre performansları aynı hidrojen debisi ve sıcaklıkta ölçülmüştür. Açık katot tasarımına sahip tek hücre test sistemine ek bir oksitleyici beslenmemiş olup fırın içerisindeki durağan havadan faydalanılmıştır.

3 Bulgular

Anot destek imalatında kullanılan tozların parçacık boyutu dağılımları Şekil 4’te verilmiştir. Öğütme işlemi

sonrasında N3 ve N4 tozlarının D90 partikül dağılımlarının diğer yerli tozlara yaklaştırıldığı Tablo 1’den açıkça anlaşılmaktadır. Fakat bu tozların D50 boyutlarının ticari TN de dahil diğer tozlara nazaran daha ince olduğu dikkat çekmektedir. Hücrelerin 800 °C sıcaklıktaki performans sonuçları ise Şekil 5’te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

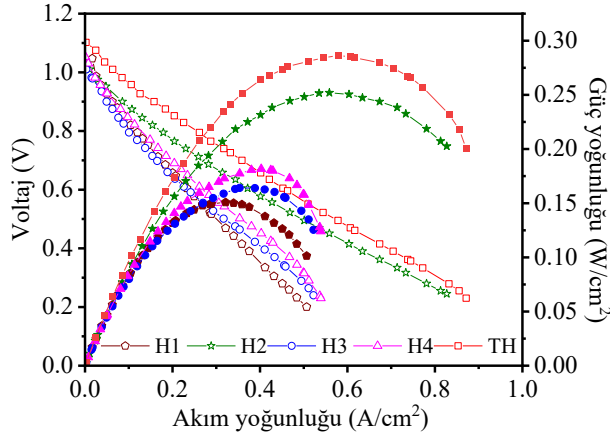


Şekil 4. Ticari ve yerli nikel oksit tozlarının parçacık boyutu dağılımları

Tablo 1. İthal ve yerli üretim nikel oksit tozlarının parçacık boyutları

Tozlar	Öğütme koşulları		Partikül büyüklükleri (µm)		
	Hız (devir/dakika)	Süre (dakika)	D10	D50	D90
N1	-	-	1.78	8.17	27.2
N2	-	-	2.05	5.59	23.7
N3	500	30	0.973	2.39	26.7
N4	500	30	1.05	2.41	28.1
TN	-	-	3.62	7.53	16.7

Performans sonuçları incelendiğinde ticari olarak temin edilen nikel oksit tozu ile üretilen TH hücresinin maksimum güç yoğunluğunun 0.286 W/cm² olduğu görülmektedir. Diğer taraftan yerli nikel oksit tozları ile üretilen hücrelerin tepe güç yoğunlukları ise 0.151 W/cm²-0.252 W/cm² arasında değişmektedir. Bu hücreler arasında 0.252 W/cm² ile en yüksek maksimum maksimum güç yoğunluğu N2 tozlarından üretilmiş anot desteğe sahip olan H2’den, 0.151 W/cm² değerindeki en düşük tepe güç yoğunluğu ise N1 tozlarından üretilmiş anot desteğe sahip olan H1 hücresinden elde edilmiştir. Öte yandan özellikle H2 hücresinin TH ile oldukça yakın olan performans sonuçları sergilemesi, yerli tozların potansiyelinin son derece ümit verici olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5. Ticari ve yerli üretim NiO tozlarıyla üretilen mikrotüp hücrelerinin 800 °C sıcaklıktaki performansları

