

Yeşil Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji Alanında PEM Yakıt Hücreleri: Bibliyometrik Bir Analiz

Hatice TÜRKOĞLU^{1*}, Levent SEMİZ²

Öz

Proton Değişim Membranlı (Proton Exchange Membrane, PEM) yakıt hücresi, geniş potansiyel uygulamaları olan yeni bir enerji cihazıdır. Bu çalışma, Yeşil Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji alanında PEM yakıt hücresi teknolojisinin mevcut durumunu ve gelişimini sunmaktadır. Bibliometrix R paketi ve Biblioshiny arayüzü kullanılarak WoS veri tabanında 2002-2024 yılları arasında yayımlanan 786 belgenin bibliyometrik analizi gerçekleştirilmiştir. 2023'te en yüksek bilimsel üretim (149 belge) ve 2005'te en yüksek yıllık alıntı oranı (6,4) kaydedilmiştir. Yenilenebilir Enerji, yayın (232) ve h-indeksi (46) açısından lider dergidir. Çin en fazla üretime sahip (1099) ve en çok iş birliği yapan ülke, Mısır ise en çok alıntı yapılan ülkedir. Tianjin Üniversitesi en fazla makale üreten kurumdur. Sopian K'nin (2006) çalışması en fazla küresel alıntıya sahipken, Atyabi SA'nın (2019) çalışması en çok yerel olarak alıntılanandır. "Performans" en yaygın kullanılan anahtar kelimedir. 2024'te "Elektrik" en çok tartışılan konudur. "Optimizasyon, Tasarım ve Sistem" konuları, araştırmalarda merkezi temalar olarak öne çıkmaktadır. Bu bulgular, PEM yakıt hücresi teknolojisindeki metodolojik ve teknolojik eğilimleri ortaya koyarak gelecekteki araştırmalara yön vermeyi amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yeşil Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji, PEM yakıt hücresi, Bibliyometrik analiz, Web of Science, Biblioshiny.

PEM Fuel Cells in Green Sustainable Science and Technology: A Bibliometric Analysis

Abstract

The Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell is an emerging energy technology with broad application potential. This study presents the current status and development of PEM fuel cell technology in the field of Green Sustainable Science and Technology. A bibliometric analysis of 786 documents published in the WoS database between 2002 and 2024 was conducted using the Bibliometrix R package and the Biblioshiny interface. The peak scientific output (149 documents) occurred in 2023, while the highest annual citation rate (6,4) was observed in 2005. Renewable Energy is the leading journal in terms of publications (232) and h-index (46). China has the highest scientific output (1099) and leads in international collaborations, while Egypt has the highest citation impact. Tianjin University is the most prolific institution in terms of publications. The study by Sopian K (2006) receives the highest number of global citations, while the work by Atyabi SA (2019) is the most locally cited. "Performance" is the most frequently used keyword. "Electricity" is the most extensively discussed topic in 2024. The topics of "Optimization, Design and System" emerge as key research themes. These findings aim to guide future research by revealing methodological and technological trends in PEM fuel cell technology.

Keywords: Green Sustainable Science and Technology, PEM fuel cell, Bibliometric analysis, Web of Science, Biblioshiny.

¹Amasya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Uygulamaları Anabilim Dalı, Amasya, Türkiye, turkoglu0683@gmail.com

²Amasya Üniversitesi, Amasya Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojisi Bölümü, Amasya, Türkiye, levent.semiz@amasya.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Günümüzde artan enerji talebi, sınırlı fosil yakıt arzı ve karbon emisyonlarını azaltma gerekliliği, alternatif enerji kaynaklarına ve enerji verimli teknolojilere olan ilgiyi arttırmaktadır (Song ve ark., 2024). Enerji ihtiyacını karşılamak için geleneksel fosil yakıtların kullanımının yol açtığı iklim değişikliği, çevre kirliliği, doğal kaynakların verimsiz kullanılması ve tüketilmesi gibi giderek artan küresel sorunları ele almak, Yeşil Sürdürülebilir Bilim ve Teknolojinin (Green Sustainable Science and Technology, GSST) önemi üzerinde giderek artan bir vurgu yapmaktadır (Guo ve ark., 2020).

Yeşil Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji; çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmek, doğal kaynakları daha etkin ve verimli bir şekilde kullanmak amacıyla bilim ve teknolojiyi bir araya getiren bir disiplindir. Bu alanda yapılan çalışmalar, çevresel etkileri en aza indirmeyi, ekosistemleri korumayı ve insan sağlığına zararlı etkileri azaltmayı hedeflemektedir (Cervera-Ferri ve Luz Ureña, 2017).

GSST; temiz enerji üreten, çevreye verilen zararın azaltılmasına ve onarılmasına yardımcı olan, daha az enerji ve kaynak kullanan, yenilenebilir kaynaklardan yararlanan teknolojileri ve sistemleri içermektedir (Kates, 2011). GSST, birçok farklı alana yayılan geniş bir yelpazede faaliyet göstermektedir. Bunlar arasında yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgar, hidroelektrik, biyokütle), enerji verimliliği teknolojileri, atık yönetimi ve geri dönüşüm sistemleri, çevresel izleme ve değerlendirme teknolojileri, çevresel koruma ve restorasyon yöntemleri gibi konular yer almaktadır (Yuan ve Sun, 2019). Bu alanda yapılan çalışmalar, çevresel etkileri azaltmakla birlikte ekonomik büyümeyi de teşvik ederek iş fırsatları yaratmakta ve toplumların refahını arttırmaktadır (Holdren, 2008). GSST, gezegenimizin sürdürülebilirliğini sağlamak için kritik bir rol oynamakta ve gelecek nesiller için daha yaşanabilir bir dünya yaratma çabalarında önemli bir unsur olarak kabul edilmektedir.

Çevresel hedeflere ulaşmak için bilim ve teknoloji politikalarının kullanılması, teknoloji politikası için yeni bir odak noktası oluşturmaktadır (Soete ve Freeman, 2012). Bu politikaların birçoğu Yeşil Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji'nin kullanılmasını önermektedir (Guo ve ark., 2020). Bu bağlamda, yeşil teknoloji olarak nitelendirilen çevre dostu ve sürdürülebilir teknolojilerin geliştirilmesi ve uygulanması büyük bir önem kazanmaktadır. Bu teknolojilerin en parlak örneklerinden biri olan Proton Değişim Membranlı (Proton Exchange Membrane, PEM) yakıt hücresi, sürdürülebilir enerji üretimi konusunda çığır açan bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. PEM yakıt hücresi, yeşil teknoloji kavramıyla sıkı bir şekilde bağlantılı olması sebebiyle temiz enerji devriminde bir kilometre taşı olarak kabul edilmektedir (Fan ve ark., 2021).

PEM yakıt hücreleri, hidrojen ve oksijen arasındaki kimyasal reaksiyonlar yoluyla elektrik enerjisi üreten cihazlardır. Bu hücreler; küçük boyutları, yüksek verimlilikleri, düşük emisyonları, hızlı başlatma süreleri ve güçlü kararlılıkları ile karakterize edilerek birçok uygulama alanında tercih edilirler ve bu da onların en umut verici enerji dönüştürücülerden biri olarak kabul edilmesini sağlamaktadır. Bu uygulamalar arasında taşınabilir elektronik cihazlar, araçlar ve endüstriyel güç üretimi bulunmaktadır (Wang ve ark., 2008).

Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC); katot, anot, elektrolit ve harici devre olmak üzere dört ana bölümden oluşan bir kimyasal güç üretim cihazıdır. Elektrik üretilirken, hidrojen ve oksijen sırasıyla PEMFC'nin anot ve katotuna girmektedir (Wang ve Wang, 2016). Hidrojen gazı anotta elektron kaybederek hidrojen iyonları haline gelir, bunlar elektrolit çözeltisine girerek katot ile anot arasındaki voltaj farkının oluşturduğu elektrik alanı altında proton değişim membranını geçerek katoda ulaşır ve elektronlar tarafından iletilmektedir (Wang ve ark., 2020). Katot katalizörünün varlığında hidrojen iyonları, elektronlar ve oksijen ısı emisyonlu su üretmek üzere birleştirilir (Beicha, 2012). PEMFC'ler elektrokimyasal reaksiyonlarla çalışarak anotta hidrojen ve katotta oksijen tüketimini kolaylaştırır, böylece kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir (Luo ve Jiao, 2018). Bu teknoloji, özellikle temiz ve sürdürülebilir enerji üretimi için önemli bir rol oynamaktadır. Çünkü hidrojen yakıtı oksijenle reaksiyona girerek sadece su ve elektrik enerjisi üretmesi nedeniyle çevreye zararlı emisyonlar oluşturmaz. Bu özellikleriyle PEM yakıt hücresi, yeşil teknolojiyle mükemmel bir şekilde bağdaşmaktadır (Zuo ve ark., 2024).

Sir William Robert Grove tarafından 1839'da gerçekleştirilen ilk yakıt hücresi çalışmaları, seyreltik sülfürik asitte platinlenmiş platin (Pt) elektrotlar kullanılarak suyun elektrokimyasal ayrışmasının neredeyse tersine çevrilebilir olduğu üzerinedir. Grove, iki platin elektrot içeren ve bir kaba daldırılan “gaz pili” adı verilen bir cihazı icat etmeyi başarmıştır (Wang ve ark., 2020). 1889'da Ludwig Mond ve Carl Langer adlı kimyagerler, Grove'un buluşunu gözenekli tek iletkenli bir elektrolit ekleyerek geliştirmiş ve Grove'un yakıt hücresinin kaynağı olarak yalnızca saf hidrojenin kullanılabileceği yönündeki hipotezinin aksine bu cihazlarda kömürün ana yakıt olarak kullanılabileceğini göstermiştir (Pourrahmani ve ark., 2022). 1893'te Friedrich Wilhelm Ostwald yakıt hücrelerini oluşturan maddelerin yakıt pilindeki görevlerini ve yakıt piline olan etkilerini araştırmış ve bu çalışmasıyla 1909'da Nobel Kimya Ödülü'nü almıştır. 1896'da William W. Jacques, kömürün elektrokimyasal enerjisinden doğrudan elektrik üretmeyi amaçlayan pratik uygulamalara sahip ilk yakıt hücresini tanıtmıştır. 1939'da Francis Thomas Bacon; ilk pratik hidrojen-oksijen yakıt hücresini, alkalın elektrolit ve nikel elektrotları kullanarak hava ve yakıtı doğrudan elektriğe dönüştürerek geliştirmiştir. Geliştirilen yakıt hücresi, İkinci Dünya Savaşı'nda Kraliyet Donanması denizaltıları tarafından kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bacon'un yakıt hücresi, pahalı olmasına rağmen Pratt & Whitney şirketinin desteğiyle NASA uzay aracı Apollo görevinde kullanılmıştır.

1959'da Bacon'un geliştirdiği yakıt hücresi, 5 kW'lık ve %60 verimliliğe sahip 40 hücrelik dönüm noktasına ulaşabilmiştir. 1960'ların başında, General Electric Company (GE) için çalışan kimyagerler Willard Thomas Grubb ve Leonard Niedrach yeni bir membran kullanarak kompakt ve taşınabilir bir yakıt hücresi geliştirmişlerdir. "Grubb-Niedrach yakıt hücresi" olarak bilinen bu teknolojiyi GE, NASA ile birlikte geliştirmeye devam etmiştir. Ayrıca bu teknoloji, Gemini uzay görevi için geliştirilen ilk pratik yakıt hücresi olmakla birlikte yaygın olarak da ilk PEMFC olarak kabul edilmektedir. 1970'lerde yaşanan petrol krizi hükümetleri, kuruluşları ve şirketleri sürdürülebilir ve güvenilir elektrik üretimi için başka kaynakların geliştirilmesine teşvik etmiş ve dünya genelinde kapsamlı araştırmalar başlatılmıştır (Andújar ve Segura, 2009; Pourrahmani ve ark., 2022). Yakıt hücresi sistemleri, uzay programlarındaki başarılarına rağmen, yüksek maliyetin tolere edilebildiği uzay görevleri ve özel uygulamalarla sınırlı kalmıştır. 1980'lerin sonu ve 1990'ların başında düşük platin katalizör yüklemesi ve ince film elektrotları gibi yeniliklerle PEM yakıt hücrelerinin maliyeti düşürülmüş ve ticari kullanımı daha uygulanabilir hale gelmiştir (Eberle ve ark., 2012). 1990'ların sonlarından itibaren otomotiv sektöründeki büyük firmalar PEM yakıt pilleri üzerinde çalışmaya başlamıştır. 2010'lerden itibaren hidrojen yakıt hücreli araçlar ticarileşme sürecine girerek piyasaya sürülmüştür. Günümüzde, PEMFC üretiminin büyük bir kısmı Toyota Mirai gibi araçlar için yapılmakta olup, ABD Enerji Bakanlığı 2016 itibarıyla yıllık 500.000 birim üretimle maliyetin kW başına 53 ABD doları olacağını tahmin etmiştir (Hart ve ark., 2015). Yakın gelecekte, doğal kaynakların tükenmesine yönelik artan endişeler ve fosil yakıtların aşırı tüketiminin yol açtığı çevresel zararlar konusundaki farkındalığın artması, ulaşım ve sabit güç kaynakları için yakıt hücrelerinin gelişimini destekleyecektir. Bu nedenle, on dokuzuncu yüzyılın bilimsel merakının yirmi birinci yüzyıl ve sonrasının güç kaynağı haline gelebileceği öngörülmektedir.

