



# Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 04.01.2024  
Kabul Tarihi : 27.03.2024

Received Date : 04.01.2024  
Accepted Date : 27.03.2024

## DAHİLİ İÇ REFORMER İLE ÇALIŞAN ERİMİŞ KARBONAT YAKIT PİLİNİN (DIR-MCFC) PERFORMANS PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ, ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

### INVESTIGATION OF PERFORMANCE PARAMETERS, ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF MOLTEN CARBONATE FUEL CELL (DIR-MCFC) WORKING WITH INTERNAL REFORMER

Elvan DEMİRYÜREK<sup>1</sup> (ORCID: 009-0002-9323-5206)  
Yıldız KOÇ<sup>2\*</sup> (ORCID: 0000-0002-2219-645X)  
Özkan KÖSE<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-9069-1989)  
Hüseyin YAĞLI<sup>3</sup> (ORCID: 0000-0002-9777-0698)

<sup>1</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Hatay, Türkiye  
<sup>2</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye  
<sup>3</sup>Gaziantep Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Yıldız KOÇ, yildiz.koc@iste.edu.tr

#### ÖZET

Doğrudan İç Reformlu Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (DIR-MCFC), enerji sektöründe oldukça çeşitli uygulamalara yönelik bir çözüm sunarak dikkat çekmektedir. Bu teknoloji, yüksek enerji verimliliği, çeşitli yakıtları kullanma yeteneği ve yüksek sıcaklıklarda kararlı çalışabilme kapasitesi gibi özellikleri ile farklı endüstri alanlarında geniş bir potansiyel sağlamaktadır. DIR-MCFC'lerin termodinamik performansını etkileyen faktörlerin ayrıntılı bir şekilde anlaşılması, bu teknolojinin etkili bir şekilde optimize edilmesi için hayati öneme sahiptir. Bu bağlamda, DIR-MCFC sisteminin kapsamlı modellemesi ve simülasyonu akım yoğunluğu, yakıt kullanım oranı, hücre sıcaklığı ve CO<sub>2</sub> kullanım oranı gibi kritik parametrelerin sistem performansına etkisini anlamak ve geliştirmek için kapsamlı bir çalışma yapılmaktadır. DIR-MCFC'nin analizinde 600°C, 625°C ve 650°C hücre sıcaklıklarında elde ettiği maksimum güç değerleri sırasıyla 18454,26338 kW, 21869,68782 kW ve 24847,2680 kW olarak ölçüldü. Bu çalışma, sabit akım yoğunluğunda hücre sıcaklığındaki artışın enerji ve ekserji verimini artırdığını, en yüksek performansın 625°C'de (%50,15 enerji verimi, %44,91 ekserji verimi) elde edildiğini gösterdi. Maksimum yakıt kullanım oranında (%96) gücü 23512,730 kW olarak enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %34,569 ve %30,958 olarak ölçüldü.

**Anahtar Kelimeler:** MCFC, yakıt faydalanma oranı, CO<sub>2</sub> faydalanma oranı, enerji, ekserji

#### ABSTRACT

Direct Internal Reformed Molten Carbonate Fuel Cells (DIR-MCFC) stand out in the energy sector by offering a solution for a wide range of applications. This technology offers a wide potential in different industrial fields with its high energy efficiency, ability to utilize various fuels and stable operation at high temperatures. A detailed understanding of the factors affecting the thermodynamic performance of DIR-MCFCs is vital for effective optimization of this technology. In this context, extensive modeling and simulation of the DIR-MCFC system has been extensively studied to understand and improve the impact of critical parameters such as current density, fuel utilization rate, cell temperature and CO<sub>2</sub> utilization rate on the system performance. In the analysis of the DIR-MCFC, the maximum power values obtained at 600°C, 625°C and 650°C cell temperatures were measured as 18454.26338 kW, 21869.68782 kW and 24847.2680 kW, respectively. This study showed that increasing the cell temperature at constant current density increases the energy and exergy efficiency, with the highest performance

ToCite: DEMİRYÜREK, E., KOÇ, Y., KÖSE, Ö., & YAĞLI, H., (2024). DAHİLİ İÇ REFORMER İLE ÇALIŞAN ERİMİŞ KARBONAT YAKIT PİLİNİN (DIR-MCFC) PERFORMANS PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ, ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 567-578.

achieved at 625°C (50.15% energy efficiency, 44.91% exergy efficiency). At maximum fuel utilization rate (96%), the power was 23512,730 kW with energy and exergy efficiencies of 34.569% and 30.958%, respectively.

