Teknik yazı

DEMİR GRUBU (FeNiCo) ALAŞIM NANO PARTİKÜLLERİNİN YAKIT HÜCRELERİNDE KULLANIMINA YÖNELİK ELEKTROT TASARIMI VE MODELLEME ÇALIŞMALARI

Şerzat SAFALTIN — Istanbul Teknik Üniversitesi
Meltem İSLAMOĞLU — Istanbul Teknik Üniversitesi
Burak KÜÇÜKELYAS — Istanbul Teknik Üniversitesi
Çiğdem TOPARLI — Istanbul Teknik Üniversitesi
Sebahattin GÜRMEN — Istanbul Teknik Üniversitesi

ÖZET

Bu çalışmada; yakıt hücrelerinde kullanılmak üzere FeNiCo alaşım nanopartikülleri Ultrasonik Sprey Piroliz ve Hidrojen Redüksiyonu Tekniği (USP-HR) ile 0,1 M FeNiCo nitrat başlangıç çözeltisinden farklı redüksiyon sıcaklıklarında (600, 800 ve 1000 °C) üretilmiş ve X-ışınları faz analizi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (FEG SEM-EDS) analizleriyle karakterize edilmiştir. XRD analizinde yapının YMK ve HMK yapının karışımı ve SEM-EDS analizinde ise eş morfolojide küresel dağılımın olduğu nanopartiküllerin Fe, Ni ve Co fazlarından oluştuğu belirlenmiştir. FeCoNi alaşım partiküllerinin yakıt hücrelerinde kullanımına yönelik elektrot tasarımı ve modelleme çalışmaları, 150-200 °C sıcaklık aralığında çalışan fosforik asit yakıt hücresinde kovansiyonel kullanım bulmuş Pt-C ve bu çalışma kapsamında üretilmiş FeNiCo alaşım nanopartikülleri ile gerçekleştirilmiştir. Modelleme ve simülasyon çalışmaları sonucunda FeNiCo içeren elektrotlarının kullanıldığı yakıt hücresinin performasının konvansiyonel kullanımdaki Pt-C elektrotlara göre daha iyi olduğu gözlenmiş ve FeNiCo nanopartiküllerinin Pt-C kompozitine benzer katalitik özellikler gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Demir-Nikel-Kobalt Alaşım Nanopartikülleri, Ultrasonik Sprey Piroliz Tekniği, Yakıt Hücresi, Modelleme ve Simülasyon.

SIMULATION AND MODELLING STUDIES OF IRON GROUP ALLOY (FeNiCo) NANOPARTICLES AS NEW ELECTRODE FOR FUEL CELL APPLICATION

ABSTRACT

In this study; FeNiCo alloy nanoparticles were synthesized via hydrogen reduction assisted ultrasonic spray pyrolysis method in single step by using 0.1 M nitrate salts as precursor. The effect of reduction temperature on characteristic properties of particles have been investgated by different reaction temperatures (600, 800, 1000 °C). The microstructural characteristics of the particles were investigated through X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS) studies. X-ray analysis indicates that FeNiCo nanocrystalline particles exhibit a mix of BCC and FCC structures, while SEM-EDS analysis shows particles are in spherical shape consisting of Fe, Ni and Co elements. Electrode design and modelling studies of FeCoNi alloy particles in phosphoric acid fuel cells for usage in the temperature range of 150-200 °C have been computed by using comparison of the data of FeNiCo alloy nanoparticles obtained in the experimental work and conventional Pt-C nanoparticles. It has been observed that FeNiCo shows better performance than conventional Pt-Co electrodes in phospharic acid fuel cell. Further the results indicates that FeNiCo alloy particles shows similar catalytic properties with conventional Pt-C composite.

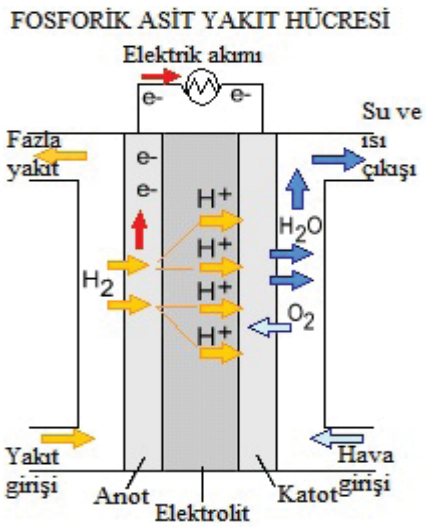
Keywords: FeNiCo alloy nanoparticles, ultrasonic spray pyrolysis, fuel-cell, modelling and simulation.