Tablo 2. Ticari ve yerli üretim nikel oksit tozlarının XRF analiz sonuçları

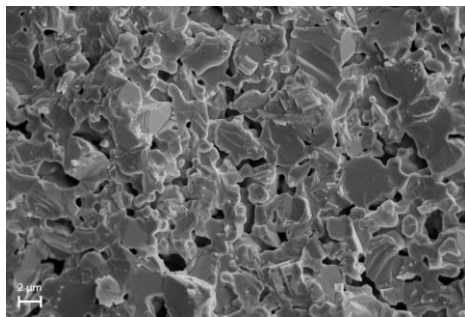
	C1 %	C2 %	C3 %	C4 %	CT %
Na ₂ O	0.38	-	0.08	0.446	-
MgO	0.019	-	-	0.037	-
Al ₂ O ₃	0.073	0.531	0.022	0.035	0.043
SiO ₂	2.689	0.978	0.282	0.365	0.094
P ₂ O ₅	0.013	0.032	1.569	1.441	-
SO ₃	0.2	0.249	0.049	0.313	-
CaO	0.111	0.151	0.07	-	0.149
Cr ₂ O ₃	130.9 (PPM)	-	-	-	0.001
Fe ₂ O ₃	0.026	0.035	0.025	0.025	0.005
NiO	96.37	98.01	97.76	97.10	99.64
CuO	0.108	0.006	0.094	0.107	0.003
K ₂ O	-	-	-	-	-
ZnO	-	-	0.051	0.041	-
Cl	-	-	-	0.011	-
PbO	-	-	-	-	0.04

KOYP anot veya katot elektrotlarında meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonların elektrolite yakın bölgelerde yoğun olarak gerçekleştiği bilinmektedir [53-55]. Bu kapsamda anot destekli bir KOYP hücresinde bu çalışmada olduğu gibi daha yüksek anot reaksiyon bölgelerinin sağlanması için anot destek ve elektrolit arasına ince tozlardan hazırlanmış ek bir katman olan anot işlevsel tabaka

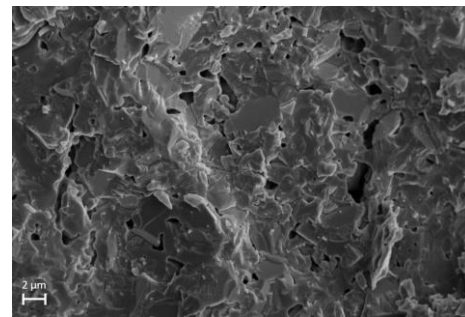
yerleştirilmektedir. Bu doğrultuda her ne kadar anot elektrokimyasal reaksiyonlarının bu işlevsel tabakada meydana geldiği değerlendirilse de tepkime gazı, yan ürün olarak buhar ve üretilen elektronlar anot destek tabakasından aktarılmaktadır. Bu tabakadaki gaz veya elektron transfer yollarındaki herhangi bir kesinti, anot fonksiyonel tabakasındaki ÜFS'lerin inaktivasyonu nedeniyle önemli bir performans kaybına yol açabileceği için bu durum anot desteği anot işlevsel tabaka kadar önemli kılmalıdır. Hücrelerin destek tabakası hariç diğer tabakalarının aynı olduğu değerlendirildiğinde performans değişimlerinin anot destek tabakası üretiminde kullanılan nikel oksit toz içeriği, nihai anot destek mikroyapısı ve dolayısı buna bağlı olarak anot desteğin gözeneklilik ve elektronik iletkenliği ile değiştiği sonucuna varılabilir. Bu nedenle tozların içerikleri XRF analizleri ile anot desteklerin mikroyapıları ise taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

Gerçekleştirilen XRF analizleri, yerli tozlar arasında N2 tozunun diğerlerine kıyasla %98.01 ile en yüksek nikel oksit oranına sahip olduğunu göstermiştir (Tablo 2). Bu durum elektronik iletkenlik açısından değerlendirildiğinde H2 hücresinin sergilediği en yüksek performansı doğrulamaktadır. Benzer şekilde yerli tozlar kullanılarak hazırlanan hücreler arasında %96.369 ile en düşük nikel oksit içeriğine sahip olan N1 tozu ile hazırlanan H1 hücresi de en düşük performansı ortaya koymuştur. N1 tozunun en yüksek oranda elektronik yalıtkan olan SiO içeriği bu noktada özellikle ön plana çıkmaktadır.