Bu araştırmanın amacı, Yeşil Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji alanında PEM yakıt hücresi teknolojisine dair Web of Science veri tabanında yayımlanmış akademik çalışmaların bibliyometrik analiz yoluyla gelişim metriklerini sentezlemek ve entelektüel bilgi birikiminin katkısını paylaşmaktır. Bu çalışma; GSST alanında PEM yakıt hücresine dair bibliyometrik analizin önemini vurgulayarak, araştırmacıların literatürdeki boşlukları tanımlamalarına, önemli keşifleri ve trendleri belirlemelerine ve alanın gelecekteki gelişimine yön vermelerine yardımcı olmayı hedeflemektedir.

PEM yakıt hücresi teknolojisinin son yıllarda önemli bir araştırma konusu haline gelmesinin yanı sıra sürdürülebilir enerji alanındaki genel eğilimleri ve gelişmeleri de dikkat çekmektedir. Bu bağlamda, PEM yakıt hücresini bibliyometrik analiz yöntemleriyle ele alan önceki çalışmalara yer verilerek, bu çalışmanın mevcut literatürdeki diğer çalışmalardan farkı vurgulanmaya çalışılmıştır.

Pamplona Solis ve arkadaşları (2019), PEM yakıt hücrelerinde Gaz Difüzyon Katmanındaki (Gas Diffusion Layer, GDL) kütle taşımacılığıyla ilgili yapılan araştırmaları, bibliyometrik teknikler kullanarak analiz etmeyi amaçlamıştır. Scopus ve Web of Science (WoS) veri tabanlarından elde

edilen verilerle yapılan analizde, PEMFC yayımlarının üstel bir büyüme gösterdiği ancak düzensiz bir dağılım sergilediği görülmüştür. En fazla yayın yapan ülkelerin ABD, Çin ve Japonya olduğu ve bu ülkelerin güçlü Ar-Ge harcamalarına sahip oldukları tespit edilmiştir. Prasad ve Kalla (2021), bitki türlerini biyokontrol yapısı olarak kullanan Mikrobiyal Yakıt Hücreleri (Plant Microbial Fuel Cell, PMFC) alanındaki mevcut durumu bibliyometrik analiz yöntemiyle haritalandırmayı amaçlamıştır. Çalışmada farklı PMFC modelleri geliştirilmiş, biyosensörler, atık su arıtımı ve biyoelektrik üretimi gibi çeşitli uygulamalarda faydalı oldukları belirlenmiştir. Wang ve arkadaşları (2022), yakıt hücreli motorların ticarileşmesini hızlandırmak amacıyla PEMFC'de Prognostikleri ve Sağlık Yönetimi'nin (Prognostics and Health Management, PHM) mevcut durumunu ve gelecekteki geliştirme yollarını bibliyometri tabanlı bir analizle incelemiştir. Çalışmada, alanın gelişimi üç aşamada ele alınmış ve her aşamanın temel özellikleri anahtar kelimeler ve konu geçmişi üzerinden özetlenmiştir. Analizler, bu araştırma alanının analitik indirgmeden sistematik teorik kontrole doğru evrildiğini göstermiştir. Agyekum ve arkadaşları (2022), 2000-2021 yılları arasında Scopus veri tabanında dizinlenen PEMFC makalelerini bibliyometrik analiz yöntemiyle incelemiştir. Bulgular, PEMFC alanındaki araştırmaların hızla büyüdüğünü ve Çin ile ABD'nin bu alana en büyük katkıyı sağladığını göstermiştir. Ayrıca, oksijen indirgeme reaksiyonu, elektrokataliz, proton değişim membranı, gaz difüzyon katmanı, su yönetimi ve dayanıklılık gibi kavramların öne çıkan araştırma konuları arasında olduğu gözlemlenmiştir. Deng ve arkadaşları (2022), 1990-2022 yılları arasında PEMFC araştırmalarındaki eğilimleri anlamak için bibliyometrik bir analiz gerçekleştirmiştir. VOSviewer aracılığıyla elde edilen analiz sonuçları, Uluslararası Hidrojen Enerjisi Dergisi (International Journal of Hydrogen Energy)'nin en çok yayın yapan dergi olduğunu ve Çin ile ABD'nin işbirliği yaptığı araştırmaların toplam yayımların %53,9'unu oluşturduğunu göstermiştir. Çalışmada, PEMFC araştırmalarının “Malzemeler, Tasarım ve Mekanizmalar” şeklinde üç ana tema altında toplanabileceği tespit edilmiştir. Chen ve arkadaşları (2023), ısı ve kütle transferi ve PEMFC'lerin yönetimindeki araştırma ilerlemesini ve önemli noktaları anlamak amacıyla bibliyometrik bir analiz gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, yayın sayısı, atıf sıklığı ve anahtar kelime birlikteliği analizlerine göre, bu alandaki araştırmaların 2000 yılından itibaren dalgalı bir seyir izlediğini ve son yıllarda ise hızlı bir büyüme yaşandığını göstermiştir. Çin, ABD ve Kanada'nın öncülüğünde yürütülen çalışmaların büyük bölümü Journal of Power Sources (Güç Kaynakları Dergisi), International Journal of Hydrogen Energy (Uluslararası Hidrojen Enerjisi Dergisi) ve Journal of the Electrochemical Society (Elektrokimya Derneği Dergisi) gibi dergilerde yayımlandığı görülmüştür. Yan ve arkadaşları (2023), PEMFC'ler için Membran Elektrot Düzenekleri (Membrane Electrode Assemblies, MEA) ile ilgili literatür verilerini bibliyometrik bir analiz yöntemiyle incelemiştir. Bulgular, 2003 yılından itibaren MEA alanında yayımlanan makalelerin sayısında artış olduğunu göstermiştir. En fazla makale yayımlayan ülkelerin Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve Güney Kore olup, ABD'nin yüksek kaliteli

makalelerinin en fazla atıf aldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, MEA'nın gelişiminin başlangıç aşaması, geliştirme aşaması ve optimizasyon aşaması şeklinde üç aşamaya ayrıldığı tespit edilmiştir. Zou ve arkadaşları (2024), 2003-2023 yılları arasında Proton Değişim Membran Elektrolizörü (Proton Exchange Membrane Electrolyzer, PEMEC) ile ilgili araştırmaları bibliyometrik bir analizle incelemiştir. Sonuçlar, PEMEC araştırmalarının hızla büyüdüğünü ve Çin'in bu alanda öne çıktığını göstermiştir. Yenilenebilir Enerji (Renewable Energy) dergisinin ise PEMEC ile ilgili en yüksek atıf sıklığına sahip dergiler arasında yer aldığı tespit edilmiştir. Zhao ve arkadaşları (2024), hava soğutmalı açık katot yakıt hücrelerinin araştırma durumunu istatistiksel olarak analiz etmek, görselleştirmek ve çevresel faktörlerin performans üzerindeki etkilerini bibliyometrik analiz yoluyla incelemeyi amaçlamıştır. Bulgular, çevresel uyumun araştırma için önemli olduğunu, bununla birlikte deneysel sonuçların performansın yalnızca çalışma ortamından değil, aynı zamanda depolama ortamından da etkilendiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, yüksek sıcaklık ve düşük nem ortamlarında yapılan depolama testlerinde, performansın önemli ölçüde azaldığı, özellikle yüksek sıcaklık ortamlarında polarizasyon kaybının arttığı gözlemlenmiştir. Cui ve arkadaşları (2025), maden atıkları arıtımı ve güç üretiminde Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinin (Microbial Fuel Cells, MFC) araştırma durumunu ve gelecekteki eğilimlerini belirlemek amacıyla bibliyometrik analiz kullanmıştır. 2004-2024 yılları arasındaki makaleler üzerine yapılan bibliyometrik analiz, maden atıkları arıtımı ve elektrik üretimi konularında MFC'lerin giderek daha fazla ilgi gördüğünü ortaya koymuştur. MFC araştırmalarının öne çıkan temaları arasında sistem verimliliğini artırmaya yönelik teknolojik yeniliklerin, mikroorganizmaların performansının ve elektrot malzemelerinin optimizasyonunun yer aldığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın PEM yakıt hücreleri üzerine gerçekleştirilen diğer bibliyometrik analizlerden farkı, özellikle Yeşil Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji (GSST) alanında yapılan araştırmalara odaklanmasıdır. GSST perspektifinden PEM yakıt hücrelerine dair yapılan bu bibliyometrik analiz, sadece teknoloji odaklı çalışmaların ötesine geçerek, sürdürülebilir enerji çözümleri, çevresel etkiler ve yenilenebilir enerji sistemleriyle ilişkisini derinlemesine incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma, bu alandaki mevcut araştırmaların eğilimlerini, gelişim alanlarını ve potansiyel uygulama yönlerini bir arada ele alarak, PEM yakıt hücrelerinin sürdürülebilirlik açısından taşıdığı potansiyeli daha kapsamlı bir şekilde değerlendirmektedir. Böylece, diğer literatür taramalarından farklı olarak, GSST bağlamında PEM yakıt hücrelerinin gelecekteki araştırmalarına dair özgün bir yol haritası sunmayı hedeflemektedir.

2. Materyal ve Metotlar

Bu çalışmada PEM yakıt hücresi teknolojisine dair WoS veri tabanından elde edilen makaleler nicel bir araştırma yöntemi olan bibliyometrik analiz ile incelenmiştir. Bibliyometri tekniği, genellikle belirli bir araştırma alanındaki literatürü niceliksel olarak analiz etmek ve bu araştırma alanının ilerleyişini daha iyi anlamak için kullanılmaktadır (Zou ve ark., 2018). Yeşil Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji alanında PEM yakıt hücresi teknolojisine dair WoS veri tabanındaki indekslerden elde edilen makaleler aşağıdaki araştırma hedefleri kapsamında incelenmiştir:

- PEM yakıt hücresi teknolojisinin gelişim metriklerini sentezlemek.
- PEM yakıt hücresi teknolojisinin bilgi yapısını ve eğilimlerini karakterize etmek.

Bibliyometrik kavramı 1969 yılında Alan Pritchard tarafından ortaya atılmış ve “metinsel bilginin işlenmesini göstermek için matematiksel ve istatistiksel yöntemlerin uygulanması, metinsel bilginin farklı düzeylerinin hesaplanması ve analizinin yanı sıra doğası ve eğilimi” olarak tanımlanmaktadır (Blažun Vošner ve ark., 2017).

Bibliyometrik analiz, bir araştırma konusu üzerinde ortaya çıkan eğilimleri, araştırma bileşenlerini ve işbirliği modellerini belirlemek için kullanılacak büyük hacimli verileri keşfetmeye ve analiz etmeye yönelik bir tekniktir. Dolayısıyla, bibliyometrik analiz, bilginin ve onun evrimsel eğilimlerinin büyük hacimli verilerden ve titiz bir bilimsel sürecin parçası olan bir dizi faaliyetten elde edilmesini ve haritalandırılmasını mümkün kılmaktadır. Bu da araştırmacıların bir bilim alanı hakkında kapsamlı bir vizyon elde etmelerine olanak tanımakla birlikte bilgi boşluklarını belirlemelerini, daha sonraki araştırmalar için yeni fikirleri sentezlemelerini ve alanın entelektüel yapısına katkıda bulunmalarını sağlamaktadır (Donthu ve ark., 2021).

Bibliyometrik yöntemler; yazarların, dergilerin, enstitülerin ve ülkelerin performanslarını ve araştırma modellerini değerlendirerek, aralarındaki işbirliği modellerini belirlemek ve ölçmek için kullanılmaktadır (Li ve Zhao, 2015). Etkili yazarlar ve yayınlar ile belirli bir konuda yayın yapan önemli dergiler, ülkeler ve enstitüler belirlenmektedir. Belirli bir konuda yayın yapan farklı dergilerin sayısı ve yayınlara ayrılan konu kategorileri, araştırma temalarının çeşitliliği ve bir araştırma alanının çok disiplinli karakteri hakkında fikir vermektedir (Wang ve ark., 2014). Bibliyometrik analiz ayrıca belirli bir araştırma disiplinindeki hem içerik hem de coğrafi açıdan mevcut boşlukların belirlenmesine olanak tanımaktadır (Gall ve ark., 2015).

Bibliyometrik analizde ilk dikkate alınması gereken konu çalışmanın kapsamıdır. Çalışmaya başlamadan önce araştırılacak çalışmaların içeriği ve sayısı açıkça belirlenmelidir. Aksi takdirde sonuçların zayıf ve hatalarla dolu olması, çalışmanın asıl amacına uymayacaktır. Bu nedenle veri toplamada kullanılacak anahtar kelime ya da kelimelerin iyice değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Bununla birlikte literatür taramasının kapsamının manuel inceleme için çok geniş olduğu ve

bibliyometrik verilerin büyük olduğu durumlarda bibliyometrik analizin kullanıldığını dikkate almak gerekir. Bibliyometrik analizin yalnızca incelenecek referans sayısı en az 200 makale ise önerildiği, daha küçük örneklem boyutlarıyla (<200 makale) bibliyometrik analizlerin ortalama kategori normalleştirilmiş alıntı etkilerindeki varyansın yüksek olduğu ve bu yöntem için tavsiye edilmediği görülmektedir (Rogers ve ark., 2020). Bu nedenle mevcut çalışmada anahtar kelime filtreleme, deneme-yanılma tekniklerinin kullanılması ve örneklem büyüklüğünün bibliyometrik analize uygun olacak kadar büyük olması dikkate alınmıştır.