1. GİRİŞ

Nanoteknoloji, malzeme ve yapıların nano ölçütlerde incelenmesini, tasarlanmasını, üretilmesini, karakterizasyonunu ve elde edilen sistemlerin işlevsel ve ticari olarak kullanımını içermektedir. Nanoteknoloji ve nano malzemeler (fonksiyonel fiziksel ve kimyasal özelliklere ve geniş uygulama alanına sahip olmaları) çağımızın ve geleceğin anahtar teknolojisi/malzemeleri olması sebebiyle bu malzemelerin üretimine yönelik ilgi son yıllarda artmaktadır [1]. Özellikle elektronik ve enerji alanında üretilmesi amaçlanan parçaların nano boyutlara indirilmesi konusunda yapılan çalışmalar hızla

artmakta ve elde edilen sonuçlar çok dikkat çekmektedir [2]. FeNiCo nano partikülleri, manyetik bilgi depolama cihazları, elektronik baskı devreleri, askeri uygulamalar, havacılık ve yüksek sıcaklık uygulamaları, enerji sistemleri gibi birçok alanda kullanılabilen üçlü alaşım yapısıdır. FeNiCo nano partikülleri bileşimindeki demir, nikel ve kobalt oranına göre farklı özellikler göstermekte ve bu sayede özelliklerin kontrolünün sağlanmaktadır [3].

Yakıt hücreleri, kimyasal enerjinin elektrik enerjisine çevrildiği, sessiz, yüksek verimli ve sürekli çalışabilen elektrokimyasal cihazlardır. Şekil 1'de 150-200 °C sıcaklık aralığında çalışan fosforik asit yakıt hücresinin şematik görünümü gösterilmektedir. Fosforik asit yakıt hücreleri, adını elektrolit olarak kullanılan fosforik asitten almaktadır. Çalışma ve özellikleri açısından polimer elektrolit membran yakıt hücresi ile benzerlikleri vardır [4-5].



Şekil 1: Fosforik asit yakıt hücresi [5].

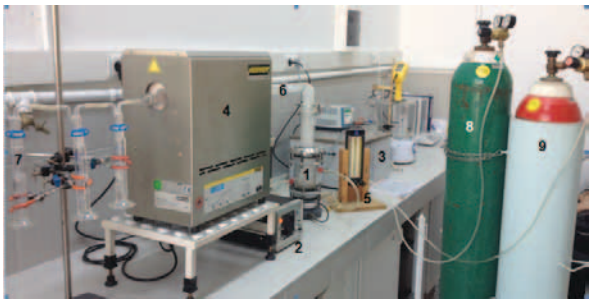
Yakıt hücrelerinde oksijen reaksiyonu için kullanılan karbon elektrotların soy metal nanopartikülleri ile katkılandırılmasıyla elektrokatalist özelliği geliştirilmiştir. Ancak, soy metallerin kullanılması maliyetleri arttırdığı gibi, platin grubu metallerin bulunabilirliği, geri kazanımı ve kullanıma bağlı olarak zamanla bozunması, soy metal içermeyen katalist malzemelerin geliştirilmesinde bir zorunluluk arz etmektedir [6]. Soy metallerin yerine farklı malzemelerin geliştirilmesi, yakıt hücrelerinin geliştirilmesinde ve yaygınlaşmasında önemli bir paya sahip olacağı düşünülmektedir. Bu noktada demir grubu metaller özellikle FeNiCo alaşımının geçiş metal alaşımı olarak yakıt hücrelerinde alternatif kullanımı ön plana çıkmakta ve konu ile ilgili araştırmalar sürdürülmektedir [7]. FeNiCo alaşımının katalitik özelliği açısından üçlü alaşımın nanopartikül yapısında olması, boyut-yüzey alanı ilişkisi, selektif oksidasyon ve birim alan başına kullanılacak malzeme miktarı açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışmada; 150-200 °C sıcaklık aralığında çalışan fosforik asit yakıt hücresinde kullanılmak üzere FeNiCo alaşım nanopartiküllerinin bir aşağıdan yukarı yaklaşımı olan USP-HR tekniği ile [8] yüksek safiyetteki 0,1 M FeNiCo nitrat başlangıç çözeltisinden üretimi, yapısal karakterizasyon çalışmaları ve Pt-C elektrod yerine kullanılması düşünülen FeNiCo alaşım nanopartiküllerinin COMSOL ile 3 boyutlu modellemesi fosforik yakıt hücresinin çalışma prensibine göre incelenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. FeNiCo NANOPARTİKÜLLERİNİN ÜRETİMİ

FeNiCo alaşım nanopartiküllerinin USP-HR yöntemiyle (Bknz. Şekil 2) üretilmesine yönelik 0,1 M başlangıç çözeltisi, Merck kalite $Fe(NO_3)_3.6H_2O$, $Ni(NO_3)_2.6H_2O$ ve $Co(NO_3)_2.6H_2O$ tuzlarından saf su ile hazırlanmıştır.