**Keywords:** MCFC, fuel utilization rate, CO<sub>2</sub> utilization rate, energy, exergy

## GİRİŞ

Enerji, bir ülkenin ekonomisini, altyapısını, ulaşımını ve yaşam standartlarını şekillendirmede önemli bir rol oynamaktadır (Manoharan vd., 2019). Küresel enerji talebi, insanoğlunun varoluşundan itibaren sürekli artan bir ivmeyle hız kazanmaktadır. Günümüzde dünya enerji ihtiyacının %84'ü petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil enerji kaynaklarından karşılanmaktadır (Ivanova ve Wood, 2020a, 2020b). Dünya nüfusu artarken aynı zamanda fosil kaynak rezervleri de günbegün azalmaktadır. Dolayısıyla, dünyanın yakın gelecekte enerji ihtiyacının ve sürdürülebilir çevresel hedeflerinin karşılanamayacağı düşünülmektedir. Bu sebepten dolayı, gelecekteki enerji devamlılığını sağlamak ve sürdürülebilir çevreyi hayata geçirmek pek çok ülkenin artan bir ihtiyacıdır (Ivanova ve Wood, 2020b, 2020a; Karatekin vd., 2020; Wang vd., 2018). Fosil yakıtlar, sınırlı rezervlerinin yanı sıra çevresel zorluklar da doğurmaktadır. Fosil yanması sonucu atmosfere saldırdığı karbondioksit (CO<sub>2</sub>) küresel sera gazı emisyonlarının büyük bir oranına (%87) tekabül ederek küresel iklim değişikliğine ciddi etkileri bulunan en önemli faktörlerden biridir. Tüm bunların yanı sıra her yıl en az beş milyon insanın ölümü hava kirliliğinden dolayı olduğu tahmin edilmektedir (Ajanovic ve Haas, 2021; Ivanova ve Wood, 2020b, 2020a; Karatekin vd., 2020; "The State of the World's Forests 2020", 2020; Wang vd., 2018). Bu sorunların üstesinden gelmek için çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yaygınlaştırılmalıdır. Bu bağlamda, yakıt pilleri enerji dönüşümünde yüksek ısı verim ve düşük emisyon sunan, yenilenebilir enerji sistemlerinde öncü bir teknoloji olarak ortaya çıkmaktadır. Yakıt pilleri, kullanım alanlarının çok yönlülükleri sayesinde deniz, kara ve hava taşımacılığının yanı sıra savunma sanayi de dahil olmak üzere çeşitli sektörler için umut verici adaylar olarak konumlandırılmaktadır. Bu nedenle, yakıt hücreleri temiz ve yüksek verimli bir enerji dönüşüm sistemi olarak büyük umut vaat etmekte ve çeşitli alanlarda yoğun araştırma ve geliştirme çabalarına yol açmaktadır ("The State of the World's Forests 2020", 2020; Thounthong vd., 2009). Yakıt pillerinin birçok çeşidi bulunsa da, temel çalışma prensipleri benzerdir ve her türlü yakıt pilinde üç ana bileşen bulunur: anot, katot ve elektrolit (Manoharan vd., 2019). Elektrolit, anot ve katot elektrotları arasında yerleştirilir. Yakıt, anoda, oksitleyici ise katoda beslenir. Anotta indirgeme reaksiyonları, katotta ise oksidasyon reaksiyonları meydana gelir. Sağlanan yakıt, anotta elektronlara ve iyonlara ayrışır. İyonlar, elektrolitin içinden geçerek katoda ulaşırken, elektronlar bir iletken aracılığıyla katoda ulaşarak elektrik üretimi gerçekleşir. Yakıt pillerinde elektrokimyasal reaksiyonun başlaması için gerekli olan tek şey oksijen olduğu için termal ve mekanik bir işlem gerekmez. Yakıt pillerinin ürettiği elektrik düşük voltajlı doğru akım (DC) formundadır ve doğrudan çalışır (Olabi vd., 2021). Yakıt pillerinin çok farklı çeşitleri bulunmaktadır, ancak her birinin çalışma prensipleri birbirine benzerdir. Yakıt pilleri konusunda yapılan birçok makale bulunmaktadır: Sharaf ve Orhan, (2014), çalışmalarında yakıt pillerini detaylı bir şekilde incelediler. Yakıt pillerinin, diğer geleneksel enerji dönüştürme cihazlarında bulunmayan yüksek verimliliği ve çevreye zarar vermeyen sistemi ile istenilen kombinasyonu oluşturduklarını, aynı zamanda yakıt pillerinin geliştirilmesi ve ticarileşmesinin uzun bir süreç gerektirdiğini vurgularlar. Bu durumun sebebi, piller, ısı motorları ve benzeri cihazların ortaya çıkması, birçok enerji üretim ve dönüşüm teknolojisinin yüksek maliyeti, verimliliği ve güvenilirliği ile daha çok uğraşılması nedeniyle yakıt pillerinin daha geri planda bırakılmasından kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Mekhilef vd., (2012) mevcut çeşitli yakıt pillerinin çalışma prensibini, uygulamalarını, çalışmalarını, avantajlarını ve dezavantajlarını karşılaştırarak detaylı bir inceleme yapmışlardır. Yakıt pilleri çeşitlerinin çalışma prensipleri birbirlerine benzer olmasına rağmen, alkali yakıt pili güç verimliliği açısından %60 verimle en verimli, polimer elektrolit membran yakıt pili %58 verimle ikinci sırada ve erimiş karbonatlı yakıt pili %47 verimle üçüncü sırada yer aldığı ileri sürmüşlerdir. Alkali yakıt pilleri (AFC) en verimli olsalar da ulaşım uygulamalarında proton değişim membranlı yakıt pillerinin (PEMFC) daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Direkt metanol yakıt pilleri (DMFC) ve polimer elektrolit yakıt pilleri (PAFC) düşük verimliliğe sahip olmalarına rağmen ekonomik olarak verimli olduklarını belirtmişlerdir. Katı oksit yakıt pili (SOFC) ve erimiş karbonat yakıt pillerinin (MCFC), yüksek CHP verimliliği sağladığını söylemişlerdir. Mevcut ve modern yakıt pilli teknolojilerinin seri üretimine geçilmesi için ekonomik özellikleri karşılamaları ve mevcut olan teknolojilerin avantajlarını geride bırakmaları gerektiği sonucuna varmışlardır. Wang (2015), çalışmasında gelişmekte olan yakıt pillerinin karşılaştığı engelleri ele almıştır. Yakıt pilleri teknolojisinin gelişmesinde karşılaşılan engel, ne bir hidrojen yakıtının altyapısının ve pazarının gelişmesi ne de hidrojenin depolanmaması, taşınmaması gibi sorunlardır. Gerçek engel yakıt pilinin dayanıklılığı, maliyeti ve güvenilirliği gibi kendisinden kaynaklanan engellerdir. Yakıt pillerinin ticarileşmesi için iki önemli adım olduğunu vurgulamıştır. Birinci adım, yakıt pillerinin dayanıklılığını, maliyetini ve güvenilirlik sorununu çözmek iken, ikinci adımın yeni bir iş alanı oluşturmak ve sektörün standartlarını geliştirmek olduğunu vurgulamıştır. Yakıt hücreleri, elektrokimyasal cihazlar olarak, eklenen yakıtın ve oksitleyicinin kimyasal