Bu çalışmada sunulan bibliyometrik analizin metodolojik kavramsal çerçevesi performans analizi, bilim haritalaması ve trend analizi şeklinde üç ana unsura ayrılmaktadır. Performans analizi; bağlantılar, ülkeler ve kaynaklar dikkate alınarak bilimsel üretim ölçütlerinin sentezlenmesine odaklanmaktadır. Bu ölçümler, Yeşil Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji alanında PEM yakıt hücresi teknolojisinin coğrafi konum, işbirliği ağları, çeşitlilik ve bilimsel üretimin yayın kaynaklarındaki eğilimlerin belirlenmesini mümkün kılmaktadır. Bilim haritalaması, haritalama teknikleri ve kümeleme analizi yoluyla tematik alanları ve bunların bağlantılarını belirlemek için gruplamaların analizinden gerçekleştirilen PEM yakıt hücresi alanının bilgi yapısını analiz etmenin bir yoludur. Gruplandırma, PEM yakıt hücresi alanıyla ilgili konuların önemini ve gelişimini temsil eden merkezilik ve yoğunluk metriklerine göre yapılmıştır. Merkezilik ve yoğunluk ölçümleri, belgelerin temsili sözcükleri arasındaki birlikte ortaya çıkma sıklıklarından tahmin edilmektedir. Trend analizi, bilimsel araştırmalarda trend olan araştırma alanlarının, metodolojik yaklaşımların ve teknolojik yaklaşımların belirlenmesine yöneliktir. Trend analizi bilimsel haritalamadan elde edilen sonuçlara dayanmaktadır (Castañeda ve ark., 2022). Bu bölüm, bibliyometrik analiz metodolojisinin geliştirilmesine dair ayrıntılı bir açıklama sunmaktadır.

Bibliyometrik analiz tekniklerinin seçimi, ilk araştırma hedefine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Performans analizi tekniği, RStudio'daki Bibliometrix kütüphanesinin benimsendiği GSST alanında PEM yakıt hücresi teknolojisinin gelişim metriklerini sentezlemek için seçilmiştir. Çalışılan bir konunun bilimsel gelişimini tanımlamak için kaynaklar, ülkeler, bağlantılar ve anahtar kelimelerle ilgili bilimsel üretim ölçümleri seçilmiştir. Böylece performans analizi, ilk araştırma hedefine yöneliktir. PEM yakıt hücresi teknolojisinin bilgi yapısını ve ortak sözcük, tematik harita, kümelenme ve eğilim analizleri yoluyla gerçekleştirilen metodolojik ve teknolojik eğilimlerini karakterize etmek için bilim haritalama tekniği seçilmiştir. Böylece bilim haritalaması, ikinci araştırma hedefini gerçekleştirmeye yöneliktir. Bilimsel haritalama tekniğinin uygulanmasına yönelik veriler, çalışmanın bilgi yapısı ve eğilimlerini belirleme odağı dikkate alınarak örneklemde seçilen belgelerden elde edilen Anahtar Sözcükler Artı idi. Tekniklerin seçimi hem bibliyometrik analiz tekniklerinin özelliklerine hem de araştırma hedeflerinin bilgi gereksinimlerine dayanmaktadır.

Bu çalışma, bilgi haritaları çizmek için temel araçlar olarak Biblioshiny'yi seçen bir literatür taraması sunmaktadır. R Studio'nun Bibliometrix paketi ve biblioshiny yazılımı, tüm belgeler ve çok alıntı yapılan belgeler için yayın trendi analizi, alıntı analizi, anahtar kelime analizi, yazar analizi, araştırma kurumu analizi, kaynak analizi, ülke analizi ve işbirliği analizi için kullanılmaktadır. Bibliometrix R paketi, bilimsel metrolojide niceliksel araştırmalar için bir dizi araç sağlamaktadır. Açık kaynaklı bir ortam ve ekosistem olan R ile yazılmıştır. Çok sayıda etkili istatistiksel algoritmanın varlığı, yüksek kaliteli sayısal rutinlere erişim ve entegre veri görselleştirme araçları, bilimsel hesaplamada R dillerinin diğer dillere göre en güçlü nitelikleri olabilir (Aria ve Cuccurullo, 2017). Biblioshiny, Massimo Aria tarafından R dilinde Bibliometrix tabanlı Shiny paketinin ikincil gelişimi kapsamında geliştirilerek, Bibliometrix'in temel kodunu kapsüllemiş ve web tabanlı bir çevrimiçi veri analizi çerçevesi oluşturmuştur. Kullanıcının kullanım eşiğini ve bilgi girişi yoğunluğunu belirli ölçüde azaltan etkileşimli web arayüzü üzerinde kullanıcılar ilgili bilimsel ölçüm ve görsel analiz çalışmalarını gerçekleştirebilmektedir (Xie ve ark., 2020).

Bu araştırmanın verileri, 21.04.2024 tarihinde Boolean operatörü “OR” kullanılarak anahtar kelimelerin birleşiminden elde edilen bir dizi arama denkleminin tanımlandığı Web of Science arama motorunda gerçekleştirilmiştir. WoS veri tabanı, çeşitli tematik alanlardaki bilimsel literatürü geniş bir şekilde kapsamı, bilimsel yayınların analizinde yaygın kabul görmesi ve sıklıkla kullanılması nedeniyle arama motoru olarak seçilmiştir (Yang ve ark., 2013). Arama motorunda ana terim olarak “Proton Exchange Membrane PEM Fuel Cell” OR “PEM Fuel Cell” OR “PEMFC” OR “Proton Exchange Membrane Fuel Cell” OR “PEM” kavramları taratılmış ve çalışmanın odak noktası olması bakımından Yeşil Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji (GSST) alanı seçilmiştir. 2002-2024 yılları arasında GSST alanında PEM yakıt hücresi teknolojisine dair “Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED), Social Sciences Citation Index (SSCI) ve Emerging Sources Citation Index (ESCI)” dizinlerinde yer bulmuş 786 makale elde edilmiştir. Bu veriler WoS'ta indirilmesine izin verilen maksimum belge sayısı sınırlamalarına göre gruplamalar yapılandırılarak ve BibTex formatında indirilmiştir. İndirilen dosyaların farklı formatları WoS'ta indekslenen dokümanların kopya verileri dikkate alınarak RStudio yazılımıyla uyumlu bir kod uyarlanmıştır. Belge toplama sürecinden elde edilen veritabanlarının girdi bilgisi olarak kullanıldığı RStudio'nun Bibliometrix Kütüphanesi benimsenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Performans Analizi

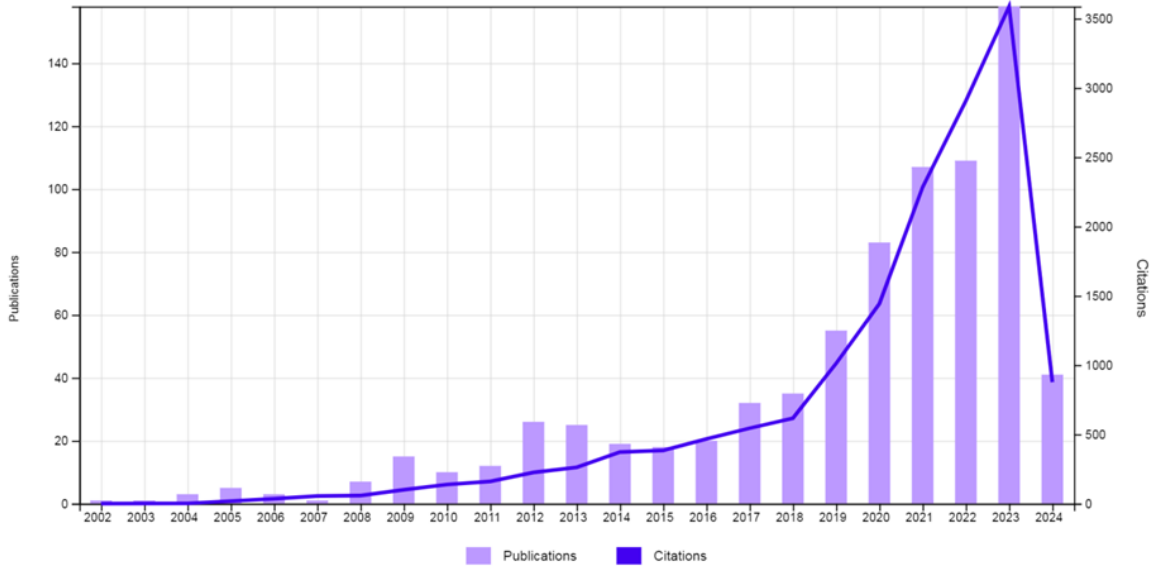
Performans analizi, bibliyometrik analizin ayırt edici özelliği olan bileşenlerin belirli bir alandaki araştırmaya katkılarını analiz etmektedir. Bu analiz, farklı bilimsel aktörlerin bilimsel üretimlerinin alıntı etkisini değerlendirmeyi amaçlamaktadır (Castañeda ve ark., 2022). Bu bölümde; veri toplamaya ilişkin tanımlayıcı istatistikler, yayın ve alıntı eğilimleri, üretken ve etkili kaynaklar ve ülkeler, üretken yazarlar, kuruluşlar ve işbirlikleri ve son olarak en çok alıntılanan belgeler dâhil olmak üzere performans analizi perspektifinden sonuçlar sunulmaktadır.

Tablo 1’de GSST alanında PEM yakıt hücresi araştırma alanı için bibliyografik veri toplamının istatistiksel bilgileri ifade edilmektedir. Tablo 1, WoS veri tabanından 2002-2024 yılları arasında ağırlıklı olarak dergiler olmak üzere 36 kaynaktan yayımlanmış 786 belgenin ana bilgilerini göstermektedir. Belge başına ortalama alıntı sayısı 19,78’dir. “Yazarın anahtar kelimeleri (DE)” yazarın belirlediği temel kavramlardır ve 2754 makale bulunmaktadır. “Anahtar kelime artı (ID)” makalelerin başlıklarında sıklıkla görülen anahtar kelime sayısıdır ve 1621 adet bulunmaktadır. Analiz için kullanılan belgeler 2835 yazar tarafından yazılmıştır ve bu belgelerin 15’i tek yazarlı iken geri kalan 2820 belge ise çok yazarlıdır.

Tablo 1. Bibliyografik veri toplamaya ilişkin temel bilgiler

Tanım	Sonuçlar
Zaman aralığı	2002:2024
Kaynaklar (Dergiler, Kitaplar vb.)	36
Belgeler	786
Yayımlandıktan sonraki ortalama yıllar	21,3
Belge başına ortalama alıntılar	4.67
Doküman başına yıllık ortalama alıntılar	19.78
Referanslar	25937
Belge İçeriği	
Anahtar Kelimeler Artı (Kimlik)	1621
Yazarın Anahtar Kelimeleri (DE)	2754
Yazarlar	
Yazarlar	2835
Tek yazarlı belgelerin yazarları	15
Yazarlar İşbirliği	
Tek yazarlı belgeler	21
Belge Başına Ortak Yazarlar	5.08
İşbirliği Endeksi	25.83
Belge Türleri	
Madde	740
Madde; erken erişim	28
Madde; kâğıt işlemleri	17
Madde; geri çekilen yayın	1