Şekil 2: Deney düzeneğinin genel görünümü

1) Atomizör 2) Atomizör güç kaynağı 3) Soğutma sistemi 4) Fırın 5) Akış ölçer 6) Kuvars tüp 7) Toz toplama şişesi 8) Azot gazı 9) Hidrojen gazı.

Deneysel çalışmalar, 0,1 M konsantrasyona sahip başlangıç çözeltisinden sırasıyla 600, 800 ve 1000 °C redüksiyon sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir (Bknz. Çizelge 1, Deneysel Çalışma Koşulları).

Çözelti Konsantrasyonu (M)	Sıcaklık (°C)	H2 Gaz Akış Debisi (mL/dak.)	Ultrasonik Frekans (MHz)
0,1	600	500	1,3
0,1	800	500	1,3
0,1	1000	500	1,3

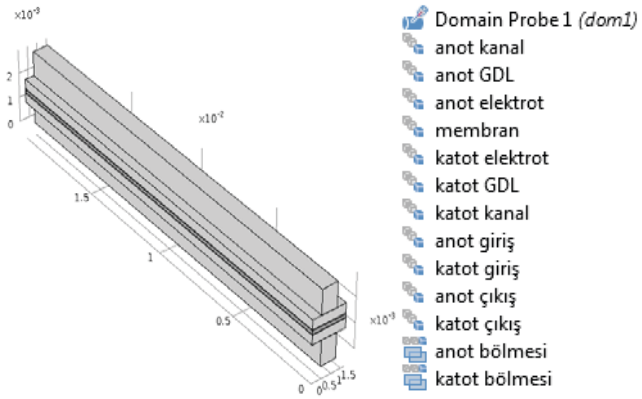
Çizelge 1: USP-HR tekniği ile FeNiCo alaşım nanopartiküllerinin üretiminde kullanılan çalışma koşulları

Başlangıç çözeltisinin atomizasyonu ile oluşan aerosol, yüksek saflıkta hidrojen gazı ile fırın ortamına taşındıktan sonra saniyelerle ifade edilen sürelerde termal parçalanma/redüksiyona uğratılmaktadır. Oluşan aerosol damlacıklarının atomizörden fırına, fırından da toplama şişelerine taşınması için 700 mm uzunlukta ve 20 mm çapında kuvars tüp ve çeşitli bağlantı ekipmanlarından faydalanılmıştır. Termal parçalanma/redüksiyon reaksiyon sonucu oluşan FeNiCo alaşım partikülleri gaz yıkama şişelerinde Merck kalite % 99,9 safiyette etil alkol (C_2H_5OH) içinde toplanmıştır. Deneysel çalışmalarda sabit gaz debisi ve sabit ultrasonik frekans değeri ile çalışılmıştır. Yapılan tüm deneylerde, deney düzeneğinden 0,1 l/dak. debi ile azot (N_2) gazı geçirilmiş ve inert ortam oluşturulmuştur. USP-HR tekniği ile üretilmiş FeNiCo alaşım nanopartiküllerinin yapısal karakterizasyon çalışmaları kapsamında, X-ışınları difraktometresi (Philips – 1700) ve taramalı elektron mikroskobu (Jeol FEG – SEM) kullanılmıştır.

2.2. MODELLEME ÇALIŞMALARI

Bu bölümde FeNiCo alaşım nanopartiküllerinin fosforik asit yakıt hücresinde alternatif elektrod malzemesi olarak kullanımına yönelik modelleme çalışmaları COMSOL Multiphysics® modelleme ve simülasyon yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Pt-C elektrotların FeNiCo alaşım nanopartikülleri ile performanslarının değerlendirilmesinde, yakıt hücresindeki performans değişiklikleri, polarizasyon grafiğindeki akım yoğunluğu değerindeki değişiklikler, H_2, O_2 ve H_2O molar konsantrasyon değerlerindeki değişiklikler tanımlanmıştır (%20 Pt-C elektrodun (0,03 mg/cm^2) elektriksel iletkenlik değeri 31,7 S/m'dir. FeNiCo-C malzemesinin elektriksel iletkenlik değeri ise 55 S/m'dir).