enerjisini bir elektrot-elektrolit sistemi aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürür. Yakıt hücreleri, temiz ve verimli elektrik üretimi sağlamak için hidrojenin ve diğer yakıtların kimyasal enerjisini kullanır. Hidrojen bir yakıt hücresinde yakıt olarak kullanılırsa üretilen tek ürün ısı ve suyun yanı sıra elektriktir. Yakıt hücreleri, uygulama çeşitliliği açısından benzersizdir; enerji santralleri kadar büyük veya bir dizüstü bilgisayar kadar küçük sistemlerde çok çeşitli yakıt ve hammadde kullanarak güç üretebilirler (*Fuel Cells / Department of Energy, t.y.*). Yakıt pilleriyle ilgili diğer çalışmalara bakıldığında, Duan vd., (2018), erimiş karbonat yakıt pili (MCFC) alt çevrim sistemiyle buhar türbini (ST) entegre ederek yeni bir hibrit güç sistemi önermiş ve analiz etmişlerdir. Önerilen sistemin ayrıntılı termodinamik modellerini oluşturmuşlar ve temel parametrelerin yeni sistemin performansına etkilerini detaylı olarak incelemişlerdir. Yeni MCFC/ST hibrit sistemi, 0,722 V çıkış voltajı, %64,21 genel sistem verimliliği ve 85969 kW ekserji kayıpları ile kıyaslanan sisteme göre iyileştirilmiştir. MCFC/ST hibrit sisteminin net verimi, akım yoğunluğu 1500 A/m<sup>2</sup>, buhar-karbon oranı 2,5, yakıt kullanım oranı %85 ve CO<sub>2</sub> kullanım oranı %75 olduğunda en yüksek değere ulaştığını tespit etmişlerdir. Ovrum ve Dimopoulos (2012), çalışmalarında bir ticaret gemisine yerleştirilmiş erimiş karbonat yakıt pilinin (MCFC) dinamik ve modüler matematiksel modelini geliştirmişlerdir. Mevcut MCFC ünitesinden alınan verilerle bir model oluşturmuşlar ve doğrulamışlardır. Oluşturdukları model, gemilerde yakıt pili kullanılması için gerekli olan performans, ısı verim, güvenilirlik ve dayanıklılık ile çalışılabilirlik konularını kapsayan geniş aralıktaki çalışmalar için uygun olduğu sonucuna varmışlardır. Brouwer vd. (2006), tarafından yapılan bir çalışmada ise bir erimiş karbonat yakıt pilini (MCFC) yöneten akışkan dinamiği, elektrokimyasal ve kimyasal mekanizmaları ve ısı transferi prensiplerini kullanarak MATLAB Simulink ile ayrıntılı bir model geliştirmişlerdir. Oluşturdukları modeli, değişen yük isteklerine cevap verince MCFC'nin dinamik voltajını, akımını ve güç değişimlerini tahmin etmek için de uygulamışlardır. Sonuç olarak, oluşturulan her iki modelin de MCFC'nin voltajı ve dinamik tepki özellikleri hakkında fikir edinilmesinde kullanılabileceğini söylemişlerdir. Wee (2014), çalışmasında erimiş karbonat yakıt pili sisteminin (MCFC) güç uygulamalarında CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılmasındaki etkilerini incelemiştir. MCFC'lerin tesisteki genel enerji verimliliğini düşürmeden geleneksel termik santrallerde oluşan CO<sub>2</sub>'yi ayırabileceğini ve konsantrasyonunu edebileceğini söylemiştir. Isı geri dönüşümünü ele aldığı, bağımsız MCFC'lerin verimlerinin %75'e yükseltilebileceğini ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının en az 236 kg/MWh'nin altına düşürülebileceğini söylemiştir. Ancak, MCFC'lerin enerji santrallerinde CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmada büyük bir rolü olmasına rağmen, maliyetinin yüksek olması ve küçük ölçekli işletmesinden dolayı çok sınırlı kaldığını belirtmiştir. Moradpoor ve Ebrahimi, (2019) çalışmalarında MCFC, stirling motoru (alfa tipi) ve kalina güç üretim çevrimi (KCS11)'inden oluşan yeni bir kombine soğutma, ısıtma ve güç çevriminin davranışını araştırmak için 7 tasarım parametresi seçerek parametrik çalışma ve duyarlılık analizi yapmışlar ve çevrimi termodinamik ve çevresel açıdan analizini yapmışlardır. Geleneksel çevrimlere göre %45'e kadar yakıt tasarrufu sağlandığını gözlemlemişlerdir. Çevrimin genel veriminin %70'ten, elektriksel veriminin ise %50'den fazla olduğunu ve 6000 saatlik bir işletme için yıllık CO<sub>2</sub>'nin 15 ton azaldığını, CO<sub>2</sub>'nin ise 225 ton azaldığını elde etmişlerdir. Souleymane vd. (2022), MCFC ve parabolik oluklu güneş kollektör santralleriyle elektrik ve hidrojen üretimini araştırmışlardır. Güneş kollektör sistemine paralel olarak eklenen HRGS, güneş alanını küçültmeye, kararlı güç üretimine ve hidrojen üretimine yardımcı olduğuna ayrıyeten MCFC'nin kullanılmasıyla da egzoz ısısının geri kazanılmasında, güneşin radyasyonunun değişiminin ortak üretim sistemindeki etkilerini azaltmasına ve verimliliğin artmasına yardımcı olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Fichera vd. (2022) İtalya'daki doğal gazla çalışan bir enerji santralini, erimiş karbonat yakıt pili (MCFC) entegrasyonu ile yeniden güçlendirme önerisiyle iki farklı planın ekserji analizi yapmışlardır. Bu çalışmalarının sonucunda türbinin egzoz gazları, MCFC'ye besleme sağlar ve elektrik üretimiyle birlikte CO<sub>2</sub> yakalar. Güncellenen santralde, 435.29 MW gaz türbininden, 248.9 MW buhar döngüsünden ve 135.283 MW MCFC'den olmak üzere toplamda ise 787.454 MW enerji üretimi elde etmişlerdir. Vatani vd. (2013) dahili iç reformlama erimiş karbonat yakıt hücresinden (DIR-MCFC) atık ısı geri kazanımını ele alır. Önerilen sistem, katot çıkışından gelen ısıyı kullanarak ön-reformasyon işlemi için gereken ısıyı sağlar. Organik Rankine çevrimi (ORC) kullanılarak atık ısı geri kazanımı iki farklı konfigürasyonda incelemişlerdir. Birinci durumda, ORC buhar jeneratörüne giden ısıyı alırken, ikinci durumda, katot çıkışı iki farklı akışa ayrılarak ORC ve ön-reformlama işlemi için ısı sağlanır. Farklı çalışma sıvıları kullanılarak yapılan karşılaştırmalarda, sistemdeki enerji ve ekserji verimliliğinin arttığı ve katot çıkış akışını ikiye ayrılması ile ekserji kaybının azaldığını belirlemişlerdir.

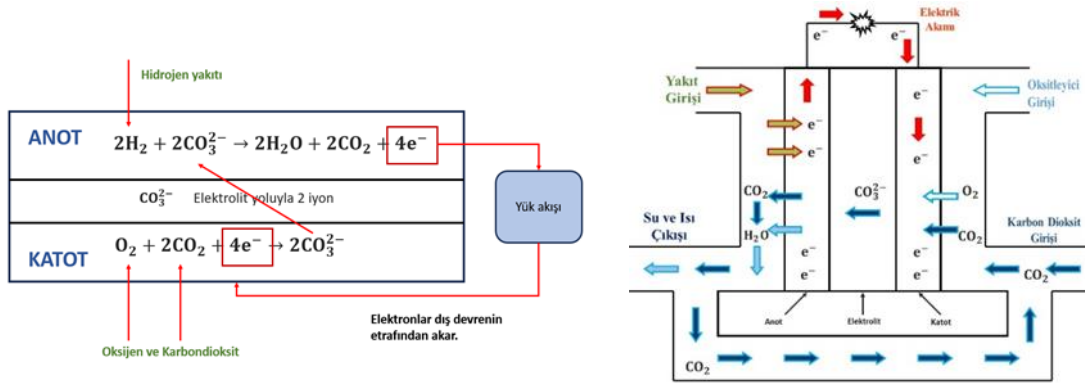
Yukarıdaki çalışmalara bakıldığında, MCFC yakıt pillerinin çalışmalara ne kadar dikkat çekici katkı yaptığı açık bir şekilde görülmektedir. Farklı sistemlere entegrasyon potansiyeli oldukça güçlü bir sistem olduğu da gözlerden kaçmamaktadır. Fakat, çalışmalar incelendiğinde farklı hücre sıcaklıklarında ve geniş akım yoğunluğunda MCFC'nin termodinamik performansının incelendiği çok fazla makale bulunmamaktadır. Ayrıca, yakıt kullanım oranının MCFC'nin güç yoğunluğu, enerji ve ekserji verimleri üzerindeki etkilerini inceleyen sayılı makale gerçekleştirilmiştir. Dahası, MCFC'de CO<sub>2</sub> kullanım oranı etkisinin incelendiği çok az makale vardır. Tüm bunların

yanı sıra MCFC'nin CycleTempo kullanılarak termodinamik performans analizi yapan sadece bir kaç çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışma kapsamında, DIR-MCFC'nin yapısal özellikleri anlatılmış ve termodinamik performansı CycleTempo programıyla simule edilerek hassas bir şekilde incelenmektedir. Çalışma kapsamında, ilk olarak, DIR-MCFC performansını değerlendirmek için değişen hücre sıcaklıklarında (600°C, 625°C, 650°C), 1200 A/m<sup>2</sup>'den 7000 A/m<sup>2</sup>'ye kadar değişen akım yoğunluğunun yakıt pili hücre voltaj değeri ve güç yoğunluğuna etkisi incelenmekte ve daha sonra yakıt pilinin enerji ve ekserji verimleri değerlendirilmektedir. Ardından, değişen hücre sıcaklıklarında (600°C, 625°C, 650°C) DIR-MCFC yakıt pili hücresinde aralığında CO<sub>2</sub> kullanım oranındaki değişimlerin akım yoğunluğu ve voltaj değerlerine etkisi gözlemlenmiştir. Son olarak, %78 ile %98 arasında değişen yakıt kullanım faktörlerinin güç yoğunluğu, hücre voltaj değeri, enerji ve ekserji verimleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve kullanılan programın doğruluğu karşılaştırılmıştır.