Şekil 6-a ve 6-b'de verilen anot desteklerin üretim sonrası (indirgenme öncesi) mikroyapıları incelendiğinde, her bir anot desteğin beklenildiği gibi başlangıç toz boyutu ve bileşimine bağlı olarak farklı mikroyapılar ortaya koyduğu görülmektedir. Özellikle ticari tozlarla hazırlanan TAD hariç diğer tüm AD1-AD4 anot desteklerin daha yoğun bir yapıda oldukları dikkat çekmektedir. Bu durum; her ne kadar KOYP çalışması öncesinde gerekli olan ve nikel oksidin metalik nikel indirgenmesi prosesi sonrasında oluşan hacim küçülmesi nedeniyle gözeneklilik artıyor olsa da AD1-AD4'in nihai gözenekliliğinin yine TAD'a göre düşük kalacağına işaret etmektedir. Bu nedenle H1-H4 hücrelerinin nispeten düşük performansları, anot destekteki düşük nikel içeriklerinin yanında gaz geçişini sınırlandıran düşük anot destek gözenekliliğinden de kaynaklanmaktadır.

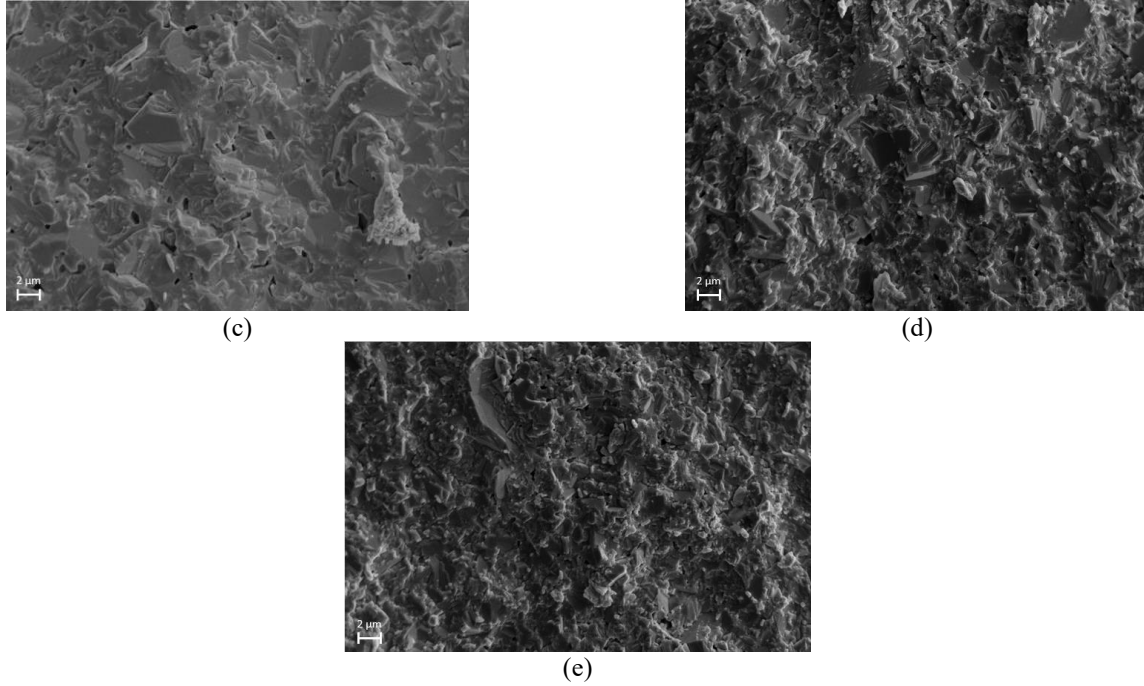


(a)



(b)

Şekil (6-a). Mikrotüp anot desteklerin mikroyapıları: AD1 (a), AD2 (b), AD3 (c), AD4 (d) ve TAD (e)