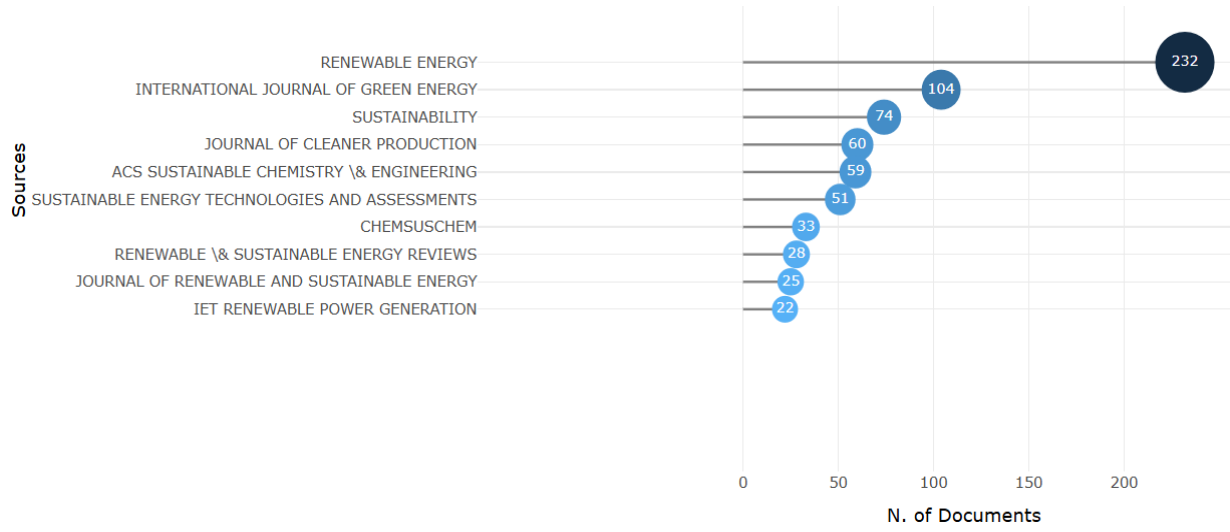
3.1.1. Yayın ve alıntı trendleri



Şekil 1. GSST alanında PEM yakıt hücresinin yıllık yayın ve alıntı dağılımı

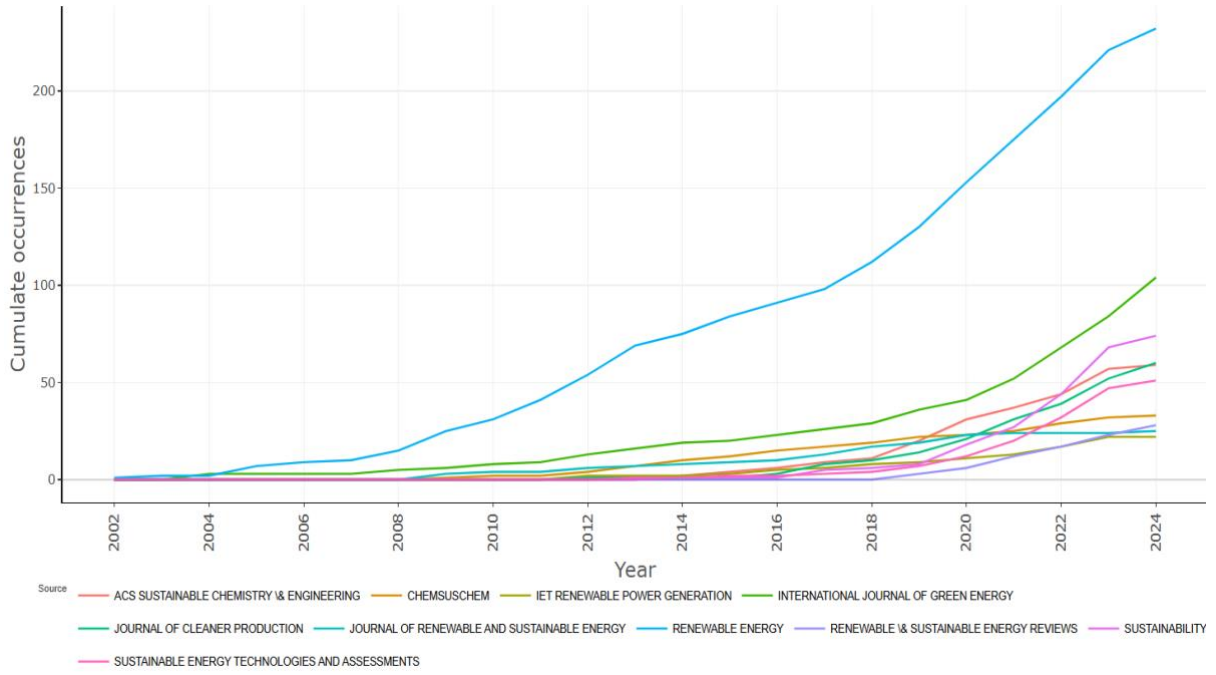
GSST alanında PEM yakıt hücresi teknolojisine ilişkin yayın ve alıntı verileri, WoS arama motorunda belirlenen dâhil etme/hariç tutma filtrelerine göre elde edilmiştir. Şekil 1'e göre 2002-2024 yılları arasında toplam 786 makale yayımlanmıştır. Bu yayınlara 12.037 analiz makalesinde atıfta bulunulmuş olup, bu alıntılardan 11.652'si kendinden alıntı içermemektedir. Genel olarak, toplam alıntı sayısı 15.557 olup, kendinden alıntılar hariç tutulduğunda bu sayı 14.692'ye düşmektedir. Ortalama olarak, her bir yayına 19,79 alıntı yapılmıştır. GSST alanında PEM yakıt hücresi araştırmalarının etkisini değerlendiren H-indeksi (Hirsch indeksi veya H-faktörü) ise 59 olarak belirlenmiştir. Bu istatistikler, araştırmacının yayınlarının etkisini ve alıntılanabilirliğini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü üzere, GSST alanında PEM yakıt hücresine yönelik ilk bilimsel yayın 2002 yılında ortaya çıkmıştır. 2016 yılına kadar yayın sayısında dalgalanmalar yaşanmasına rağmen, alıntı sayılarında istikrarlı bir artış gözlemlenmiştir. Yıllık bilimsel üretim açısından en fazla yayın, 149 makale ile 2023 yılında gerçekleştirilirken, ortalama yıllık alıntı oranının (6,4) en yüksek olduğu yıl ise 2005'tir.

3.1.2. En üretken ve etkili kaynaklar



Şekil 2. Yayın sayısına göre en ilgili 10 kaynak

Şekil 2, GSST alanında PEM yakıt hücresi teknolojisi araştırmalarıyla ilgili en üretken 10 dergiyi göstermektedir. Topun renginin yoğunluğu ve boyutu, yayın sayısını belirlerken; daha derin renk ve daha büyük boyut ise daha fazla sayıda yayın olduğunu göstermektedir. Renewable Energy (Yenilenebilir Enerji) dergisi 232 makale ile en çok yayın yapan ve örnekleme dair araştırmalar için en önemli referans kaynağıdır. Onu sırasıyla International Journal of Green Energy (Uluslararası Yeşil Enerji Dergisi) (104), Sustainability (Sürdürülebilirlik) (74) ve Journal of Cleaner Production (Temiz Üretim Dergisi) (60) takip etmektedir. ACS Sustainable Chemistry & Engineering (ACS Sürdürülebilir Kimya ve Mühendislik) (59), Sustainable Energy Technologies and Assessments (Sürdürülebilir Enerji Teknolojileri ve Değerlendirmeleri) (51) ve ChemSusChem (33) de öne çıkan diğer dergilerdir. Listeyi Renewable and Sustainable Energy Reviews (Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Enerji Değerlendirmeleri) (28), Renewable & Sustainable Energy (Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Enerji Dergisi) (25) ve IET Renewable Power Generation (IET Yenilenebilir Enerji Üretimi) (22) tamamlamaktadır. Bu bulgular, PEM yakıt hücresi araştırmalarının çok çeşitli dergilerde yayımlandığını ve konunun farklı perspektiflerden ele alındığını göstermektedir. “Renewable Energy” dergisinin lider konumda olması, bu derginin yeşil enerji ve sürdürülebilir enerji teknolojilerine odaklanması ve bu bağlamda PEM yakıt hücrelerine duyduğu ilgiyi göstermektedir. Bununla birlikte, bu araştırmaların yayımlandığı dergilerin çeşitliliği, PEM yakıt hücresi teknolojisinin sadece bir mühendislik konusu olmadığını, aynı zamanda sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve çevresel etki gibi daha geniş sosyal ve ekonomik konularla da ilişkilendirildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 3. Kaynakların zaman içindeki üretimi

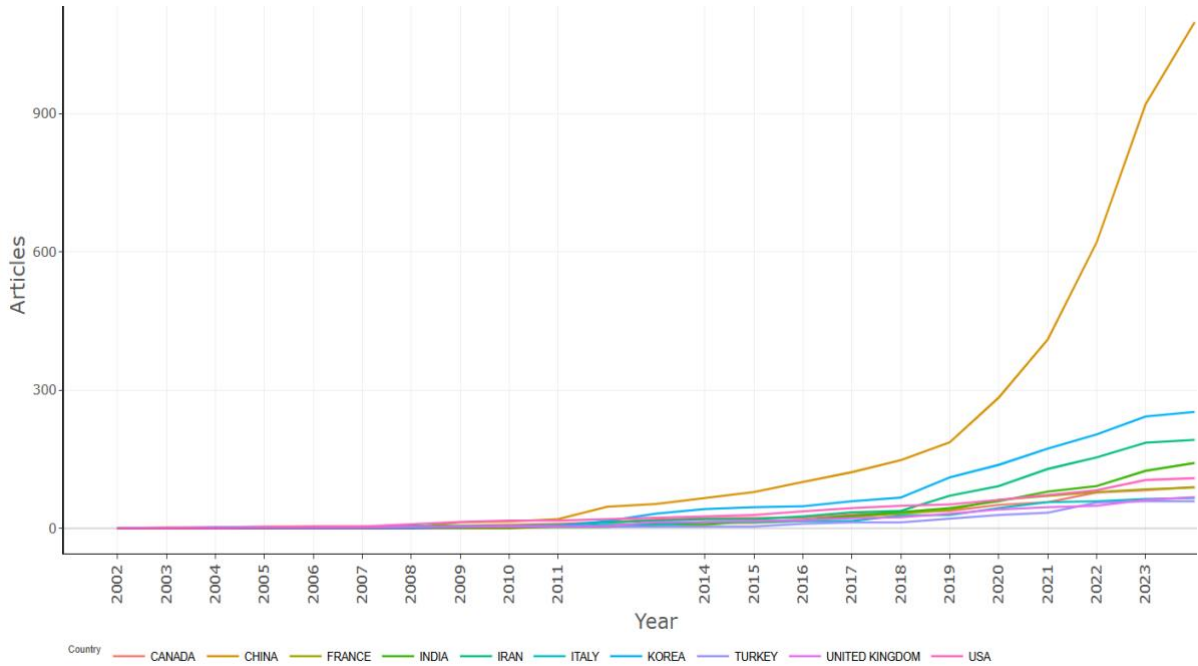
Şekil 3'teki kaynak büyüme eğrisi, 2002'den 2024'e kadar GSST alanında PEM yakıt hücresi üzerine yapılan araştırmalarla ilgili dergilerde yayımlanan makalelerin sayısındaki eğilimi göstermektedir. Örnekleme odaklı araştırmalarda uzmanlaşan Renewable Energy (232), en fazla yayına ev sahipliği yapan dergidir ve zaman içinde bu yayın sayısında önemli bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca International Journal of Green Energy, Sustainability, Journal of Cleaner Production ve ACS Sustainable Chemistry & Engineering gibi dergilerin yayın sayılarında son yıllarda artış eğilimi görülmektedir. Bu eğilim, GSST alanında enerji teknolojilerine ve araştırmalarına yönelik ilginin arttığını göstermektedir. Bu durum, yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesine, enerji sektöründe sürdürülebilirliğin sağlanmasına ve çevresel etkilerin azaltılmasına daha fazla odaklanıldığını ortaya koymaktadır.

Tablo 2. Toplam alıntılara göre en yüksek etkiye sahip kaynakların ilk 10'u

Kaynaklar	h-indeksi	g-indeksi	m-indeksi	Toplam Alıntı
Renewable Energy	46	73	2.000	7755
Journal of Cleaner Production	22	36	1.692	1376
ACS Sustainable Chemistry & Engineering	19	29	1.727	1047
Sustainable Energy Technologies and Assessments	17	29	1.417	903
ChemSusChem	16	26	1.000	729
International Journal of Green Energy	16	21	0.762	798
Sustainability	16	25	1.455	741
Renewable & Sustainable Energy Reviews	14	25	2.333	649
IET Renewable Power Generation	9	18	0.692	329
Renewable & Sustainable Energy	9	12	0.563	189

Tablo 2, GSST alanında PEM yakıt hücresi teknolojisi üzerine yayın yapan akademik dergilerin performansını ölçmek için kullanılan önemli bibliyometrik indekslerle ilişkilendirilmiştir. İndekslerin değerlendirilmesi; dergilerin akademik etkisini, yayınlarının alıntılanma sıklığını ve genel etkinliğini göstermektedir. Renewable Energy, en yüksek h-indeksi (46) ve toplam alıntılar (7755) ile diğerlerine göre daha fazla etkiye sahiptir. Bu, Renewable Energy dergisinin yayınlarının geniş çapta alıntılındığını ve alanında önemli bir kaynak olduğunu göstermektedir. ACS Sustainable Chemistry & Engineering dergisi, H-indeksi (19) ve toplam alıntıları (1047) bakımından önemli bir etkiye sahiptir. Orta seviyede bir h-indeksi (16) ve toplam alıntılar (741) ile Sustainability dergisinin bu alanda önemli bir kaynak olduğu kabul edilmektedir. Renewable & Sustainable Energy Reviews dergisinin ise diğerlerine göre daha düşük bir h-indeksi (14) ve toplam alıntılar (649) ile belirli bir etki alanının olduğu ancak daha az alıntılındığı anlaşılmaktadır. IET Renewable Power Generation ve Renewable & Sustainable Energy dergilerinin hem h-indeksinin hem de toplam alıntılarının diğerlerine göre daha düşük olması bu dergilerin akademik etkisinin daha sınırlı olduğunu göstermektedir.