## SİSTEM TANITIMI

Erimiş karbonat yakıt pillerinde (MCFC), elektrolit olarak genellikle seramik bir matris içinde bulunan ergimiş alkali karbonatlar kullanılır. Bu karbonatlar genellikle lityum alüminat (LiAlO<sub>2</sub>) içinde lityum sodyum (LiNa) veya lityum potasyum (LiK) karışımlarıdır ve karbonat iyonları aracılığıyla iyon transferini sağlar. Alkali karbonatlar, karbonat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) iyonlarıyla iletken bir tuz oluştururlar. Bu tuzlar 500 °C'de eridiğinden dolayı MCFC yakıt pilinin yeterli iyonik iletkenliğin sağlandığı 600 °C'nin üzerindeki daha etkin sıcaklıklarda çalışabilirler. MCFC yakıt pilinin yüksek çalışma sıcaklığı, karbonat elektrolitinin gerekli iletkenliği sağlamasına ve düşük maliyetli hücre elemanlarının kullanılmasına olanak tanır (Baranak, 2015; Larminie ve Dicks, 2013; Mehmet vd., 2008; "Molten Carbonate Fuel Cells", 2018). Erimiş karbonat yakıt pilleri (MCFC) elektrotlarında meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar Şekil 1a ve Şekil 1b'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Erimiş Karbonat Yakıt Pilinin Çalışma Sistemi [21,23]

Şekil 1'e bakıldığında MCFC yakıt pili diğer yakıt pili türlerinden farklı olduğu net bir şekilde görülmektedir. Çünkü yaygın yakıt pilli türlerinde erimiş karbonat bulunmamaktadır. Şekil 1'de incelendiğinde, anot üzerinde, hidrojen tarafından beslenen elektrolit üzerinden geçen karbonat iyonları (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) elektrokimyasal olarak oksitlenerek karbon dioksit (CO<sub>2</sub>), su (H<sub>2</sub>O) ve elektron üretir. Dış bir elektrik devresinden geçen elektronlar, katoda geri dönerek elektrik gücü sağlar. Anot reaksiyonu:



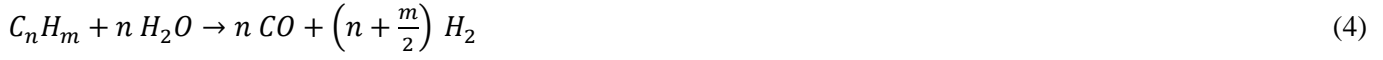
Katotta, havadan gelen oksijen ile anottan tekrar çevrime giren karbon dioksit, elektronlarla reaksiyona girerek elektroliti besleyen ve yakıt pili üzerinden elektrik akımını ileten karbonat iyonları (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) üretilir. Katot reaksiyonu



Erimiş karbonat yakıt pillerindeki toplam pil reaksiyonu, diğer yakıt pilleri ile aynıdır. Fakat, karbonat iyonlarının iletkenliğinin, anotta karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) üretilirken katotta tüketilmesi, MCFC'ye özgü bir özelliktir. Toplam yakıt pili reaksiyonu:



Erimiş karbonat yakıt pillerinin bir diğer özelliği, yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle iç reformun mümkün olmasıdır. Bu nedenle, sadece hidrojen değil, aynı zamanda doğrudan hidrokarbonlarla da çalışmalar gerçekleştirilebilir. Bu süreçte, hidrokarbonlar ve su buharı endotermik reaksiyonla hidrojen ve karbon monoksit oluşturmak üzere reaksiyona girer. Dahili reform reaksiyonu:



Eşitlik 4'te oluşan karbon monoksit veya ham yakıtla taşınan su, daha da oksitlenerek karbon dioksit dönüşür. Bu hafif ekzotermik reaksiyona "su-gaz kayması" veya kısaca "kayma" denir. Reaksiyona yakıt akışına ek olarak, hidrojen de oluşur. Su-gaz değişim reaksiyonu:



MCFC'ler gibi yüksek sıcaklıktaki yakıt hücreleri, dahili olarak iki şekilde yeniden düzenlenebilir: doğrudan (DIR) veya dolaylı (IIR). DIR, ham yakıtın eş zamanlı buhar reformasyonu, kayma reaksiyonu ve hidrojenin elektrokimyasal oksidasyonunu içerir. Dolaylı iç reformasyon (IIR), yakıtın çoğu anoda girmeden önce hidrojen ve karbon dioksit dönüşür. Geri kalan hidrokarbonlar anoda girdikten sonra yeniden oluşur (Muñoz De Escalona vd., 2011).

### DIR-MCFC Simülasyonu ve Parametre Analizi

DIR-MCFC'lerin termodinamik süreçlerini anlamak amacıyla gerçekleştirilen modelleme ve simülasyon çalışmaları, temel işletim parametreleri arasındaki etkileşimleri inceleyerek değişen koşullar altında yakıt hücresi davranışlarını anlamamıza olanak tanımaktadır. Bu modelleme çalışması, DIR-MCFC'lerin sürdürülebilir enerji çözümlerinde optimize edilmesinde önemli bir adım olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, simülasyon sonuçları, mevcut verilerle kıyaslanarak modelin güvenilirliği ve gerçek dünyayla uygunluğu sıkı bir doğrulama sürecinden geçmiştir. Tasarım ve simülasyon parametreleri için belirlenen giriş değerleri, Tablo 1'de detaylı olarak sunulmaktadır.

**Tablo 1.** DIR-MCFC Yakıt Pili Tasarım ve Simülasyon için Gerekli Girdi Parametreleri

Parametre	Çalışmanın Değerleri	Birim
Hücre çalışma basıncı	1,05	bar
Hücre çalışma sıcaklığı	600-650	°C
Su/metan mol oranı (S/C)	3	%
Yakıt kullanım oranı ( $U_F$ )	0,78-0,96	-
Dönüşüm verimliliği ( $\eta_{DC/AC}$ )	94	%
Akım yoğunluğu ( $i_{MCFC}$ )	1200- 7000	A/m <sup>2</sup>
Hücre alanı ( $A_{MCFC}$ )	10131,7	m <sup>2</sup>

DIR-MCFC yakıt pili performansının akım yoğunluğu, yakıt kullanım oranı, hücre sıcaklığı,  $CO_2$  kullanım oranı, enerji ve ekserji verimlerinde değişikliklere duyarlılığı, CycleTempo programı aracılığıyla gerçekleştirilen bir dizi simülasyon ile araştırılmıştır.

### MATEMATİKSEL MODEL

Sisteme giren ve çıkan akışların kütleleri, kütle korunumu ilkesine göre sifira eşit olmalıdır. Bu da demektir ki, sistemde hiçbir kütle kaybı veya kazancı olmamalıdır. Aşağıdaki eşitlik 6, sistemin kütle bakımından dengede olduğunu gösterir:

$$\dot{m}_{a,gir} + \dot{m}_{k,gir} - \dot{m}_{a,çık} - \dot{m}_{k,çık} = 0 \quad (6)$$

Sistemde üretilen güç değeri bilinmiyorsa, yakıt hücresi tarafından üretilen güç, anottaki yakıtın kütle akışından hesaplanır. Bu güç hesaplaması, kütle dengesi eşitliği ile birlikte düşünülmelidir. Kütle eşitliği 7, katottan anoda doğru gerçekleşen  $O_2$  ve  $CO_2$  kütle transferini de içerir. Bu eşitlik, sistemin giren ve çıkan akışlarını dengeler, aynı zamanda katottan anoda doğru gerçekleşen kütle transferini göz önüne alır.

$$\dot{m}_{a,gir} - \dot{m}_{a,çık} = -\dot{m}_{k \rightarrow a} \quad (7)$$

Eşitlik 8, elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda katottan anoda doğru göç eden oksijenin kütleli debisini elektrik akımı ile ilişkilendirir.