Şekil (6-b). Mikrotüp anot desteklerin mikroyapıları: AD1 (a), AD2 (b), AD3 (c), AD4 (d) ve TAD (e)

Bu durumun önüne gaz geçişleri iyileştirmek adına ilgili anot destek çamuruna gözenek yapıcı malzeme eklenmesi ile geçilebilir. Öte yandan yerli nikel oksit tozları içerisinde de yer alan Al_2O_3 , MgO , CaO ve Fe_2O_3 gibi malzemeler, hali hazırda KOYP'lerde çok düşük miktarlarda katkılanarak sinterlemeye yardımcı malzemeler olarak sinterleme sıcaklığını düşürmede kullanılmaktadır [56-58]. Bu kapsamda, AD1-AD4'te tespit edilen düşük gözenekliliğin bu durumdan kaynaklanabileceği de değerlendirilmiştir. Ayrıca, anot işlevsel tabakanın anot destek üzerine kaplandığı dikkate alındığında anot destek mikroyapısı ve özellikle gözenekliliği anot işlevsel tabakanın tutunması açısından da önemli olmaktadır. Bu nedenle performans değişimlerinin bir diğer sebebi olarak anot destek ve anot işlevsel tabaka arasındaki arayüzey yapısı da ön plana çıkmaktadır. Fakat ifade edilen bu durumların empedans ve detaylı yapısal ve mikroyapısal analizler ile doğrulanması gerekmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, mikrotüp KOYP'lerde anot destek olarak yerli nikel oksit tozlarının kullanılabilirliği ve performansa etkisi deneysel olarak değerlendirilmiştir. Şerit döküm, sarım ve izostatik presleme tekniklerinin entegrasyonu ile üretilen anot destekler kullanılarak hücreler imal edilmiş ve mikroyapı ve elektrokimyasal incelemeler gerçekleştirilmiştir. En yüksek performans, yüksek saflıktaki (%98.01) yerli toz ile hazırlanan hücrede elde edilmiş olup bu sonuç, malzeme saflığı ile elektrotun iletkenliği arasında doğrudan bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Üstelik bu hücre ticari nikel oksit tozlarından üretilen anot desteğe sahip hücreden sadece ~%12 daha düşük bir maksimum güç yoğunluğu sergilemiştir. Diğer düşük performans sergileyen hücrelerde ise düşük gözeneklilik, düşük nikel içeriği ve katkı elementlerinin sinterleme davranışına etkileri

belirleyici olmuştur. Bu bağlamda, yerli tozların uygun ön işleme ve formülasyon optimizasyonları ile ticari alternatifler kadar başarılı anot destek yapıları sağlayabileceği sonucuna varılmıştır. İlerleyen çalışmalarda, anot destek gözenekliliğinin artırılmasına yönelik gözenek yapıcı katkıların kullanımı ile elektrokimyasal performansın daha da iyileştirilebileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca, anot destek-fonksiyonel tabaka arayüzeyinin yapısal ve mikroyapısal analizleri, hücre tasarımının daha ileri seviyeye taşınmasında kilit rol oynayacaktır. Öte yandan, yerli nikel oksit tozları ile üretilen mikrotüp hücrelerin uzun vadeli performansı, faz kararlılığı ve redoks dayanımının da empedans analizleri ile birlikte ayrıntılı olarak araştırılması gerekmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] J. Incer-Valverde, J. Mörsdorf, T. Morosuk and G. Tsatsaronis, Power-to-liquid hydrogen: Exergy-based evaluation of a large-scale system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(31), 11612-11627, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.026>.
- [2] Q. Xu, Z. Guo, L. Xia, Q. He, Z. Li, I. T. Bello, K. Zheng and M. Ni, A comprehensive review of solid oxide fuel cells operating on various promising alternative fuels. *Energy Conversion and Management*, 253, 115175, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconm.2021.115175>.
- [3] K. A. Kuterbekov, A. V. Nikonov, K. Z. Bekmyrza, N. B. Pavzderin, A. M. Kabyshev, M. M. Kubenova, G. D. Kabdrakhimova and N. Aidarbekov, Classification of