Yakıt hücresinde, akış dinamiklerinin reaksiyon kinetiğine etkisi kartezyen koordinatta inceleneceği için geometri 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Elektriksel iletkenliğin elektrot performansına, dolaylı olarak da yakıt hücresi genel performansına etkisi yakıt hücresi birimi üzerinden incelenmiştir (İnterkonnektör parçanın performansa etkisi dikkate alınmamıştır.). İncelemelere temel teşkil eden birim yakıt hücresi, aşağıdan yukarıya doğru sırasıyla anot gaz kanalı, anot gaz difüzyon tabakası, anot elektrodu, membran, katot elektrodu, katot gaz difüzyon tabakası ve katot gaz kanalından oluşmaktadır. Ayrıca, anot elektrodundan akım yoğunluğu ölçümü için prob tanımlaması yapılmıştır. İnterkonnektör parçanın bulunmadığı yakıt hücresi birimi şekil 3'de tanımlanmıştır.

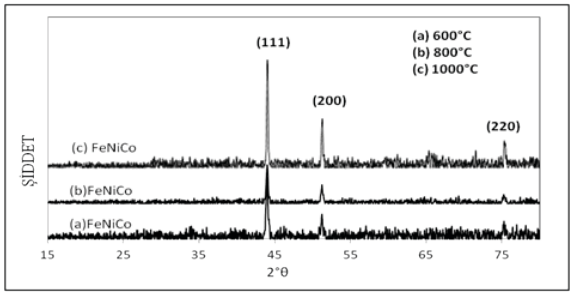


Şekil 3: Birim yakıt hücresi

3. SONUÇLAR

3.1. FeNiCo ALAŞIM NANOPARTİKÜLLERİNİN USP-HR TEKNİĞİ İLE ÜRETİMİ

USP-HR tekniği ile FeNiCo nanopartiküllerinin üretiminde; sıcaklık değişiminin partikül morfolojisi, partikül boyutu ve boyut dağılımı üzerine etkileri deneylerin gerçekleştirildiği 600, 800 ve 1000^{0}C redüksiyon sıcaklıklarında incelenmiştir. Ayrıca X-ışınları difroktometresi ile FeNiCo partiküllerinin faz analizi ve kristal yapı analizi gerçekleştirilmiştir. 600, 800 ve 1000 °C redüksiyon sıcaklıklarında 0,1 M konsantrasyona sahip başlangıç çözeltilerinden üretilen FeNiCo nanopartiküllerinin XRD paternleri Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4: FeNiCo alaşım nanopartikülleri XRD paternleri (0,1 M, 0,5 l/dak. H_2 debisi ve 1,3 MHz ultrasonik frekans)

Şekil 4'de X-ışınları verilen FeNiCo nanopartiküllerinin yaklaşık 43°, 52° ve 75° 'de sırasıyla (111), (200) ve (220) düzlemlerinde 3 ana pike sahip olduğu ve gözlenen piklerin kübik yapıda Fe, Ni ve Co'ı temsil ettiği belirlenmiştir.

USP-HR yönteminde partikül boyut ve morfolojisini etkileyen parametrelerden biri de sıcaklıktır. Artan sıcaklıkla birlikte oluşan partiküller arasında daha fazla çarpışmanın gerçekleşeceği, bu artışa bağlı olarak aerosol damlacıklarının temas ve birleşme oranının artmasıyla daha büyük partikül oluşumu beklenmektedir. Dolayısıyla sıcaklık etkisinin partikül boyutu ile doğru orantılı olduğu söylenebilir. Ancak sıcaklığın artışı ile taşıyıcı gazın hacmi artmakta ve damlacıkların fırın ortamında kalış süresi azalmaktadır. Bu bölümde demir-nikel-kobalt nitrat başlangıç çözeltisinden sabit konsantrasyon ve farklı sıcaklıklarda yapılan deneyler ile üretilmiş FeNiCo partiküllerinin kristalit boyutları Scherrer eşitliğine göre hesaplanmıştır (Bknz. Eşitlik 1 ve Çizelge 2).

$$t = (K \times \lambda)/(B \times \cos\theta) \qquad \text{(Eşitlik 1)}$$

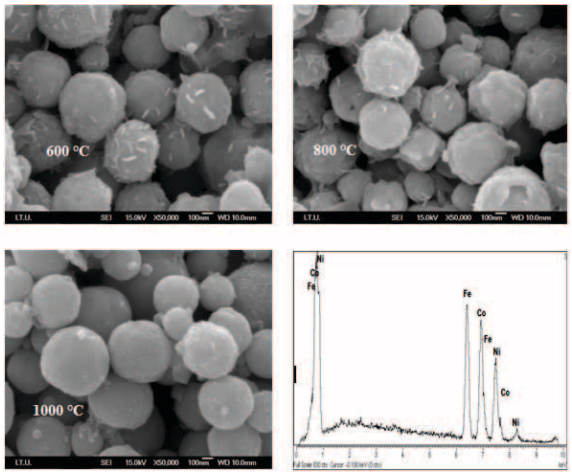
Bu eşitlikte;
t = Kristalin Boyutu
K = Şekil Sabiti (0.9)
λ = X-ışını dalga boyu (Cu Kα=1,5418 A)
B = En şiddetli pikin yarı yüksekliğinin radyan cinsinden genişliği (FWHM)
Θ = Bragg açısı

Çözelti Molaritesi (mol/L)	Sıcaklık (°C)	Kristalit Boyu (nm)
0,1	600	29,8
0,1	800	59,5
0,1	1000	71,4

Çizelge 2: 0,1 M konsantrasyona sahip çözeltilerden 600, 800 ve 1000 °C redüksiyon sıcaklıklarında USP-HR tekniği ile üretilmiş FeNiCo nanopartiküllerinin kristalit boyutu.