$$\dot{m}_{O_2 k \rightarrow a} = M_{O_2} \times \frac{I}{4 \times F} = U_{O_2} \times \dot{m}_{O_2 k} \quad (8)$$

Eşitlik 9,  $CO_2$  'nin elektrokimyasal reaksiyonlarda katottan anoda doğru göç etmesinin kütleli debisini elektrik akımı ile bağlantılı olarak ifade eder.

$$\dot{m}_{CO_2 k \rightarrow a} = M_{CO_2} \times \frac{I}{2 \times F} = \varphi \times \dot{m}_{CO_2 k} \quad (9)$$

Yakıtın kütleli debisi ( $\dot{m}_{yakıt}$ ) biliniyorsa, üretilen elektrik gücü, yakıt kullanım oranı ve DC/AC dönüşüm verimliliğinden hesaplanır.

$$\dot{m}_{a,gir} = \dot{m}_{yakıt} \quad (10)$$

Oksidan kütleli debisi biliniyor ise üretilen elektrik gücü aşağıdaki iki yöntemden birisi seçilerek hesaplanabilir:

Yakıt pilinin çıkış sıcaklığı verilmişse:

Enerji dengesi sisteme eklenir;

$$\dot{m}_{a,gir} \times h_{a,gir} + \dot{m}_{k,gir} \times h_{k,gir} - \dot{m}_{a,çık} \times h_{a,çık} - \dot{m}_{k,çık} \times h_{k,çık} = P_{EL,DC} + \dot{Q}_{kayıp} \quad (11)$$

Oksidan kullanım oranı verilmişse:

Sistemde oksidan/yakıt oranı  $[X_{OF} (kg/kg)]$  hesaplanır ve eşitlik 12 sisteme eklenir:

$$X_{OF} \times \dot{m}_{a,gir} - \dot{m}_{a,çık} \quad (12)$$

Oksidan kullanımı verilmişse ya da oksidanın kütleli debisi başka bir yerde hesaplanmış ise çıkış sıcaklığını hesaplamak için enerji dengesi kullanılır, bu yüzden de anot ve katot çıkış sıcaklıkları aynı olduğu varsayılır. Tüm süreçlerin sabit sıcaklık ve basınçta ( $P_{MCFC}$  ve  $T_{MCFC}$ ) gerçekleştiği varsayılır. Yakıt hücresindeki tüm yakıt bileşenlerinin tam dönüşümü için, hücreden geçen akım aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$I_F = \frac{\dot{m}_{a,gir}}{M_{mol,a}} \times 2 \times F \times (y_{H_2}^0 + y_{CO}^0 + y_{CH_4}^0) \quad (13)$$

Eşitlikte  $y_i^0$  girişteki i bileşeninin mol oranı,  $M_{mol,a}$  da anot gazının mol kütesidir. Fakat gerçekte yakıt hücresinde, yakıtın tamamı dönüşmez. Gerçekte yakıt hücresinde, yakıtın tamamı dönüşmez. Gerçek dönüşüm ve maksimum dönüşüm arasındaki oranı  $U_F$  (yakıt kullanım oranı) olarak tanımlarsak, hücreden geçen gerçek akım aşağıdaki gibidir:

$$I = I_F \times U_F \quad (14)$$

Yakıt hücresi yığınının elektriksel çıkış gücü;

$$P_{EL,DC} = V_{MCFC} \times i_{MCFC} \times A_{MCFC} = V_{MCFC} \times I \quad (15)$$

$$P_{EL,AC} = V_{MCFC} \times i_{MCFC} \times A_{MCFC} \times \frac{\eta_{DC}}{AC} = V_{MCFC} \times I \times \frac{\eta_{DC}}{AC} \quad (16)$$

Burada  $i_{MCFC}$  akım yoğunluğu ve  $A_{MCFC}$  aktif MCFC alanıdır.

Güç yoğunluğu;

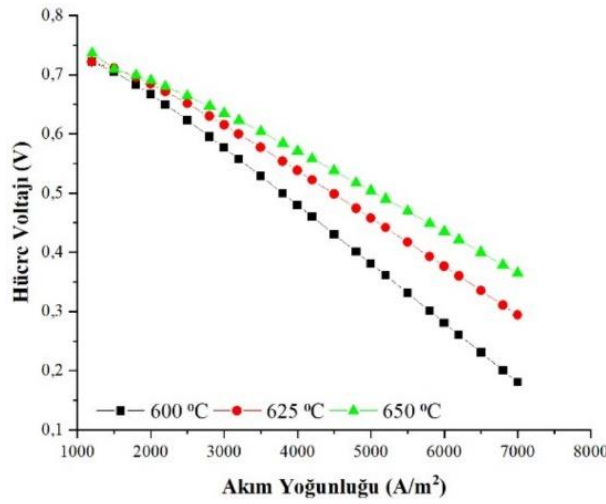
$$\phi = V_{MCFC} \times i_{MCFC} \quad (17)$$

Buhar/Karbon oranı (S/C), hücrede karbon birikmesini önlemek için tanımlanan bir parametredir.

$$\frac{S}{C} = \frac{\dot{n}_{H_2O}}{\dot{n}_{CH_4}} \quad (18)$$

## ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

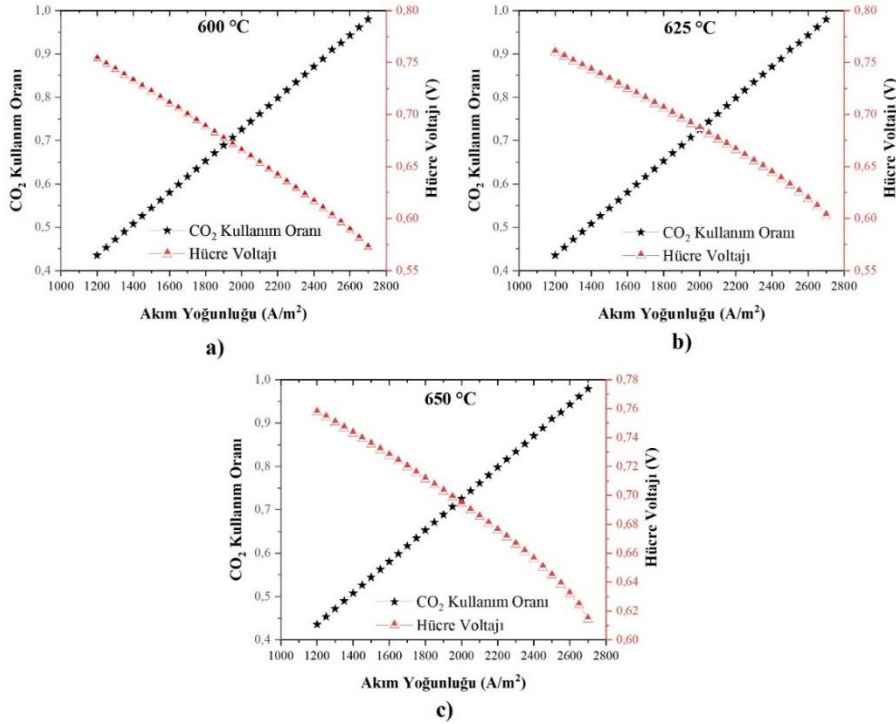
DIR-MCFC yakıt pili diğer yakıt pillerine göre farklı bir çalışma mantığı bulunmaktadır. Bu nedenle farklı parametrelerin birbirine etkilerini araştırmak oldukça önemlidir. Herhangi bir parametredeki değişiklikliğin diğer çıktıları nasıl etkileyebileceği, sistem davranışının nasıl olacağı kayda değer bir araştırma alanıdır. Bu bölümde, DIR-MCFC yakıt pilinin akım yoğunluğu değerinin voltaj, güç yoğunluğu, enerji ve ekserji verimi değerlerine etkisi üzerinde durulmaktadır. Ayrıca, DIR-MCFC yakıt pilinin  $CO_2$  kullanımının, akım yoğunluğu ve voltaj üzerindeki etkileri incelenmektedir. Daha sonra yakıt kullanım oranının güç yoğunluğu, enerji ve ekserji verimi üzerindeki etkileri irdelenmektedir. Değişen hücre sıcaklığında, akım Yoğunluğunun hücre voltajına etkisi Şekil 2'de gösterilmektedir.