- Solid Oxide Fuel Cells. *Nanomaterials*, 12(7), 1059, 2022. <https://doi.org/10.3390/nano12071059>.
- [4] M. F. Vostakola and B. A. Horri, Progress in Material Development for Low-Temperature Solid Oxide Fuel Cells: A Review. *Energies*, 14(5), 1280, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14051280>.
- [5] R. Chen, Y. Gao, J. Gao, H. Zhang, M. Motola, M. B. Hanif and C.X. Li, From concept to commercialization: A review of tubular solid oxide fuel cell technology. *Journal of Energy Chemistry*, 97, 79-109, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2024.05.026>.
- [6] M. Z. Khan, A. Iltaf, H. A. Ishfaq, F. N. Khan, W. H. Tanveer, R. H. Song, M. T. Mehran, M. Saleem, A. Hussain and Z. Masaud, Flat-tubular solid oxide fuel cells and stacks: a review. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 9(3), 745-770, 2021. <https://doi.org/10.1080/21870764.2021.1920135>.
- [7] J. Wang, Y. Zhao, J. Yang, J. Sang, A. Wu, J. Wang, W. Guan, L. Jiang and S. C. Singhal, Understanding thermal and redox cycling behaviors of flat-tube solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(57), 21886-21897, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.062>.
- [8] D. Chen, Y. Xu, B. Hu, C. Yan and L. Lu, Investigation of proper external air flow path for tubular fuel cell stacks with an anode support feature. *Energy Conversion and Management*, 171, 807-814, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.036>.
- [9] S. Z. Golkhatmi, M. I. Asghar and P. D. Lund, A review on solid oxide fuel cell durability: Latest progress, mechanisms, and study tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 1-34, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112339>.
- [10] O. Corigliano, L. Pagnotta, and P. Fragiaco, On the Technology of Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Energy Systems for Stationary Power Generation: A Review. *Sustainability*, 14(22), 15276, 2022. <https://doi.org/10.3390/su142215276>.
- [11] L. S. Mahmud, A. Muchtar and M. R. Somalu, Challenges in fabricating planar solid oxide fuel cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 105-116, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.019>.
- [12] Z. Zakaria, Z. A. Mat, S. H. Abu Hassan and Y. B. Kar, A review of solid oxide fuel cell component fabrication methods toward lowering temperature. *International Journal of Energy Research*, 44(2), 594-611, 2020. <https://doi.org/10.1002/er.4907>.
- [13] Q. Zhang, K. Xie, Y. Luo, Y. C. Zhang and W. C. Jiang, Mismatch effect of material creep strength on creep damage and failure probability of planar solid oxide fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(4), 2673-2684, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.185>.
- [14] B. Zhao, Z. Zeng, C. Hao, A. Essaghouri, Y. Qian, W. Zhuge, Y. Wang, Y. Shi and Y. Zhang, A study of mass transfer characteristics of secondary flows in a tubular solid oxide fuel cell for power density improvement. *International Journal of Energy Research*, 46(13), 18426-18444, 2022. <https://doi.org/10.1002/er.8455>.