Çizelge 2'den de görüldüğü gibi redüksiyon sıcaklığının artması kristalit boyutunun artmasına neden olmuştur.

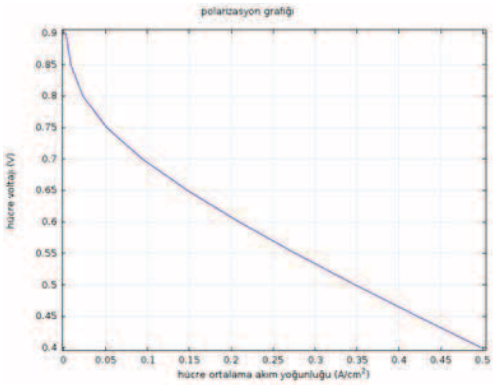
0,1 M konsantrasyona sahip partiküllerin şekil 5'de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, 600°C'de partiküllerin tamamen yoğunlaşamadığı görülmektedir. 1000°C'de üretilen partiküllerin sinterlenmenin etkisi ile beraber daha yoğun olduğu ve partikül boyutunun arttığı gözlemlenmektedir. EDS analizi sonucu yapıda safsızlık bulunmadığı tespit edilmiş; yapının tamamen Fe, Ni ve Co'dan oluştuğu belirlenmiştir.



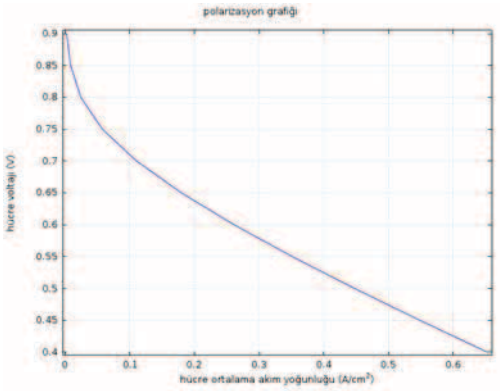
Şekil **5:** FeNiCo partiküllerinin SEM görüntüleri ve EDS analizi (0,1 M başlangıç çözeltisi; 600 °C, 800 °C ve 1000°C).

3.2. FeNiCo ALAŞIM NANOPARTİKÜLLERİ KULLANILAN ELEKTROTLARIN PERFORMANS ANALİZİ SONUÇLARI

Hücre voltajı-akım yoğunluğu değerlerinin karşılaştırıldığı polarizasyon analizi sonuçları şekil 6'da Pt-C ve şekil 7'de FeNiCo için verilmiştir.



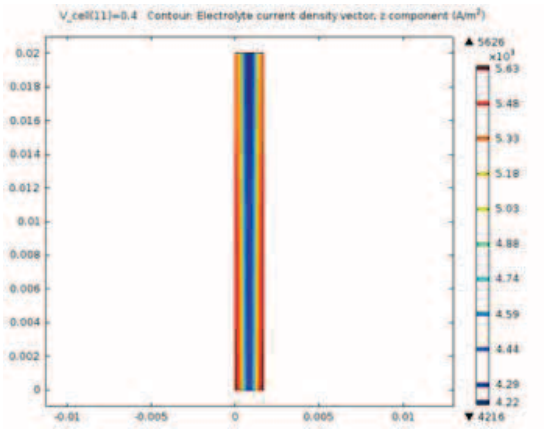
Şekil 6: Pt-C elektrodu polarizasyon grafiği



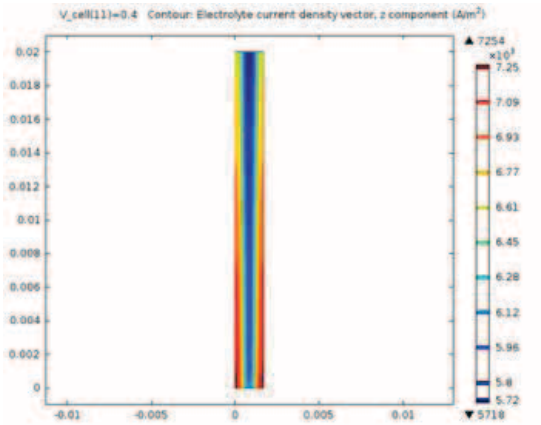
Şekil 7: FeNiCo elektrodu polarizasyon grafiği

Şekil 6 ve 7'de hücre voltajına göre değişen ortalama akım yoğunluğu değerleri incelendiğinde, FeNiCo elektrodunun daha geniş ortalama akım yoğunluğu eksenine sahip olduğu, ve Pt-C elektroduna karşılık gelen değerlerden daha yüksek akım yoğunluğu değerleri gösterdiği belirlenmiştir (>0,5 A/cm^2).