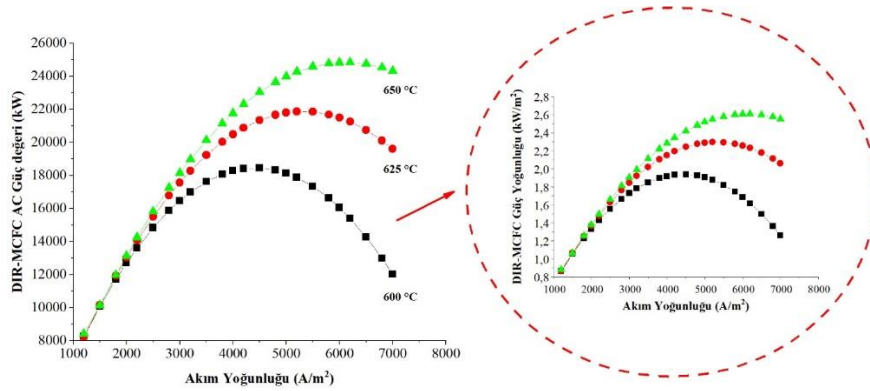
Şekil 2. Değişen Hücre Sıcaklığında, Akım Yoğunluğunun Hücre Voltajına Etkisi

Şekil 2'de görüldüğü gibi, üç farklı hücre sıcaklığında (600°C, 625°C, 650°C), 1200 ile 7000 A/m<sup>2</sup> arasında değişen akım yoğunluğunun hücre voltajına olan etkisi incelenmiştir. Sabit hücre sıcaklığında, akım yoğunluğu arttıkça hücre voltajının düştüğü gözlemlenmektedir. Akım yoğunluğu düşürülerek hücre voltajı yükseltilebileceği gibi, aksine akım yoğunluğu artırılarak hücre voltajı düşürülebilir. Minimum akım yoğunluğunda iken (1200 A/m<sup>2</sup>) iken hücre voltajı 0,7215 V ölçülmüştür. Maksimum akım yoğunluğunda (7000 A/m<sup>2</sup>) ise hücre voltajı 0,2941 V olarak ölçülmüştür. Bu negatif eğilim, yüksek akım yoğunluğunun hücre performansını olumsuz etkilediğini göstermektedir. Sabit akım yoğunluğunda, 1500 A/m<sup>2</sup>'den sonraki değerlerde, hücre sıcaklığındaki artışın voltaj değerini arttırdığı net bir şekilde görülmüştür. Farklı DIR-MCFC hücre sıcaklıklarında,  $CO_2$  kullanım oranının ve hücre voltajının akım yoğunluğuna göre değişimleri Şekil 3'te verilmektedir.

Şekil 3'de görüldüğü gibi, üç farklı hücre sıcaklığında (600°C, 625°C, 650°C),  $CO_2$  kullanım oranının ve hücre voltajının akım yoğunluğuna göre değişimleri incelenmiştir.  $CO_2$  kullanım oranının artması ile elektrokimyasal reaksiyon için yakıt ve  $CO_2$  girişi artacak, bu da Şekil 3'de gösterildiği gibi hücre voltajının düşmesine ve akım yoğunluğunun artmasına neden olacaktır. Bu, artan yakıt kullanımının hücre voltajında bir azalmaya yol açma eğiliminde olduğu yakıt hücrelerinde tipik bir davranıştır. Minimum  $CO_2$  kullanım oranında (%43), akım yoğunluğu 1200 A/m<sup>2</sup> iken hücre voltajı 0,7538 V (600°C), 0,7597 V (625°C), 0,7574 V (650°C) olarak ölçülmüştür. Maksimum  $CO_2$  kullanım oranında (%98) ise akım yoğunluğu 2700 A/m<sup>2</sup> iken hücre voltajı değeri 0,5727 V (600°C), 0,6027 V (625°C), 0,6143 V (650°C) olarak ölçülmüştür. Bu, parametrelerin DIR-MCFC'lerin performansını olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Akım yoğunluğunun ve hücre sıcaklığının DIR-MCFC' nin AC güç değerine etkisi Şekil 4'te gösterilmektedir.



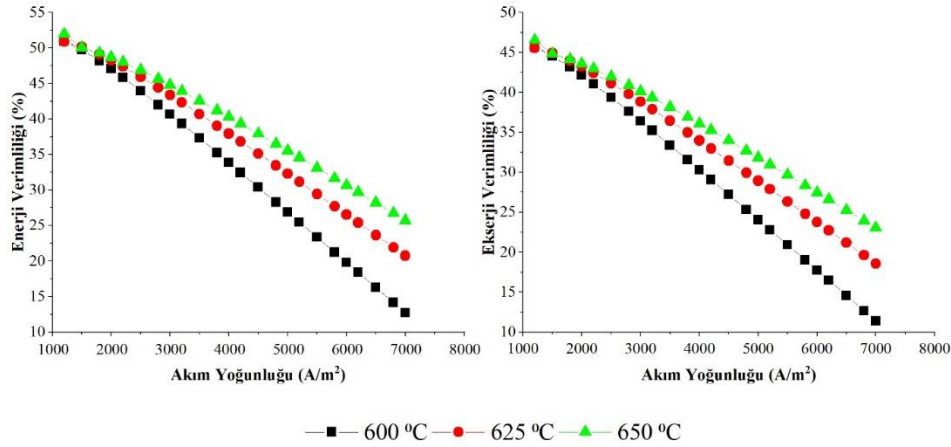
Şekil 3. Farklı DIR-MCFC Hücre Sıcaklıklarında, CO<sub>2</sub> Kullanım Oranının ve Hücre Voltajının Akım Yoğunluğuna Göre Değişimleri



Şekil 4. Akım Yoğunluğunun ve Hücre Sıcaklığının DIR-MCFC' nin AC Güç Değerine Etkisi