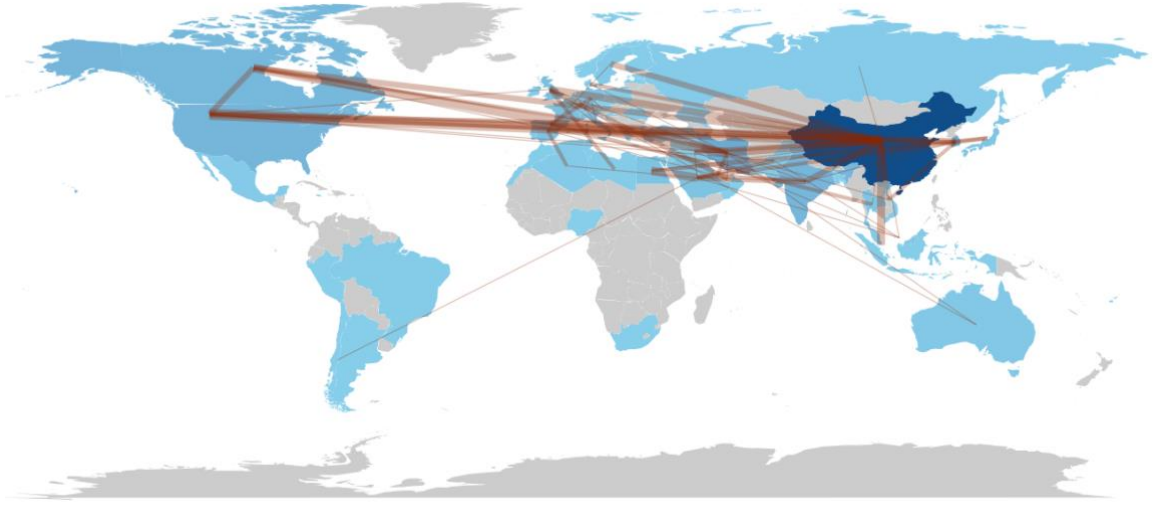
3.1.3. En üretken ve etkili ülkeler



Şekil 4. Ülkelerin zaman içerisindeki bilimsel üretimi

Şekil 4'te, GSST alanında PEM yakıt hücresi teknolojisi üzerine çalışan 61 farklı ülke, yayın sayılarına ve zaman içindeki bilimsel üretim trendlerine göre değerlendirilmiştir. 2002-2024 yıllarını kapsayan örnekleme, en fazla bilimsel üretime sahip ilk on ülke sırasıyla Çin (1099), Güney Kore (253), İran (192), Hindistan (142), Amerika Birleşik Devletleri (109), Kanada (90), Fransa (89),

Birleşik Krallık (68), İtalya (66) ve Türkiye (59) olarak belirlenmiştir. Analiz sonuçları, Çin'in bu alandaki liderliğinin, ülkenin yenilenebilir enerji ve çevre teknolojilerine yaptığı yatırımların bir sonucu olabileceğini göstermektedir. Türkiye'nin listede yer alması ve bilimsel üretiminin yıllar içinde artış göstermesi ise olumlu bir gelişmedir. Ülkenin PEM yakıt hücresi teknolojisi alanındaki araştırma ve geliştirme faaliyetlerine katılımı, uluslararası alandaki bilimsel varlığını ortaya koymakta ve yenilikçi teknolojilere katkısının arttığını göstermektedir. Bu durum, Türkiye'nin gelecekte bu alanda daha fazla yatırım yapabilecek potansiyele sahip olduğunu da düşündürmektedir.



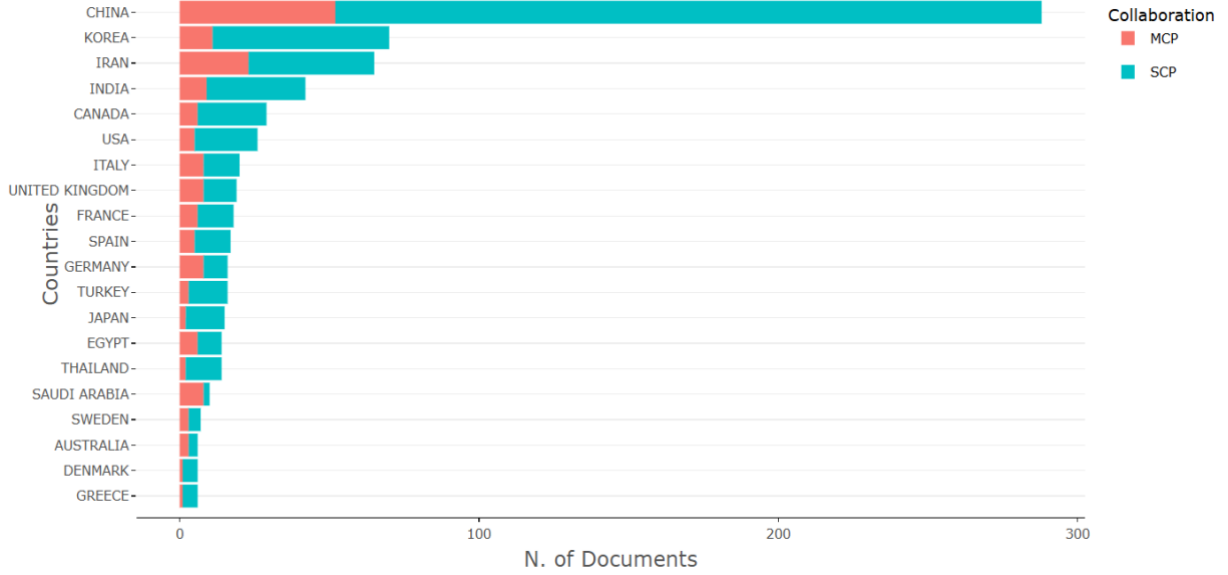
Şekil 5. Ülkelerin işbirliği ağ haritası

Şekil 5, ülkelerin GSST alanında PEM yakıt hücresi teknolojisi üzerine yürüttüğü araştırma ve geliştirme faaliyetlerindeki küresel işbirliği ağını göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre, Çin bu alanda en fazla işbirliği yapan ülke olarak öne çıkmaktadır. Ülkeler arası bağlantı hatlarının kalınlığı ve renginin koyuluğu, işbirliğinin sıklığını ifade etmektedir. Bu doğrultuda, Çin ile Amerika Birleşik Devletleri arasında köklü bir işbirliği olduğu görülmektedir. Çin'in diğer önemli işbirliği ortakları arasında Singapur, İran, Birleşik Krallık, Kanada ve Hindistan yer almaktadır. Bu durum, Çin'in Asya ve Avrupa'daki önemli aktörlerle ilişkilerini güçlendirmeye çalıştığını göstermektedir. Ayrıca, Mısır ile Suudi Arabistan, İran ile Kanada ve Amerika Birleşik Devletleri ile Güney Kore arasında da güçlü işbirliklerinin olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 3. En çok alıntı yapılan ülkelerin ilk 10'u

Sıra	Ülkeler	Toplam Alıntı (TC)	Ortalama Makale Alıntıları
1	Çin	2920	10,10
2	İran	2478	38,10
3	Kore	1174	16,80
4	ABD	915	35,20
5	Kanada	760	26,20
6	Hindistan	620	14,80
7	Mısır	618	44,10
8	İtalya	574	28,70
9	Büyük Krallık	544	28,60
10	Fransa	539	29,90

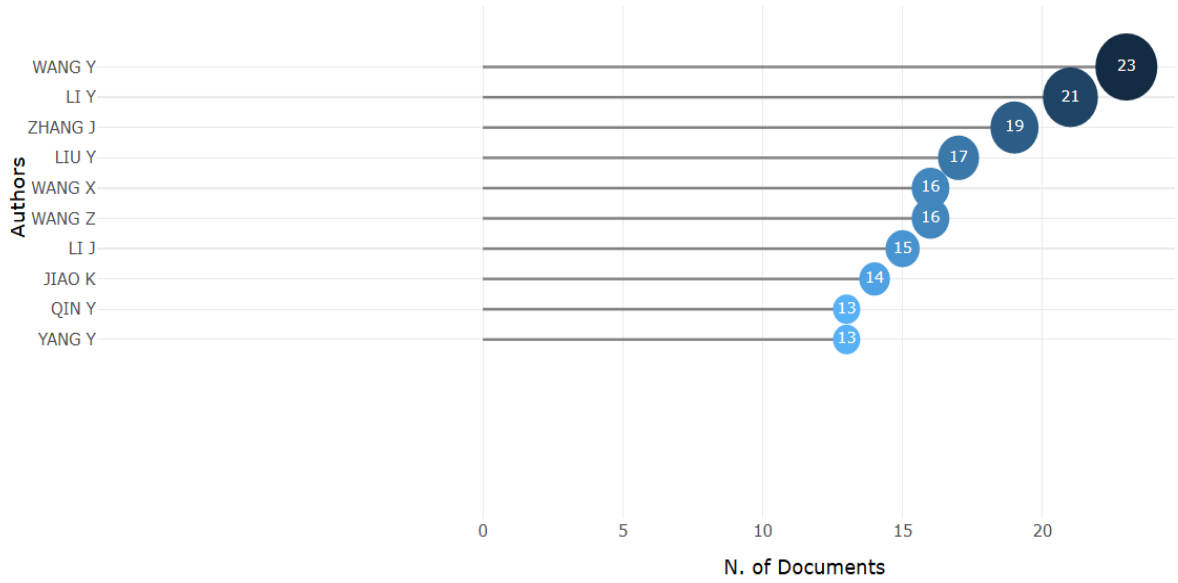
Tablo 3'ün verileri GSST alanında PEM yakıt hücresine dair en çok alıntı yapılan ülkelerin ilk onunu göstermektedir. Toplam Alıntı (Total Citation, TC), bir ülkenin araştırmalarının toplamda kaç kez referans gösterildiğini ifade eder ve bu, o ülkenin ilgili alandaki bilimsel etkisini ve görünürlüğünü gösteren önemli bir ölçüttür. Ortalama Makale Alıntıları ise bir ülkenin yayın başına düşen ortalama alıntı sayısını ifade etmektedir. Verilere göre, en çok alıntı yapılan ülkeler arasında Çin, toplam 2920 alıntı ile ilk sırada yer almakta, ancak ortalama makale alıntısı (10,10) görece düşük seviyededir. Bu durum, Çin'in yüksek sayıda yayın üretmesine rağmen, makalelerinin bireysel olarak daha az alıntı aldığı göstermektedir. İran, 2478 toplam alıntı ile ikinci sırada yer almakta ve ortalama makale alıntısı (38,10) ile oldukça yüksek bir etki faktörüne sahiptir. Benzer şekilde, ABD (35,20), Kanada (26,20), İtalya (28,70), Birleşik Krallık (28,60) ve Fransa (29,90) da yüksek ortalama alıntı sayılarına sahiptir, bu da ülkelerinin yayınlarının daha fazla atıf aldığı ve akademik etkilerinin güçlü olduğunu göstermektedir. Özellikle Mısır, 618 toplam alıntı ile yedinci sırada olmasına rağmen, 44,10 ortalama makale alıntısı ile listede en yüksek etkiye sahip ülkedir. Bu, Mısır'ın nispeten daha az sayıda ancak etkili çalışmalar ürettiğini göstermektedir. Güney Kore (16,80) ve Hindistan (14,80) ise toplam alıntı açısından üst sıralarda yer alsa da, makalelerinin ortalama alıntı sayıları orta seviyededir. Genel olarak, Çin ve İran yüksek toplam alıntı sayılarına sahipken, Mısır, ABD ve Avrupa ülkeleri ortalama makale alıntısı açısından daha etkili çalışmalar üretmektedir. Bu durum, bazı ülkelerin yüksek hacimli üretime, bazılarının ise daha az ancak daha etkili yayınlara odaklandığını göstermektedir.



Şekil 6. Sorumlu yazarların ülkesi

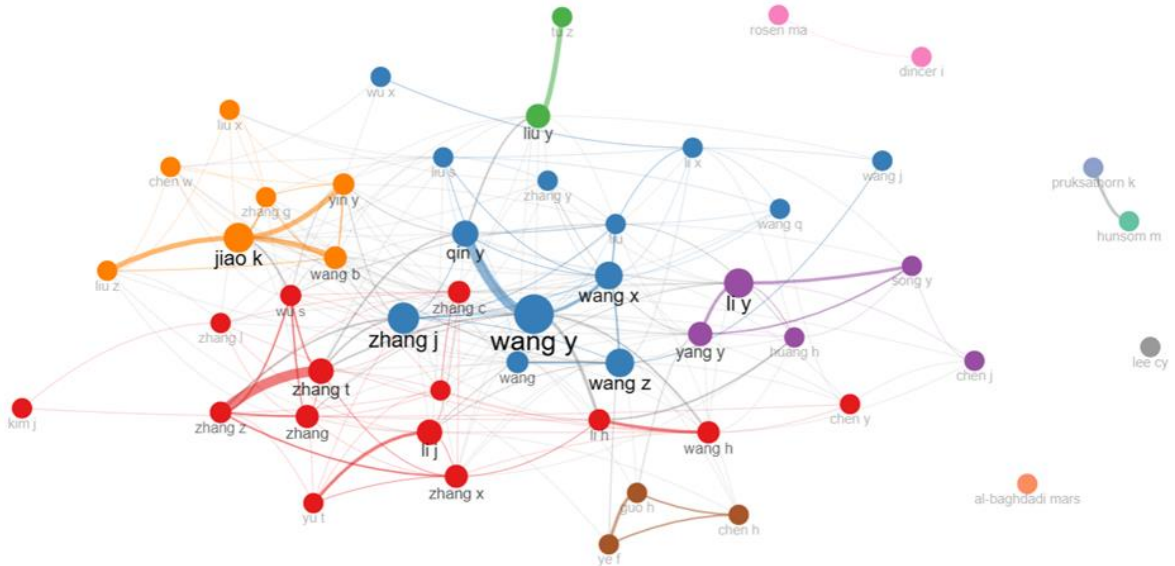
Şekil 6, GSST alanında PEM yakıt hücresi araştırmalarında ülkelerin bilimsel üretimini ve çok ülkeli işbirliklerini göstermektedir. Bir ülkenin uluslararası işbirliği ile kendi iç araştırma kapasitesi arasındaki dengeyi belirlemek için toplam makale sayısına göre Tek Ülkeli Yayınlar (Single Country Publications, SCP) ve Çok Ülkeli Yayınlar (Multi Country Publications, MCP) arasındaki oranlar değerlendirilmektedir. Çin, 288 toplam makale sayısı ile belirgin bir üstünlüğe sahiptir. Çin'in MCP sayısı (52) düşük bir değere sahipken, SCP sayısı (236) ise çok daha yüksektir. Bu, Çin'in PEM yakıt hücresi araştırmalarında diğer ülkelere göre daha çok uluslararası işbirliği yaptığını ve kendi iç araştırma kapasitesinin de güçlü olduğunu göstermektedir. İran ve Kore, hem toplam makale sayısı hem de SCP açısından önemli bir konumda bulunurken, çok uluslu çalışmalara katılımları daha sınırlıdır. ABD, Kanada ve Hindistan görece daha az makale üretmelerine rağmen, SCP ve MCP yayınları arasındaki oranların genellikle dengeli olduğu görülmektedir. İtalya, İngiltere, Fransa ve İspanya gibi Avrupa ülkelerinin ise toplam makale sayıları daha düşüktür ancak, SCP ve MCP yayınları arasındaki dengeli dağılımın bu ülkelerin uluslararası işbirliğine açık olduğunu ve bu alanda etkin bir şekilde çalıştıklarını göstermektedir.