Elektrolit-akım yoğunluğu ilişkisinin belirlenmesine yönelik elektrolitin z ekseninden kesit alınarak, akım yoğunluğunun çizgisel dağılımı incelenmiştir. Şekil 8'de, Pt-C, şekil 9'da FeNiCo elektrodunun bulunduğu yakıt hücrelerinden alınan sonuçlar gösterilmektedir.



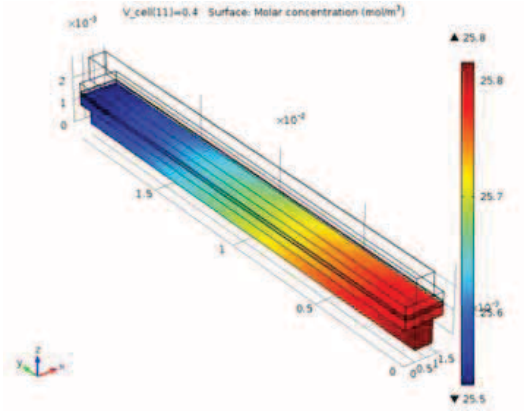
Şekil 8: Pt-C elektrot içeren yakıt hücresinin elektrolit z ekseni akım yoğunluğu grafiği



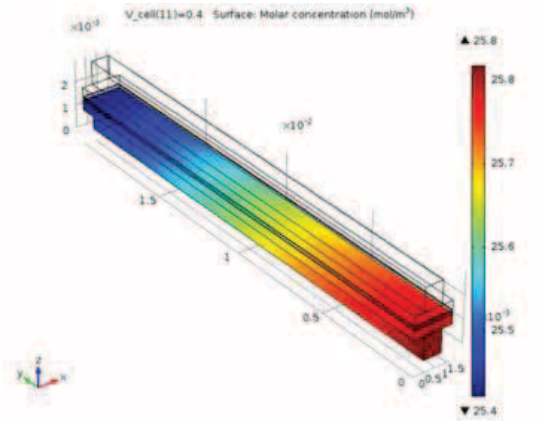
Şekil 9: FeNiCo elektrot içeren yakıt hücresinin elektrolit z ekseni akım yoğunluğu grafiği

Şekil 8 ve 9 karşılaştırıldığında sınır değerleri değişmekle birlikte, FeNiCo-C içeren elektrotlu yakıt hücresindeki elektrolit daha yüksek akım yoğunluğu değerleri göstermiştir.

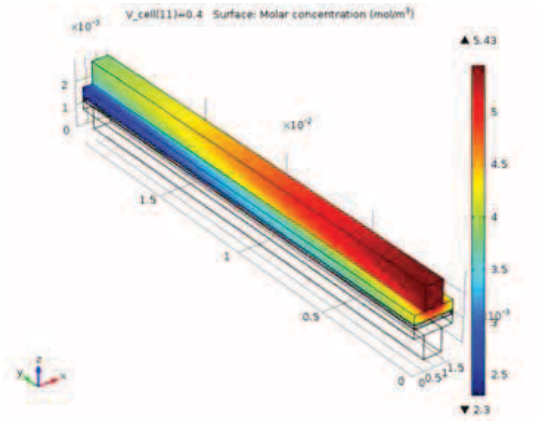
Anot bölgesi H_2 gazı molar konsantrasyon değişimi incelendiğinde; yakıt olarak kullanılan H_2 gazının anot bölgesi boyunca gösterdiği molar konsantrasyon değişikliği şekil 10'da Pt-C ve şekil 11'de FeNiCo elektrodu için modellenmiştir.