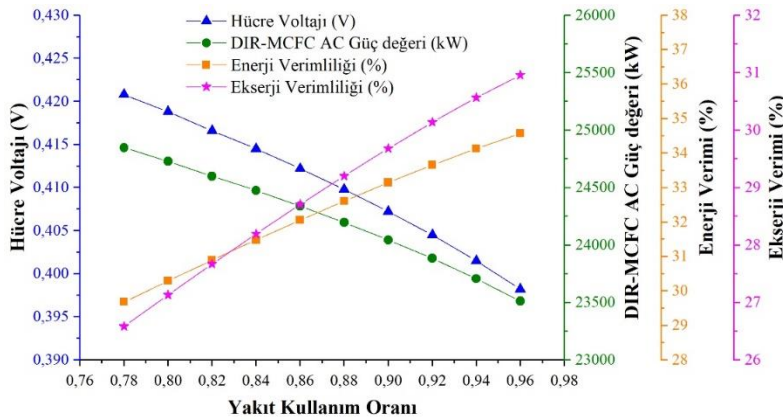
Şekil 4'te, üç farklı hücre sıcaklığında (600°C, 625°C, 650°C) 1200 A/m<sup>2</sup> ila 7000 A/m<sup>2</sup> arasında akım yoğunluğunun ve hücre sıcaklığının DIR-MCFC'nin AC güç değerine etkisi incelenmiştir. DIR-MCFC'nin AC güç çıkışı, güç yoğunluğunun ve yakıt hücresinin aktif alanının ürünüdür. Yakıt hücresinin aktif alanı bu durumda sabit olduğu için güç yoğunluğu eğilimiyle tutarlıdır. Yakıt hücresinin harici yüke ne kadar elektrik enerjisi sağlayabileceğini gösterir. Sabit hücre sıcaklığında, AC gücünün belirli bir noktaya kadar arttığını daha sonra azaldığını gözlemlenmektedir. Hücre sıcaklığı 600 °C de sabit tutulduğunda 4500 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda maksimum güç 18454,26 kW hesaplanmıştır. Hücre sıcaklığı 625 °C de sabit tutulduğunda 5200 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda maksimum güç 21869,69 kW olarak hesaplanmıştır. Hücre sıcaklığı 650 °C de sabit tutulduğunda 6200 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda maksimum güç 24847,2680 kW olarak hesaplanmıştır. Sabit akım yoğunluğunda, 2000 A/m<sup>2</sup>'den sonraki değerlerde, hücre sıcaklığındaki artışın güç değerini arttırdığı net bir şekilde görülmüştür. Bu nedenle, DIR-MCFC'nin AC güç çıkışı da hücre sıcaklığına ve diğer çalışma parametrelerine bağlı olan optimum bir değere sahiptir. Farklı hücre çalışma sıcaklıklarının ve akım yoğunluğunun DIR-MCFC'nin enerji ve ekserji verimine etkisi Şekil 5'te verilmektedir.





**Şekil 5.** Farklı Hücre Çalışma Sıcaklıklarının ve Akım Yoğunluğunun DIR-MCFC'nin Enerji ve Ekserji Verimine Etkisi

Şekil 5'de, üç farklı hücre sıcaklığında (600°C, 625°C, 650°C) sırasıyla akım yoğunluğunu 1200 A/m<sup>2</sup> ila 7000 A/m<sup>2</sup> aralığında değiştirilerek hücre enerji ve ekserji verimine olan etkisi incelenmiştir. Sabit hücre sıcaklığında akım yoğunluğu arttıkça DIR-MCFC'nin hem enerji hem de ekserji verimliliğinin azaldığını görülmektedir. Sırasıyla %50,89 ve %45,58 olarak hesaplanan en yüksek enerji ve ekserji verimleri en düşük akım yoğunluğunda (1200 A/m<sup>2</sup>) hesaplanmıştır. En düşük enerji ve ekserji verimleri, sırasıyla %20,75 ve %18,58 olan en yüksek akım yoğunluğu olan (7000 A/m<sup>2</sup>) de hesaplanmıştır. Sabit akım yoğunluğunda DIR-MCFC'nin enerji verimliliğinin ve ekserji verimliliğinin hücre sıcaklığının artmasıyla arttığını göstermektedir. Enerji verimliliği 625 °C'de maksimum %50,15 değerine ulaşırken, ekserji verimliliği aynı sıcaklıkta maksimum %44,91 değerine ulaşmaktadır. Bu da DIR-MCFC'nin hem enerji hem de ekserji verimliliği açısından 625 °C'de en iyi şekilde çalıştığını göstermektedir. Son olarak, Şekil 6'da yakıt kullanım oranının, hücre voltajı, DIR-MCFC AC gücü, enerji verimliliği ve ekserji verimliliğine etkisi değerlendirilmektedir.



**Şekil 6.** Yakıt Kullanım Oranının, Hücre Voltajı, DIR-MCFC AC Gücü, Enerji Verimliliği ve Ekserji Verimliliğine Etkisi

Şekil 6'da görüldüğü gibi, sabit hücre sıcaklığında ve sabit akım yoğunluğunda yakıt kullanım oranı sistematik olarak %78 ile %96 arasında değiştirilmektedir. Yakıt kullanım oranı, yakıt hücresine giren yakıtın ne kadarının elektrokimyasal reaksiyona katıldığını ifade eder. Yakıt kullanım oranı arttıkça, daha fazla yakıt reaksiyona girer ve daha az yakıt atık olarak çıkar. Bu da yakıt hücresinin enerji ve ekserji verimliliğini artırır. En yüksek enerji ve ekserji verimleri, sırasıyla %34,57 ve %30,96 olan en yüksek yakıt kullanım oranında (%96) elde edilmiştir. En düşük enerji ve ekserji verimleri, sırasıyla %29,68 ve %26,58 olan düşük yakıt kullanım oranında (%78) elde edilmiştir. Yakıt kullanım oranının artması, aynı zamanda yakıt hücresinin elektriksel gücünü de etkiler. Yakıt hücresinin AC gücü, hücre voltajı ile doğru orantılıdır. Yakıt kullanım oranı arttıkça hücre voltajı dolayısıyla da AC gücü azalır. Minimum yakıt kullanım oranında (%78) hücre voltajı 0,4208 V ve elektriksel AC gücünü 24847,21 kW olarak hesaplanmıştır. Maksimum yakıt kullanım oranında (%96) AC gücü olarak hücre voltajı 0,3982 V hesaplanırken AC gücü 23512,73 kW olarak hesaplanmıştır.

## SONUÇ

Bu çalışma, yüksek sıcaklıklı yakıt pilleri kategorisinde yer alan ve dahili reformasyon yetenekleriyle tanımlanan Doğrudan Dahili Reformer eklenmiş Erimiş Karbonat Yakıt Pillerinin (DIR-MCFC'ler) performansını akım yoğunluğu, yakıt kullanım oranı ve hücre sıcaklığındaki değişikliklere duyarlılığını incelemektedir. Her bir parametre için belirlenen aralıklardaki çalışma koşullarını analiz ederek, bu faktörlerin hücre voltajını, güç yoğunluğunu, AC gücünü, CO<sub>2</sub> kullanım oranını ve enerji/ekserji verimliliğini önemli ölçüde etkileyebileceği sonucuna varılmıştır:

- Akım yoğunluğu arttıkça, hücre voltajında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek akım yoğunluğunun hücre performansını olumsuz etkilediğini göstermektedir.
- Akım yoğunluğu ve hücre voltajı üzerinden hesaplanan güç yoğunluğu ile hücrenin AC gücü arasındaki ilişki, akım yoğunluğunun artmasıyla birlikte bir süre artış gösterir daha sonra bu artış yerine düşüşe bürünür. Bu düşüşün sebebi geri dönüşü olmayan kayıpların artmasıdır; MCFC'de güç üretimi artarken ısı ve diğer yan ürünlerin üretimi de artırmasından dolayı üretilen ısı normalden daha düşük bir kısmı elektrığe dönüştürülür. Böylece yakıt hücresinin verimini düşürerek yakıt pilinin performansı olumsuz etkiler. Akım yoğunluğu arttırıldığında ise yakıt piline giren yakıt akış hızı ve hava akış hızı artarak ekserji verimini düşürür.
- CO<sub>2</sub> kullanım oranının yükselmesi, elektrokimyasal reaksiyona katılımı azaltarak hücre voltajını düşürmüştür. Bu durum, yüksek akım yoğunluğunun hücre performansını olumsuz etkilediğini göstermektedir.
- Yakıt kullanım oranı arttıkça, yakıt hücresinin enerji ve ekserji verimliliğini artırırken hücre voltajı dolayısıyla da AC gücü azalır.