- [15] K. Kendall, Progress in Microtubular Solid Oxide Fuel Cells. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 7(1), 1-9, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2008.02350.x>.
- [16] B. Hari, J. P. Brouwer, A. Dhir and R. Steinberger-Wilckens, A computational fluid dynamics and finite element analysis design of a microtubular solid oxide fuel cell stack for fixed wing mini unmanned aerial vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(16), 8519-8532, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.170>.
- [17] H. Nakajima and T. Kitahara, Real-time electrochemical impedance spectroscopy diagnosis of the solid oxide fuel cell for marine power applications. *Heat and Mass Transfer*, 54, 2551-2558, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2215-0>.
- [18] J. Van herle, R. Ihringer, N. M. Samme, G. Tompsett, K. Kendall, K. Yamada, C. Wen, T. Kawada, M. Ihara and J. Mizusaki, Concept and technology of SOFC for electric vehicles. *Solid State Ionics*, 132(3-4), 333-342, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(00\)00649-4](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(00)00649-4).
- [19] G. A. Tompsett, C. Finnerty, K. Kendall, T. Alston and N. M. Sammes, Novel applications for micro-SOFCs. *Journal of Power Sources*, 86(1-2), 376-382, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00418-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00418-8).
- [20] X. Tong, A. Li, H. Han, C. Yuan, Y. Zhang, P. Li, L. Wang, C. Dong and Z. Zhan, Electrolyte-supported solid oxide electrochemical cells for versatile operations. *Ceramics International*, 50(24), 54620-54629, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.320>.
- [21] M. Kusnezoff, N. Trofimenko, M. Müller and A. Michaelis, Influence of Electrode Design and Contacting Layers on Performance of Electrolyte Supported SOFC/SOEC Single Cells. *Materials*, 9(11), 906, 2016. <https://doi.org/10.3390/ma9110906>.
- [22] A. Jana, I. Kraleva, J. Schlacher, P. Supancic, A. Egger, E. Bucher and R. Bermejo, Towards high-strength electrolyte-supported solid oxide fuel cells. *Journal of the European Ceramic Society*, 45(2), 116929, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116929>.
- [23] M. Riegraf, I. Bombarda, F. Dömling, T. Liensdorf, C. Sitzmann, N. Langhof, S. Schafföner, F. Han, N. Sata, C. Geipel, C. Walter and R. Costa, Enhancing the Mechanical Strength of Electrolyte-Supported Solid Oxide Cells with Thin and Dense Doped-Ceria Interlayers. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(42), 49879-49889, 2021. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.1c13899>.
- [24] Y. Y. Chen and W. C. J. Wei, Processing and characterization of ultra-thin yttria-stabilized zirconia (YSZ) electrolytic films for SOFC. *Solid State Ionics*, 177(3-4), 351-357, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2005.10.010>.
- [25] D. Saebea, S. Authayanun, Y. Patcharavorachot, N. Chatrattanaewet and A. Arpornwichanop,