3.1.4. En üretken yazarlar ve işbirlikleri



Şekil 7. Yayın sayısına göre en ilgili ilk 10 yazar

GSST alanında PEM yakıt hücresi araştırmalarına ilişkin toplam 2835 yazar 786 yayımla katkı sağlamıştır. Şekil 7, örnekleme dair en üretken ilk on yazarı göstermektedir. Wang Y, 23 makale ile en üretken araştırmacı iken bunu sırasıyla Li Y (21), Zhang J (19), Liu Y (17), Wang X (16), Wang Z (16), Liu J (15), Jiao X (14), Qin Y (13) ve Yang Y (13) takip etmektedir.

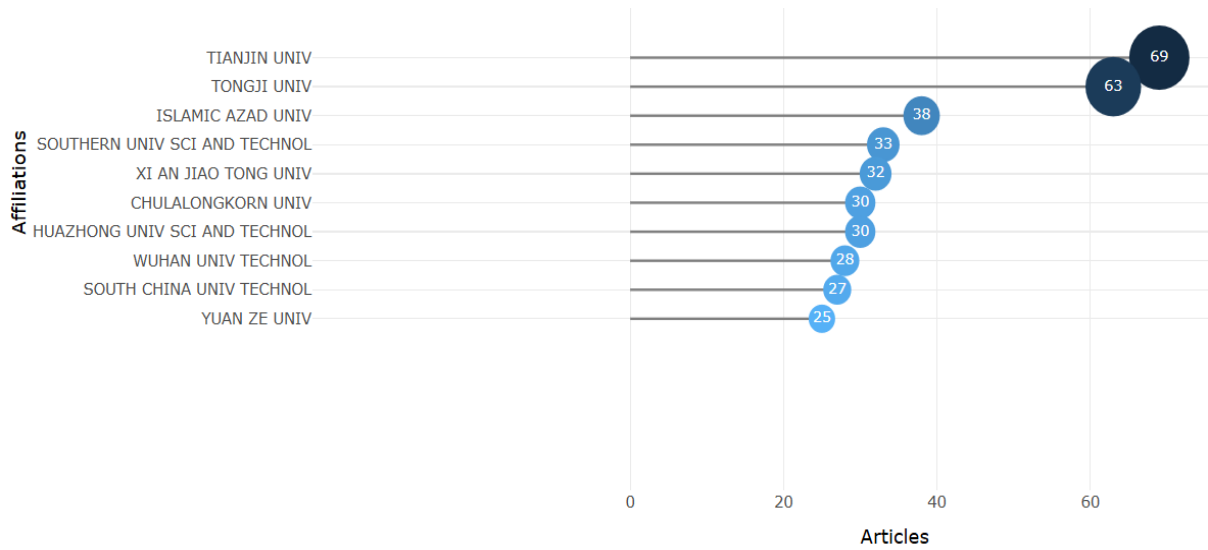


Şekil 8. Yazarların sosyal yapıları işbirliği ağ haritası

Şekil 8 ağ grafiği, GSST alanında PEM yakıt hücresi üzerine çalışan yazarların işbirliklerini analiz etmektedir. Grafikte, en az iki ortak yayına sahip yazarlar arasındaki işbirlikleri kenarlarla,

yazarların kendisi ise düğümlerle temsil edilmektedir. Düğümlerin boyutu, yazarın işbirliği kapsamında yayınladığı belge sayısını; kenarların kalınlığı ise işbirliği yoğunluğunu (daha kalın kenarlar, daha sıkı işbirliği) göstermektedir. Wang Y, en büyük düğüme sahip olduğu için işbirlikçi ağın merkezinde yer almaktadır. Bu, Wang Y'nin GSST alanında PEM yakıt hücresi araştırmalarında önemli bir rol oynadığını ve geniş bir işbirliği ağına sahip olduğunu göstermektedir. Aynı renkteki düğümler, kendi içlerinde yoğun işbirlikleri bulunan kümeleri temsil ederken, mavi küme en geniş işbirlikçi ağı barındırmaktadır. Kırmızı, turuncu ve mor kümeler ise birbirlerinden görece bağımsız çalışan ancak kendi içlerinde sıkı işbirlikleri geliştiren alt grupları göstermektedir. Örneğin, turuncu kümenin Jiao K etrafında şekillendiği ve belirli bir araştırma alanına odaklandığı düşünülmektedir. Zhang J ile Wang Y arasındaki kalın çizgi, bu iki yazarın yoğun ortak çalışmalar yaptığını göstermektedir. Ayrıca, ağda yer alan yazarların büyük çoğunluğunun Çin kökenli olması ve işbirliklerinin de çoğunlukla bu ülke içinde yoğunlaştığı dikkat çekmektedir. Tablo 1'de oldukça yüksek olan 25,83'lük bir işbirliği indeksinin rapor edilmiş olması da yazarların işbirliğinin yoğun olduğunu göstermektedir.

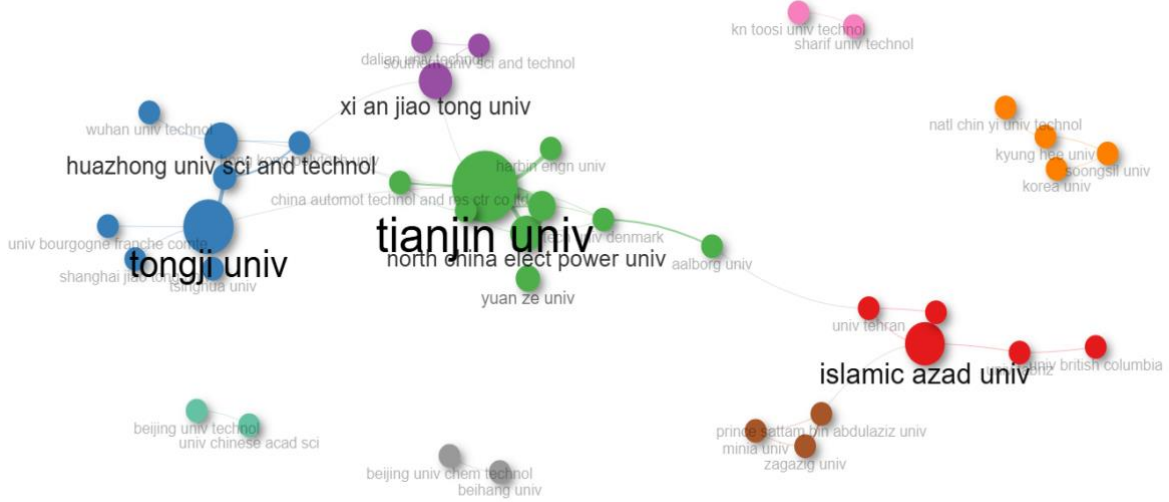
3.1.5. En üretken kuruluşlar ve işbirlikleri



Şekil 9. En çok yayın yapan araştırma kurumları

Şekil 9'da GSST alanında PEM yakıt hücresi araştırmalarına katkıda bulunan en ilgili kuruluşlara ilişkin analiz sonucu sunulmaktadır. Bu alanda 69 yayını bulunan Tianjin Üniversitesi lider kuruluş olarak öne çıkmaktadır. Bunu sırasıyla Tongji Üniversitesi (63), Islamic Azad University (İslami Azad Üniversitesi) (38), Southern University of Science and Technology (Güney Bilim ve Teknoloji Üniversitesi) (33), Xi'an Jiaotong Üniversitesi (32), Chulalongkorn Üniversitesi (30), Huazhong University of Science and Technology (Huazhong Bilim ve Teknoloji Üniversitesi)

(30), Wuhan University of Technology (Wuhan Teknoloji Üniversitesi) (28), South China University of Technology (Güney Çin Teknoloji Üniversitesi) (27) ve Yuan Ze Üniversitesi (25) takip etmektedir.



Şekil 10. Kurumların sosyal yapıları işbirliği ağ haritası

Şekil 10’da GSST alanında PEM yakıt hücresi üzerine çalışan kuruluşların işbirliği ağ analizi sunulmaktadır. Düğümler arasındaki bağlantı kurumsal işbirliğini göstermektedir. Kenarların kalınlığı işbirliğinin sıklığını gösterirken, daha kalın kenarlar bağlı kurumlar arasında daha fazla işbirliği anlamına gelmektedir. Grafik, kurumsal işbirliklerinin kurumların coğrafi yakınlığına göre kurulduğunu ve bağlantıların büyük ölçüde aynı ülkedeki kurumlar arasında olduğunu göstermektedir. Yeşil ve mavi renkli kümelenen kurumların Çin’deki Tianjin ve Tongji Üniversitesi’nin hâkimiyetinde olduğu görülmektedir.

3.1.6. En çok alıntılanan belgeler

GSST alanında PEM yakıt hücresi literatürüne hangi çalışmaların katkıda bulunduğunu belirlemek, bu araştırma alanının evrimini anlamak açısından oldukça önemlidir. Ayrıca, literatürdeki alıntı eğilimlerinin incelenmesi, bu alandaki araştırmaların yönelimlerini ve gelecekteki potansiyel gelişim alanlarını ortaya koymaktadır. Bu çalışmada gerçekleştirilen analizler sonucunda, toplam 786 belge incelenmiş ve bu belgelerin 25.937 alıntı aldığı belirlenmiştir. Belge başına ortalama 4.67 alıntı ve yıllık ortalama %21,3 alıntı oranı ile alanın dinamik yapısı ortaya konmuştur. Çalışmada yazar, yayın, kaynak, kurum gibi araştırma bileşenlerinin etkisi, belge üretim sıklığı ve/veya alıntı performansı üzerinden değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, yerel alıntı (local citation), analiz edilen veri kümesindeki her bir yayının diğer yayınlar tarafından kaç kez atıf aldığını gösterirken, küresel

alıntı (global citation) bir yayının Web of Science (WoS) veri tabanında toplamda kaç kez alıntılındığını ölçmektedir. Küresel alıntı, aynı zamanda belirli bir yayının disiplinlerarası etkisini ve diğer çalışma alanlarıyla etkileşim düzeyini anlamak için önemli bir gösterge niteliğindedir.

Tablo 4. Küresel olarak en çok alıntılanan ilk 10 belge

Belgeler	DOI	TC	Yıllık TC	Normalleştirilmiş TC
SOPIAN K, 2006, RENEW ENERGY	10.1016/j.renene.2005.09.003	267	14,05	2,43
PATHAPATI PR, 2005, RENEW ENERGY	10.1016/j.renene.2004.05.001	246	12,30	1,91
UZUNOGLU M, 2009, RENEW ENERGY	10.1016/j.renene.2008.06.009	235	14,69	6,16
BAZIAR A, 2013, RENEW ENERGY	10.1016/j.renene.2013.03.026	206	17,17	5,37
EL-FERGANY AA, 2018, RENEW ENRGY	10.1016/j.renene.2017.12.051	204	29,14	5,32
KHAN MJ, 2005, RENEW ENERGY	10.1016/j.renene.2004.05.013	180	9,00	1,40
ROSHANDEL R, 2012, RENEW ENRGY	10.1016/j.renene.2011.10.008	137	10,54	4,30
PARIKHANI T, 2019, J CLEAN PROD	10.1016/j.jclepro.2018.09.181	137	22,83	3,85
ATYABI SA, 2019, J CLEAN PROD	10.1016/j.jclepro.2018.12.293	134	22,33	3,76
EBADOLLAHI M, 2019, RENEW ENRGY	10.1016/j.renene.2018.11.108	131	21,83	3,68

Tablo 4, küresel olarak en çok alıntı yapılan on belgeyi göstermektedir. Sopian K (2006) tarafından gerçekleştirilen “Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells (Proton değişim membranlı yakıt hücrelerindeki zorluklar ve gelecekteki gelişmeler)” başlıklı çalışma, en fazla küresel alıntıya (267) sahiptir ve bu da onu tüm alanlar içinde en önemli ve etkili çalışma yapmaktadır. Çalışma, PEM yakıt hücrelerindeki zorlukları ve gelecekteki gelişmeleri konu edinmektedir. El-Fergany (2018) tarafından gerçekleştirilen “Extracting optimal parameters of PEM fuel cells using Salp Swarm (Salp Swarm Optimizer kullanılarak PEM yakıt hücrelerinin optimum parametrelerinin çıkarılması)” başlıklı çalışma ise toplam alıntılarda beşinci sırada yer almasına rağmen yıllık toplam alıntılarda 29,14 oranıyla en çok alıntılanandır. Çalışmada, PEMFC modelinin bilinmeyen parametrelerini en uygun şekilde belirlemek amacıyla, sezgisel tabanlı yaklaşımlar arasında oldukça yeni bir yöntem olan Salp Swarm Optimizer (SSO) kullanılarak geliştirilen yenilikçi bir uygulama sunulmaktadır.