Bu bulgular, MCFC'lerin tasarımını ve çalışmasını optimize etmek adına gelişmiş verimlilik ve güç çıkışı elde etme amacıyla değerli bilgiler sağlamaktadır. Optimal işletme koşullarının belirlenmesi, enerji dönüşüm süreçlerini daha etkin hale getirerek çevresel sürdürülebilirlik ve endüstriyel uygulanabilirlik açısından önemli bir adım olabilir. Gelecekteki çalışmalar, bu bulguların pratik uygulamalara nasıl entegre edilebileceğini ve endüstriyel ölçekte nasıl optimize edilebileceğini daha da anlamak için odaklanabilir.

### Kısaltmalar

<i>DIR-MCFC</i>	= Doğrudan iç reformer ile çalışan erimiş karbonat yakıt pili
$P_{MCFC}$	= Hücre çalışma basıncı (bar)
$T_{MCFC}$	= Hücre çalışma sıcaklığı (°C)
S/C	= Su/metan mol oranı
$X_{OF}$	= oksidan/yakıt oranı (kg/kg)
$U_F$	= Yakıt kullanım oranı (%)
$U_{O_2}$	= O <sub>2</sub> kullanım faktörü (%)
$\eta_{DC/AC}$	= Dönüşüm verimliliği (%)
$i_{MCFC}$	= Akım yoğunluğu (A/m <sup>2</sup> )
$A_{MCFC}$	= Hücre alanı (m <sup>2</sup> )
$\dot{m}$	= Kütle akışı (kg/s)
$M_{mol}$	= Mol kütlesi (kg/mol)
P	= Güç (kW)
$\dot{Q}_{kayıp}$	= Isı kaybı (kW)
I	= Akım (A)
$\emptyset$	= Güç yoğunluğu (kW/m <sup>2</sup> )
$V_{MCFC}$	= Hücre voltajı (V)

### Alt İndisler

<i>gir</i>	= giriş
<i>çık</i>	= çıkış
<i>k</i>	= katot
<i>a</i>	= anot
<i>k→a</i>	= Katottan anota doğru

## KAYNAKÇA

- Ajanovic, A., & Haas, R. (2021). Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16), 10049-10058. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.03.122>
- Baranak, M. (2015). Ergimiş Karbonatlı Yakıt Pili Modellenmesi. <http://hdl.handle.net/11527/10742>
- Brouwer, J., Jabbari, F., Leal, E. M., & Orr, T. (2006). Analysis of a molten carbonate fuel cell: Numerical modeling and experimental validation. *Journal of Power Sources*, 158(1), 213-224. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2005.07.093>
- Duan, L., Lu, H., Yuan, M., & Lv, Z. (2018). Optimization and part-load performance analysis of MCFC/ST hybrid power system. *Energy*, 152, 682-693. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.03.178>
- Fuel Cells | Department of Energy. (t.y.). Geliş tarihi 03 Kasım 2022, gönderen <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>
- Ivanova, D., & Wood, R. (2020a). The unequal distribution of household carbon footprints in Europe and its link to sustainability. *Global Sustainability*, 3. <https://doi.org/10.1017/SUS.2020.12>
- Ivanova, D., & Wood, R. (2020b). The unequal distribution of household carbon footprints in Europe and its link to sustainability. *Global Sustainability*, 3. <https://doi.org/10.1017/SUS.2020.12>
- Karatekin, C., İktisadi, U., Bilimler, İ., Tarihi, G., Erdoğan, S., Ve Tabii, E., Bakanlığı, K., İşleri, E., & Müdürlüğü, E. G. (2020). Enerji, Çevre ve Sera Gazları. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(1), 277-303. <https://doi.org/10.18074/CKUIIBFD.670673>
- Larminie, J., & Dicks, A. (2013). Medium and High Temperature Fuel Cells. *Fuel Cell Systems Explained*, 163-228. <https://doi.org/10.1002/9781118878330.CH7>
- Manoharan, Y., Hosseini, S. E., Butler, B., Alzahrani, H., Senior, B. T. F., Ashuri, T., & Krohn, J. (2019). Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect. *Applied Sciences*, 9(11), 2296. <https://doi.org/10.3390/APP9112296>
- Mehmet, M. M., Fbe, Ç., Mühendislii, M., Dalında, A., Hazırlanan, E. P., Danımanı, T., Ükrü Bekdemr, D., & Üniversitesi, Y. T. (2008). Elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanılan değişik tipteki yakıt pillerinin teknik ve ekonomik etüdü. <http://dspace.yildiz.edu.tr/xmlui/handle/1/11585>
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2012). Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 981-989. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.09.020>
- Molten Carbonate Fuel Cells. (2018). *Fuel Cell Systems Explained*, 207-234. <https://doi.org/10.1002/9781118706992.CH8>
- Moradpoor, I., & Ebrahimi, M. (2019). Thermo-environ analyses of a novel trigeneration cycle based on clean technologies of molten carbonate fuel cell, stirling engine and Kalina cycle. *Energy*, 185, 1005-1016. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.07.112>
- Muñoz De Escalona, J. M., Sánchez, D., Chacartegui, R., & Sánchez, T. (2011). A step-by-step methodology to construct a model of performance of molten carbonate fuel cells with internal reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(24), 15739-15751. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2011.08.094>
- Olabi, A. G., Wilberforce, T., & Abdelkareem, M. A. (2021). Fuel cell application in the automotive industry and future perspective. *Energy*, 214, 118955. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.118955>
- Ovrum, E., & Dimopoulos, G. (2012). A validated dynamic model of the first marine molten carbonate fuel cell. *Applied Thermal Engineering*, 35(1), 15-28. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2011.09.023>
- Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2014). An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 810-853. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.01.012>
- Souleymane, C., Zhao, J., & Li, W. (2022). Efficient utilization of waste heat from molten carbonate fuel cell in parabolic trough power plant for electricity and hydrogen coproduction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(1), 81-91. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.09.210>
- The State of the World's Forests 2020. (2020). The State of the World's Forests 2020. <https://doi.org/10.4060/CA8642EN>

- Thounthong, P., Davat, B., Raël, S., & Sethakul, P. (2009). Fuel cell high-power applications. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 3(1), 32-46. <https://doi.org/10.1109/MIE.2008.930365>
- Wang, J. (2015). Barriers of scaling-up fuel cells: Cost, durability and reliability. *Energy*, 80, 509-521. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.12.007>
- Wang, J., Wang, H., & Fan, Y. (2018). Techno-Economic Challenges of Fuel Cell Commercialization. *Engineering*, 4(3), 352-360. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2018.05.007>
- Wee, J. H. (2014). Carbon dioxide emission reduction using molten carbonate fuel cell systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 178-191. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.01.034>
- Fichera, A., Samanta, S., & Volpe, R. (2022). Exergetic analysis of a natural gas combined-cycle power plant with a molten carbonate fuel cell for carbon capture. *Sustainability*, 14(1), 533.
- Vatani, A., Khazaeli, A., Roshandel, R., & Panjeshahi, M. H. (2013). Thermodynamic analysis of application of organic Rankine cycle for heat recovery from an integrated DIR-MCFC with pre-reformer. *Energy Conversion and Management*, 67, 197-207.