- Electrochemical performance assessment of low-temperature solid oxide fuel cell with YSZ-based and SDC-based electrolytes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(2), 921-931, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.09.173>.
- [26] Y. J. Xue, H. Miao, C. R. He, J. X. Wang, M. Liu, S. S. Sun, Q. Wang and W. G. Wang, Electrolyte supported solid oxide fuel cells with the super large size and thin ytterbia stabilized zirconia substrate. *Journal of Power Sources*, 279, 610-619, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.058>.
- [27] K. M. Fashalameh, Z. Sadeghian and R. Ebrahimi, A high-performance planar anode-supported solid oxide fuel cell with hierarchical porous structure through slurry-based three-dimensional printing. *Journal of Alloys and Compounds*, 916, 165406, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165406>.
- [28] J. Lach, K. Zheng, R. Kluczkowski, A. Niemczyk, H. Zhao and M. Chen, Tuning Cu-Content $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Ni}_{1-y}\text{Cu}_y\text{O}_{3-\delta}$ with Strontium Doping as Cobalt-Free Cathode Materials for High-Performance Anode-Supported IT-SOFCs. *Materials*, 15(24), 8737, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15248737>.
- [29] B. Hu, G. Lau, D. Song, Y. Fukuyama and M. C. Tucker, Optimization of metal-supported solid oxide fuel cells with a focus on mass transport. *Journal of Power Sources*, 555, 232402, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232402>.
- [30] Z. Zhang, H. Du, K. Xu, X. Zhang, X. Ma and S. Shuai, Review of the Application of Metal-Supported Solid Oxide Fuel Cell in the Transportation Field. *Automotive Innovation*, 1-29, 2025. <https://doi.org/10.1007/s42154-024-00316-w>.
- [31] J. Lee, S. Kang, H. Lee, K. Lee, G. Han, S. Lee, D. H. Peck and J. Bae, Development of metal-supported solid oxide fuel cells with a thin-film electrolyte under an oxidizing atmosphere. *Journal of Power Sources Advances*, 33, 100177, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.powera.2025.100177>.
- [32] A. A. Solov'yev, A. V. Shipilova, S. V. Rabotkin, N. M. Bogdanovich and E. Yu. Pikalova, Study of the efficiency of composite $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_3$ -based cathodes in intermediate-temperature anode-supported SOFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(59), 22594-22609, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.011>.
- [33] C. Mendonça, A. Ferreira, and D. M. F. Santos, Towards the Commercialization of Solid Oxide Fuel Cells: Recent Advances in Materials and Integration Strategies. *Fuels*, 2(4), 393-419, 2021. <https://doi.org/10.3390/fuels2040023>.
- [34] N. Mahato, A. Banerjee, A. Gupta, S. Omar, and K. Balani, Progress in material selection for solid oxide fuel cell technology: A review. *Progress in Materials Science*, 72, 141-337, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.pma.2015.01.001>.
- [35] F. R. Bianchi, A. K. Padinjarethil, A. Hagen and B. Bosio, Multiscale analysis of Ni-YSZ and Ni-CGO anode based SOFC degradation: From local microstructural variation to cell electrochemical performance. *Electrochimica Acta*, 460, 142589, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142589>.
- [36] M. Singh, D. Zappa and E. Comini, Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(54), 27643-27674, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.020>.
- [37] Y. Liu, Z. Shao, T. Mori and S. P. Jiang, Development of nickel based cermet anode materials in solid oxide fuel cells – Now and future. *Materials Reports: Energy*, 1(1), 100003, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matre.2020.11.002>.
- [38] A. Bieberle and L.J. Gauckler, Ni-Based SOFC Anodes: Microstructure and Electrochemistry. *International Journal of Materials Research*, 92 (7), 796-802, 2001. <https://doi.org/10.1515/ijmr-2001-0146>.
- [39] Y. Zou, T. Lin, Y. Sun, Z. Chen, C. Guan, Y. Li, S. P. Jiang, N. Ai and K. Chen, Anodic polarization creates an electrocatalytically active Ni anode/electrolyte interface and mitigates the coarsening of Ni phase in SOFC. *Electrochimica Acta*, 391, 138912, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138912>.
- [40] D. Cui, R. Kato, Y. Komatsu, A. Sciazko, B. Wang, Y. Xu, S. Wu, D. Chen, R. Xiao and N. Shikazono, Microstructure evolution of SOFC pure Ni anode with carbon deposition under polarization. *Chemical Engineering Journal*, 511, 161875, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.161875>.
- [41] F. R. Bianchi, A. K. Padinjarethil, A. Hagen and B. Bosio, Multiscale analysis of Ni-YSZ and Ni-CGO anode based SOFC degradation: From local microstructural variation to cell electrochemical performance. *Electrochimica Acta*, 460, 142589, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142589>.
- [42] K. X. Lee, B. Hu, P. K. Dubey, M. R. Anisur, S. Belko, A. N. Aphale and P. Singh, High-entropy alloy anode for direct internal steam reforming of methane in SOFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (90), 38372-38385, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.018>.
- [43] T. Kim, H. J. Kim, D. Go, J. W. Shin, B. C. Yang, G. Y. Cho, T. M. Gür and J. An, Reactive sputtered Ni-SDC cermet alloy anode for low-temperature solid oxide fuel cell. *Journal of Alloys and Compounds*, 924, 166332, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166332>.
- [44] N. H. Hadi, M. R. Somalu, A. A. Samat, A. Muchtar, N. A. Baharuddin and M. Anwar, A review on the preparation of anode materials and anode films for solid oxide fuel cell applications. *International Journal of Energy Research*, 45, 14357-14388, 2021. <https://doi.org/10.1002/er.6763>.
- [45] J. Geng, Q. Guo, J. Pan, B. Chi and J. Pu, Improvement of Fe addition on redox stability of Ni/YSZ composite anode for intermediate temperature solid oxide fuel cell. *Renewable Energy*, 240, 122236, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122236>.