Şekil 10: Pt-C elektrodu kullanılan yakıt hücresinde anot bölgesinde H_2 molar konsantrasyon değişimi



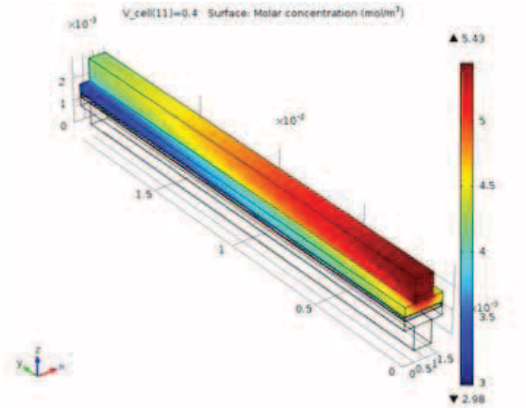
Şekil 11: FeNiCo elektrodu kullanılan yakıt hücresinde anot bölgesinde H_2 molar konsantrasyon değişimi



Şekil 13: FeNiCo elektrodu kullanılan yakıt hücresinde katot bölgesinde O_2 molar konsantrasyon değişimi

Şekil 10 ve şekil 11'deki sonuçlar incelendiğinde, H_2 gazı molar konsantrasyon dağılımında elektrotlar arasında fark oluşmadığı, ancak alt sınır değerinde değişiklik olduğu gözlenmiştir. Pt-C elektrodu kullanılan yakıt hücresinde alt sınır değeri 25,5 mol/m^3 iken, FeNiCo içeren elektrodun kullanıldığı yakıt hücresinde alt sınır değeri 25,4 mol/m^3'tür. Yani FeNiCo içeren elektrot kullanılan yakıt hücresinde daha fazla H_2 gazı reaksiyona girmiştir.

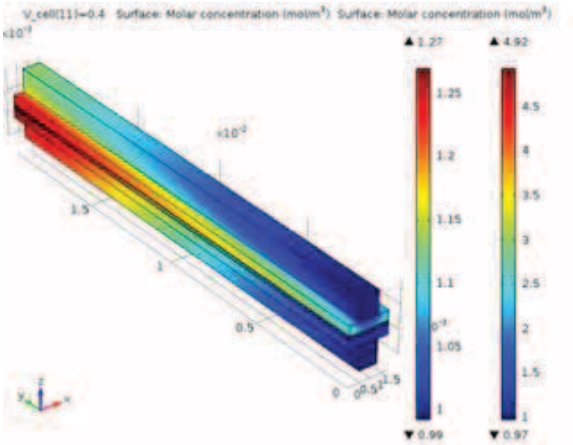
Katot bölgesi O_2 gazı molar konsantrasyon değişimine yönelik modelleme çalışmalarında; şekil 12 ve 13'deki sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 12: Pt-C, Şekil 13: FeNiCo elektrodu).



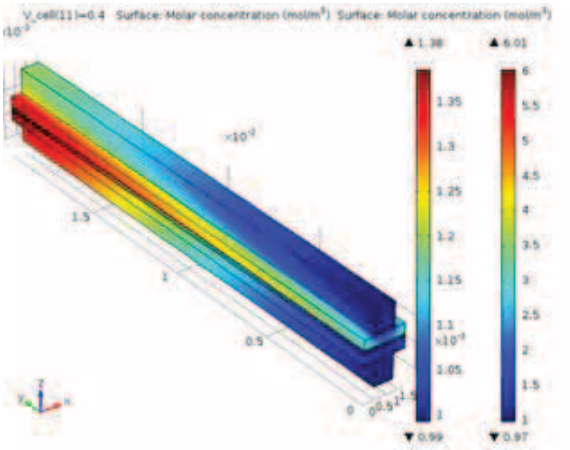
Şekil 12: Pt-C elektrodu kullanılan yakıt hücresinde katot bölgesinde O_2 molar konsantrasyon değişimi

O_2 gazı molar konsantrasyon dağılımında elektrotlar arasında fark oluşmadığı, ancak alt sınır değerinde değişiklik olduğu gözlenmiştir. Pt-C elektrodu kullanılan yakıt hücresinde alt sınır değeri 2,98 mol/m^3 iken, FeNiCo içeren elektrodun kullanıldığı yakıt hücresinde alt sınır değeri 2,3 mol/m^3'tür. Yani FeNiCo içeren elektrot kullanılan yakıt hücresinde daha fazla O_2 gazı reaksiyona girmektedir. Bu sonuç, H_2 gazının kullanımının artmasıyla benzerlik göstermektedir.

Yakıt hücresinde H_2O molar konsantrasyon değişimi modelleme sonuçları şekil 14'de Pt-C, şekil 15'de FeNiCo elektrodu için hesaplanmıştır.