Tablo 5. Yerel olarak en çok alıntılanan ilk 10 belge

Belge	DOI	LC	GC	LC/GC Oranı (%)		
				NLC	NGC	
ATYABI SA, 2019, J CLEAN PROD	10.1016/j.jclepro.2018.12.293	14	134	10,45	14,26	3,76
PATEL S, 2008, INT J GREEN ENERGY	10.1080/15435070701839413	9	22	40,91	3,71	0,47
PARK YH, 2008, INT J GREEN ENERGY	10.1080/15435070802414447	8	30	26,67	3,29	0,64
WILBERFORCE T, 2019, REN SUST ENR REV	10.1016/j.rser.2019.04.081	8	122	6,56	8,15	3,43
SHAYGAN M, 2019, J CLEAN PROD	10.1016/j.jclepro.2019.06.298	8	88	9,09	8,15	2,47
JABBARY A, 2021, INT J GREEN ENR	10.1080/15435075.2020.1865361	8	29	27,5	43,76	1,48
CHATRATTANAWET N, 2017, J CLEAN PRO	10.1016/j.jclepro.2017.02.033	7	49	14,29	11,79	1,59
DUCLOS L, 2017, J CLEAN PROD	10.1016/j.jclepro.2016.10.197	6	51	11,76	10,11	1,66
MAMAGHANI AH, 2018, J CLEAN PROD	10.1016/j.jclepro.2018.01.124	6	51	11,76	23,33	1,33
AZARAFZA A, 2017, REN SUST ENRG REV	10.1016/j.rser.2019.109420	6	54	11,11	6,11	1,52

Tablo 5, yerel olarak en çok alıntı yapılan on belgeyi göstermektedir. Atyabi SA (2019) tarafından gerçekleştirilen “Three-dimensional multiphase model of proton exchange membrane fuel cell with honeycomb flow field at the cathode side (Katot tarafında petek akış alanına sahip proton değişim membranlı yakıt hücresinin üç boyutlu çok fazlı modeli) başlıklı çalışma, toplam 14 alıntı ile analiz edilen veri kümesinde yerel olarak en çok alıntılanandır. Çalışma, katot tarafında petek akış alanına sahip bir PEM yakıt hücresinin üç boyutlu çok fazlı modelini sunmaktadır.

3.2. Bilim Haritalaması

Bilim haritalaması, bir araştırma alanının bileşenleri arasındaki ilişkileri analiz ederek, bu bileşenler arasındaki entelektüel etkileşimleri ve yapısal bağları ortaya koymaktadır. Bilim haritalaması, haritalama teknikleri ve kümeleme analizi yoluyla tematik alanları ve bunların bağlantılarını belirlemek için gruplamaların analizi ile gerçekleştirilen bilgi yapısının karakterizasyonuna odaklanmaktadır (Castañeda ve ark., 2022). Bu bölümde, anahtar kelimeler, trend konu eğilimleri ve tematik haritalama modelleri dahil olmak üzere bilim haritalama analizinden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

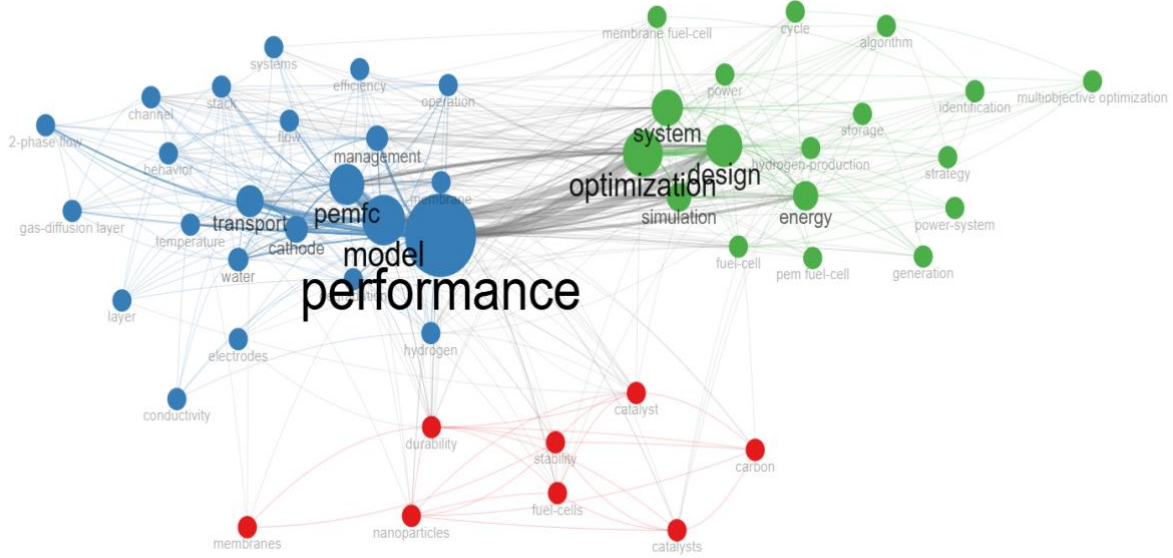
3.2.1. Anahtar kelimelerin analizi ve birlikte oluşum ağı



Şekil 11. GSST alanında PEM yakıt hücresi araştırmasında en ilgili anahtar kelimeler

Şekil 11, GSST alanında PEM yakıt hücresine ilişkin kelime bulutunu göstermektedir. Bu görsel, yazarların bilimsel makaleleri indekslemek için kullandıkları daha büyük ve göze çarpan bir yazı tipinde daha yüksek sıklığa ve anahtar kelime yoğunluğuna sahip terimleri ve bunların ne sıklıkta bir arada bulunduğunu göstermektedir. Görseldeki kelime bulutunu yazarın anahtar sözcükleri (DE),

yayın başlıkları ve özetler oluşturmaktadır. Bu koleksiyon, Biblioshiny arayüzünde Keyword Plus (ID) olarak nitelendirilmektedir. Performans (Frekans:208) en çok kullanılan anahtar kelime iken bunu sırasıyla model (Frekans:110), optimizasyon (Frekans:99), tasarım (Frekans:95), pemfc (Frekans:87), sistem (Frekans:82), ulaşım (Frekans:64), enerji (Frekans:58), simülasyon (Frekans:54) ve katot (Frekans:48) takip etmektedir. Bu durum, anahtar kelimelerin kelime bulutundaki diğerlerinden daha büyük olmasının nedenidir.

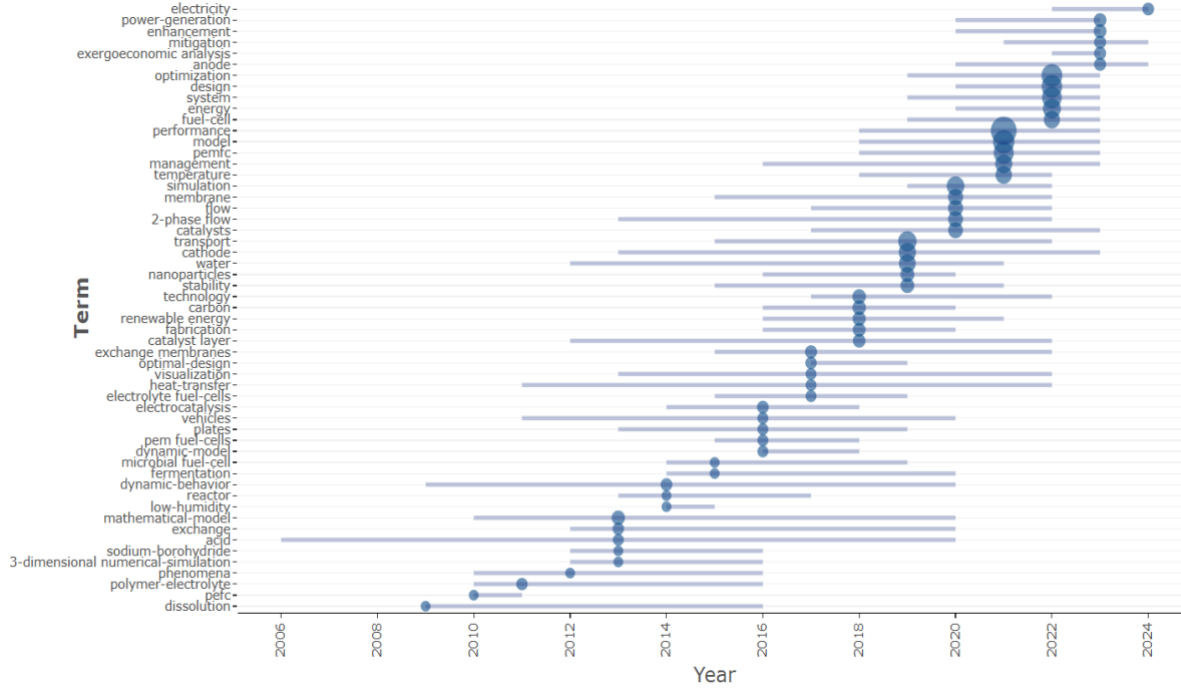


Şekil 12. Anahtar kelimeler birlikte oluşum ağı

Şekil 12'de GSST alanında PEM yakıt hücresi araştırmasındaki Anahtar Kelimeler Birlikte Oluşum Ağı (Keyword Co-occurrence Network, KCN) gösterilmektedir. KCN, düğümlerden (Anahtar Kelimeler) ve bu düğümleri birbirine bağlayan kenarlardan (bağlantılar) oluşmaktadır. Düğümler arasındaki kenarlar, bağlı anahtar kelimeler arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir. Daha kalın bir kenar, bağlı düğümler arasındaki ilişkinin daha güçlü olduğunu veya daha yakın bir ilişkiyi veya bu anahtar kelimelerin daha sık birlikte kullanıldığını göstermektedir. Bu kalınlık, bağlantılı anahtar kelimeler arasında paylaşılan belge sayısını ifade etmektedir. Yani, bağlantılı anahtar kelimelerin birden fazla belgede kaç kez birlikte geçtiğini göstermektedir. “Performans” ve “model” arasındaki kalın bağlantı, iki anahtar kelimenin diğer bağlantılı anahtar kelime çiftlerine göre daha fazla belgede birlikte bulunduğunu göstermektedir. Bir ağ içindeki bir anahtar kelimenin (düğümün) önemi, o anahtar kelimeye verilen bağlantıların (kenarların) sayısı ile gösterilmektedir. “Performans”, en yüksek merkeziliğe (382.493) sahip önemli bir anahtar kelimedir. Bu durum, anahtar kelimenin bu alandaki ana araştırma temaları arasında köprü oluşturduğu anlamına gelmektedir (Painter ve ark., 2019). Kümeler, bu anahtar kelimelerin sıklıkla birlikte ortaya çıktığı araştırma alanlarıyla karakterize edilmektedir. Mavi kümeyi performans, pemfc, model ve ulaşım gibi anahtar kelimeler; yeşil küme

bulutunu optimizasyon, tasarım, sistem, enerji, hidrojen üretimi, güç, yakıt hücresi ve strateji gibi anahtar kelimeler; kırmızı kümeyi ise membranlar, dayanıklılık, nanopartiküller, katalizör ve yakıt pilleri gibi anahtar kelimeler oluşturmaktadır ve bu kümeler, oluşturulduğu anahtar kelimeler ile ilgili alanlarla ilişkilidir.

3.2.2. Trend konular

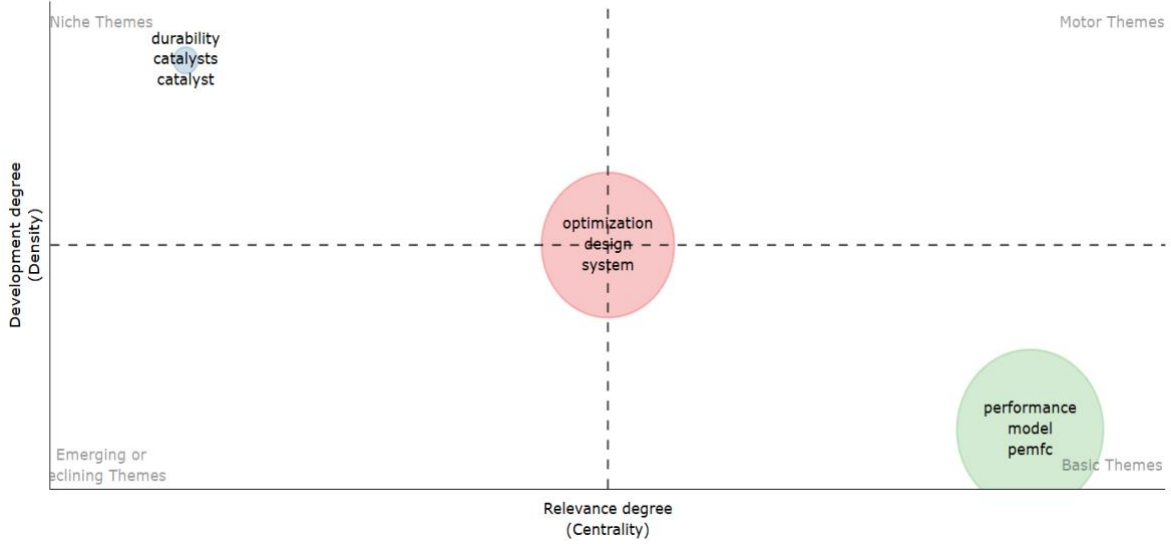


Şekil 13. Trend konular grafiği

Yazarların konu ilgi alanlarını yansıtmak amacıyla kullandıkları anahtar kelimeler detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu doğrultuda trend konu analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, araştırma alanındaki konu evrimini, dönemsel eğilimleri ve ön plana çıkan temaları belirlemeye yönelik önemli bulgular sunmaktadır. Şekil 13'te sunulan trend konu grafiği, 2002'den 2024'e kadar GSST alanında PEM yakıt hücresine yönelik araştırma yaklaşımlarında kademeli bir değişim yaşandığını ortaya koymaktadır. Analizde kullanılan grafiksel parametre ayarı, yazarın kelime sıklığı minimum 3, yıllık kelime sayısı 5'tir. Grafikteki çizgiler, belirli terimlerin kullanıldığı yılları göstermektedir ve çizgiler üzerindeki balonlar, o kelimenin en yoğun olarak kullanıldığı yılları belirtmektedir. Balonların büyüklüğü, ilgili terimin araştırılma sıklığını temsil eder; balonlar ne kadar büyükse, terim o kadar sık araştırılmış demektir. 2021'deki en büyük balonla gösterilen "Performans" terimi, 208 frekansla en sık kullanılan anahtar kelime olarak öne çıkmaktadır. Araştırma alanına dair 2024'teki trend konunun ise "Elektrik" terimi olduğu görülmektedir. Bu durum, PEM yakıt hücreleri çalışmalarının elektrik üretimi ve enerji uygulamalarına yönelik daha geniş bir perspektife kaydığını işaret etmektedir. Örnekleme dair araştırmalara ilişkin çalışmalar 2022 yılında "Optimizasyon, Tasarım,

Sistem, Enerji, Yakıt Hücresi”, 2021 yılında “Performans, Model, PEMFC, Yönetim, Sıcaklık”, 2020 yılında “Simülasyon, Membran, Akım, 2-Fazlı Akım, Katalizörler”, 2019 yılında “Ulaşım, Katot, Su, Nanopartiküller, İstikrar”, 2018 yılında ise “Teknoloji, Karbon, Yenilenebilir Enerji, Üretme, Katalizör Katmanı” gibi çeşitli araştırma alanlarını kapsamaktadır.