- [46] N. Ahmed, S. Devi, M. A. Dar, S. K. M. Ibrahim, A. Sharma, N. Sharma, S. Paul and S. R. Ahamed, Anode material for solid oxide fuel cell: a review. *Indian Journal of Physics*, 98, 877-888, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12648-023-02860-3>.
- [47] Q. Fu, C. Tian, L. Hun, X. Wang, Z. Li, Z. Liu and W. Wei, Ni agglomeration and performance degradation of solid oxide fuel cell: A model-based quantitative study and microstructure optimization. *Energy*, 289, 129997, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129997>.
- [48] G. Eroğlu ve Y. Z. Akgök, Dünyada ve Türkiye’de Nikel. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, 2018.
- [49] M. Islam and K. Sohag, Mineral import demand and wind energy deployment in the USA: Co-integration and counterfactual analysis approaches. *Mineral Economics*, 36(4), S697-S717, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13563-023-00382-2>.
- [50] A.D. Dalvi, W.G. Bacon and R.C. Osborne, The past and future of nickel laterites. PDAC 2004 International Convention, 7–10 Mart, 2004.
- [51] D. R. Qi, T. G. Lan, Q. Shu, Y. Feng and S. H. Zhou, Nickel enrichment during lateritization of ophiolitic ultramafic rocks: A case study from the Kelurahan Pondidra laterite profile in Sulawesi, Indonesia. *Ore Geology Reviews*, 106140, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106140>.
- [52] M. Elias, Nickel laterite deposits-geological overview, resources and exploitation. *Giant ore deposits: Characteristics, genesis and exploration. CODES Special Publication*, 4, 205-220, 2002.
- [53] M. Kishimoto, H. Iwai, M. Saito and H. Yoshida, Characteristic length of oxide-ion conduction for prediction of active thickness in SOFC anode. *ECS Transactions*, 57(1), 2515, 2013. <https://doi.org/10.1149/05701.2515ecst>.
- [54] G. Cai, Y. Zhang, H. Dai, S. He, L. Ge, H. Chen and L. Guo, Modification of electrode/electrolyte interface by laser micro-processing for solid oxide fuel cell. *Materials Letters*, 195, 232-235, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.02.095>.
- [55] H. Seo, M. Kishimoto, T. Nakagawa, H. Iwai and H. Yoshida, Mechanism of improved electrochemical performance of anode-supported solid oxide fuel cells by mesostructural modification of electrode–electrolyte interface. *Journal of Power Sources*, 506, 230107, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230107>.
- [56] D. Yin, J. Wang, M. Ni, P. Liu, Z. Dong and D. Tang, Fabrication of Highly Transparent Y2O3 Ceramics with CaO as Sintering Aid. *Materials*, 14(2), 444, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14020444>.
- [57] Z. M. Zhang, J. H. Li, Y. N. Liang, Y. Gao and C. X. Li, Yb/Sc Co-doped ZrO2 electrolytes enabled by Al2O3 sintering aid: High conductivity and enhanced stability for solid oxide fuel cells (SOFCs). *International Journal of Hydrogen Energy*, 139, 425-434, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.05.274>.
- [58] Q. Liang, P. Tang, J. Zhou, J. Bai, D. Tian, X. Zhu, D. Zhou, N. Wang and W. Yan, Effect of MgO and Fe2O3 dual sintering aids on the microstructure and electrochemical performance of the solid state Gd0.2Ce0.8O2-δ electrolyte in intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *Frontiers in Chemistry*, 10, 991922, 2022. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.991922>.