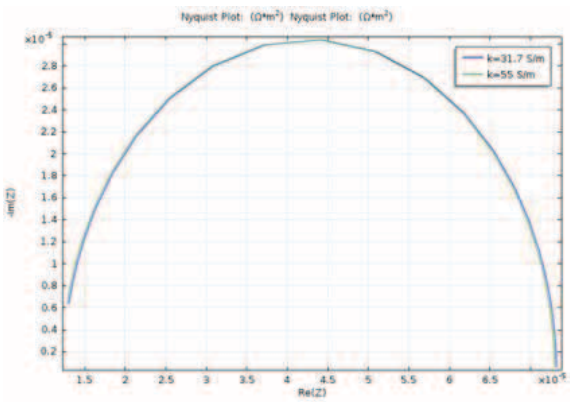
Şekil 14: Pt-C elektrodu kullanılan yakıt hücresinde H_2O molar konsantrasyon değişimi



Şekil 15: FeNiCo-C elektrodu kullanılan yakıt hücresinde H_2O molar konsantrasyon değişimi

Şekil 14 ve şekil 15'deki sonuçlar incelendiğinde, H_2O molar konsantrasyon dağılımında üst sınır değerlerinde değişiklik olduğu belirlenmiştir. Pt-C elektrodu kullanılan yakıt hücresinde üst sınır değeri anot bölgesi için 1,27 mol/m^3 ve katot bölgesi için 4,92 mol/m$^{3'}$ tür. FeNiCo elektrodlu yakıt hücresinde üst sınır değeri anot bölgesi için 1,38 mol/m^3, katot bölgesi için 6,01 mol/m$^{3'}$tür. Yani FeNiCo içeren elektrot kullanılan yakıt hücresinde daha fazla H_2O oluşmuştur. Bu sonuçlar H_2 ve O_2 gazlarının molar konsantrasyon değişimiyle paralel değişiklik göstermektedir.

Pt-C elektrodu ile FeNiCo elektrodunun kullanıldığı yakıt hücrelerinde; elektrolit ve katot kullanılarak gerçekleştirilen empedans analizi modelleme çalışmaları 1-1000 Hz frekans aralığında yapılmıştır. Elektrotların elektriksel iletkenlik değerlerinin empedans analizine etkisi şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16: Nyquist Eğrisi

Empedans analizi sonucuna göre; iki farklı elektrodun benzer özellikler gösterdiği tespit edilmiştir (ohmik kayıplar, dirençler ve elektrot kinetik direnci açısından).

4. GENEL SONUÇLAR

USP-HR tekniğiyle 0,1 M FeNiCo nitrat başlangıç çözeltisinden 600, 800 ve 1000^{0}C'de çalışma (redüksiyon) sıcaklıklarında üretilen FeNiCo alaşım nanopartiküllerinin yapısal karakterizasyon çalışmalarında (SEM-EDS, XRD), üretilen nanopartiküllerin küresel morfolojide demir, nikel ve kobalt partiküllerinden oluştuğu ve XRD paternlerinden de FCC ve BCC karışık yapıda olduğu görülmüştür. Modelleme çalışmaları ile, FeNiCo nanopartiküllerin elektrot mazlemesi olarak kullanıldığı fosforik asit yakıt hücresi elektrodu, konvansiyenel kullanımda olan Pt-C yapılı elektrotlarla karşılaştırılarak, yakıt hücresi üzerindeki performans değişiklikleri incelenmiştir. Modelleme ve simülasyon çalışmaları sonucunda, FeNiCo nanopartikülleri içeren elektrodun Pt-C yapılı elektrotlardan daha iyi performans gösterdiği, yakıt hücresi elektrodu olarak uygun bir malzeme olduğu değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen empendans analizi ile, iki elektrodun benzer ohmik kayıp ve direnç karakteristiklerine sahip olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Schmid, G., (2008), Nanotechnology, Wiley-CHV, v.1, s. 3.

[2] Feynman, R. (1960), "There's Plenty of Room at the Bottom", Caltech Engineering and Science, 23, s. 22-36.

[3] C. Toparli, B. Ebin, S. Gürmen, (2013), Iron-nickel-cobalt (Fe-Ni-Co) alloy particles prepared by ultrasonic spray pyrolysis and hydrogen reduction (USP-HR) method, Ceram. Trans. 240, 247-254.

[4] Hoogers, G., (2003), Fuel Cell Technology Handbook, CRC Press LLC, ISBN 0-8493-0877-1.

[5] http://energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells, Erişim Tarihi: 21-12-2014

[6] Othman, R., Dicks, A.L., Zhu, Z., (2012), Non precious metal catalysts for the PEM fuel cell cathode, International journal of hydrogen energy, 37, s. 357-372.

[7] Xie, Z., Zhu, W., Zhu, B., Xia, C., (2006), FexCo0.5–xNi0.5–SDC anodes for low-temperature solid oxide fuel cells, Electrochimica Acta, 51, s. 3052-3057.

[8] Gürmen, S., Ebin, B. (2008), Nanopartiküller ve Üretim Yöntemleri – 1, Metalurji Dergisi, 150. Sayı, s. 31-38.