3.2.3. Tematik haritalama



Şekil 14. GSST alanında PEM yakıt hücresi araştırmasının tematik haritası

Şekil 14, 2002-2024 zaman aralığındaki kümeleri ve anahtar kelimeleri yoğunluk ve merkeziliğe göre dört çeyrekte sınıflandıran bir tematik haritadır. Tematik harita, temalar arasındaki bağlantıların net bir şekilde yorumlanmasını ve bir alandaki önemli kavramların tanımlanmasını sağlamaktadır (Grivel ve ark., 1995). Tematik harita, sırasıyla yoğunluk ve merkezilik olarak ölçülen temaların iç (kavramlar arasındaki korelasyon) ve dış (düğümlerin bütünlüğü) ilişkisinin anlamsal gücünün bir görselleştirmesini sunmaktadır (Aria ve ark., 2021). Sağ üst çeyrek sürüş veya motor temalarını, sağ alt çeyrek temel temaları, sol alt çeyrek ortaya çıkan veya azalan temaları ve sol üst çeyrek ise niş temaları göstermektedir. Temel temalar olarak adlandırılan ikinci çeyrekte “Performans, Model ve PEMFC” gibi anahtar kelimeler, yüksek merkeziliğe sahip olmalarına rağmen nispeten düşük etkiye sahiptir. Bu durum, söz konusu temaların belirli bir araştırma alanının temel yapı taşlarını oluşturduğunu, ancak motor temalar kadar geniş çaplı bir etkiye sahip olmayabileceğini göstermektedir. Bu anahtar kelimeler, PEM yakıt hücreleri üzerine yapılan araştırmaların GSST alanında merkezi bir rol oynadığını ve bu teknolojinin sürdürülebilir enerji çözümleri geliştirmedeki kritik önemini vurgulamaktadır. Özellikle PEM yakıt hücrelerinin performansını ve verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar, gelişmiş modelleme teknikleri ve bu teknolojinin geniş uygulama alanları, bu temaların araştırma alanındaki temel yönelimleri yansıttığını göstermektedir.

“Optimizasyon, Tasarım ve Sistem” gibi anahtar kelimelerin temaların merkezinde yer alması, bu kavramların araştırma ve uygulama alanının odak noktası olduğunu ve diğer temalarla sıkı bir şekilde bağlantılı olduğunu göstermektedir. Merkezi temalar, araştırma alanında yüksek etkiye sahip olan ve genellikle öncelikli olarak ele alınan konulardır. Bu temalar, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada temel bileşenlerdir ve bu alanlardaki ilerlemeler, daha verimli, yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Niş temalar çeyreğindeki “Süreklilik, Katalizörler ve Katalizör” gibi anahtar kelimeler, kendi içlerinde güçlü ve iyi gelişmiş olmalarına rağmen, genel araştırma yapısında düşük merkezîyet ve etkiye sahiptir. Ancak, bu konuların gelecekte daha fazla önem kazanması ve araştırma ve uygulama alanında daha merkezi hale gelmesi mümkündür. Bu temalar, yeni araştırma ve inovasyon fırsatlarının ortaya çıkmasını sağlayarak teknolojinin daha verimli ve yaygın hale gelmesine katkıda bulunabilir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

PEM yakıt hücresi, temiz ve etkili enerji üretimi için gelecekte potansiyeli olan bir teknolojidir ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak çevre üzerindeki olumsuz etkileri minimuma indirmeyi hedeflemektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada, Yeşil Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji alanında PEM yakıt hücresi teknolojisinin mevcut durumunu değerlendirmek, gelişim sürecini izlemek ve gelecekteki araştırmalara yön vermek amacıyla, WoS veri tabanından elde edilen makaleler bibliyometrik analiz yöntemiyle incelenmiştir. Bu çalışmanın kapsamı ise WoS veri tabanında yayımlanan GSST alanında PEM yakıt hücresi ile ilgili makalelerin Biblioshiny arayüzü kullanılarak gerçekleştirilen bibliyometrik analiz sonuçlarının incelenmesidir. Bu analizler, PEM yakıt hücresi teknolojisinin araştırma trendlerini, yayın aktivitesini, en çok alıntılanan çalışmaları ve diğer önemli bibliyometrik ölçümleri ortaya koymaktadır. Ayrıca araştırma, sürdürülebilir enerji teknolojileri alanında yapılan çalışmalara daha geniş bir bakış açısı sunarak, çevresel etkileri azaltma ve temiz enerjiye geçiş sürecini hızlandırma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, PEM yakıt hücreleri üzerine yapılan bu çalışmanın akademik ve endüstriyel alandaki uygulamaları üzerinde önemli etkileri olabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışma, GSST alanında PEM yakıt hücresi araştırmalarının bilimsel gelişimini ve eğilimlerini ortaya koymak amacıyla WoS veri tabanında yayımlanan makalelerin bibliyometrik analizini gerçekleştirmiştir. Bu araştırmanın verileri 21.04.2024 tarihinde WoS veri tabanından elde edilmiştir. 2002-2024 yılları arasında 61 ülkede 2835 yazar tarafından üretilen 786 makalenin analizi, bu alandaki bilimsel üretimin yıllar içinde nasıl geliştiğini ve hangi konuların ön plana çıktığını göstermektedir. Araştırma alanındaki ilk bilimsel literatürün 2002 yılında yayımlandığı ve bu tarihten itibaren yayın sayısında dalgalanmalar görülmesine rağmen, alıntı sayılarının istikrarlı bir artış

gösterdiği belirlenmiştir. %20,9'luk yıllık bilimsel büyüme oranı, bu alanın hızla geliştiğini göstermektedir. Özellikle 2023 yılında en yüksek yayın sayısına (149 makale) ulaşılmış olması, PEM yakıt hücrelerine yönelik akademik ilginin son yıllarda arttığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, ortalama yıllık alıntı oranının en yüksek olduğu yılın 2005 olması, erken dönem çalışmalara duyulan akademik ilginin halen devam ettiğini göstermektedir. “Yenilenebilir Enerji” dergisinin en çok makale yayımlayan (232 makale) ve en yüksek h-indeksine sahip (46) olan kaynak olması, PEM yakıt hücreleri üzerine yapılan araştırmaların yenilenebilir enerji alanındaki genel bilimsel çerçeveye güçlü bir bağlantıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ülke bazında analizler, Çin'in en fazla bilimsel üretime (1099 makale) ve en sık uluslararası işbirliğine sahip ülke olduğunu göstermektedir. Ancak, alıntı açısından bakıldığında Mısır (44,10) ve İran (38,10) ülkelerinin daha yüksek ortalama makale alıntı sayılarına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, Çin ve ABD gibi ülkelerin daha geniş bir araştırma hacmine sahip olduğunu, ancak üretilen makalelerin bireysel alıntı etkisinin diğer ülkelere göre daha düşük olduğunu göstermektedir. Çin'in yüksek SCP (236) ve düşük MCP (52) değerleri, bu ülkenin uluslararası işbirliklerinden ziyade iç araştırma kapasitesini güçlü bir şekilde sürdürdüğünü ortaya koymaktadır. Yazar ve işbirliği analizleri, Wang Y'nin 23 makale ile en üretken ve yazarlar arasında en fazla işbirliği kuran kişi olduğunu göstermektedir. Bu durum, Wang Y'nin araştırma alanındaki merkezi konumunu, PEM yakıt hücreleriyle ilgili gelecekteki çalışmalara yön verebileceğini ve yeni araştırmalar için referans noktası olabileceğini işaret etmektedir. Kurumsal bazda yapılan analizlerde, Tianjin Üniversitesi'nin 69 makale ile en üretken kuruluş olduğu ve Tongji Üniversitesi ile birlikte güçlü akademik işbirlikleri geliştirdiği görülmektedir. Bu durum, Çin merkezli üniversitelerin PEM yakıt hücreleri konusunda yoğun bir araştırma faaliyetinde bulunduğunu göstermektedir. Tianjin ve Tongji gibi üniversiteler, devlet destekli projeler ve özel sektörle işbirlikleri sayesinde güçlü araştırma altyapısına sahiptir. Bu doğrultuda, üniversiteler arası işbirliği ve sanayi ile bağlantılar, PEM yakıt hücreleri alanında yenilikçiliği hızlandırmaktadır. En çok alıntı yapılan çalışmalar incelendiğinde, küresel olarak en yüksek alıntı alan çalışmanın Sopian K'ye (2006) ait olduğu ve toplam 267 alıntı aldığı, yerel olarak en çok alıntı alan çalışmanın ise Atyabi SA'ya (2019) ait olup 14 alıntı aldığı belirlenmiştir. Bu bulgular, erken dönem çalışmaların daha yüksek akademik etkiye sahip olduğunu, ancak son yıllarda yapılan çalışmaların da alan üzerindeki etkisinin artmakta olduğunu göstermektedir. “Performans” anahtar kelimesinin yaygın kullanımı, bu kavramın alan içindeki diğer araştırma konularıyla güçlü bağlantılar kurduğunu ve yönlendirici bir faktör olduğunu belirtmektedir. “Elektrik”in 2024'te en çok tartışılan konu olması, son dönemde PEM yakıt hücrelerinin elektrik üretim süreçlerindeki rolüne daha fazla odaklanıldığını göstermektedir. “Optimizasyon, Tasarım ve Sistem” gibi konuların, temanın odak noktasını ve araştırmaların yönünü belirlediği görülmektedir. Bu bağlamda, gelecekteki çalışmaların özellikle

elektrik üretimi, optimizasyon teknikleri ve sistem entegrasyonu konularına daha fazla odaklanması beklenmektedir.

Kullanılan veri setinin yalnızca WoS veri tabanından elde edilmiş olması, çalışmanın en kritik kısıtlılığıdır. Bunun nedeni Biblioshiny yazılımının Web of Science, Scopus ve Google Akademik gibi birden fazla bibliyografik kaynaktan elde edilen BibTex dosyalarını birleştirme olanağına sahip olmamasıdır. Bu durumda, farklı kaynaklardan yapılan yayınlar, bu alandaki bilgi akışının daha iyi analiz edilmesini ve araştırma sonuçlarının daha etkili görselleştirilmesini sağlayabilir. Analiz sonucunda elde edilen çalışmaların gerçekten araştırmanın odağındaki literatürü temsil edebilmesi amacıyla çalışma verileri “Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED), Social Sciences Citation Index (SSCI) ve Sources Citation Index (ESCI)” şeklinde filtrelenmiştir. Bu sınırlı filtreleme, belirli bir literatürün daha detaylı incelenmesine imkân tanımış, ancak aynı zamanda daha geniş bir bakış açısının göz ardı edilmesine neden olmuştur. Filtreleme işlemi sırasında yalnızca araştırma makaleleri dahil edilmiş olup, konferans bildirimleri, konferans incelemeleri, kitap bölümleri ve kitap incelemeleri gibi belgeler hariç tutulmuştur. Çalışma, yalnızca İngilizce dilindeki makalelerle sınırlandırılmıştır. Araştırmanın diğer bir kısıtlılığı ise, verilerin 21.04.2024 tarihinde WoS veri tabanından elde edilmiş olması ve bu tarihten sonra yapılan çalışmaların araştırmaya dâhil edilememesidir.

Bu bibliyometrik analiz, PEM yakıt hücresi teknolojisinin Yeşil Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji alanındaki önemini vurgulamaktadır. Bu analiz, gelecekteki araştırmacılara ve endüstri profesyonellerine çeşitli fırsatlar sunmaktadır. Özellikle, daha verimli ve ekonomik hücre tasarımlarının geliştirilmesi, atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçlerinin optimize edilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonun artırılması ve endüstriyel uygulamadaki kullanımının genişletilmesi gibi alanlarda odaklanması gerekmektedir. Bu bağlamda, bu teknolojinin daha geniş bir kabul görmesi ve ticarileşmesi için multidisipliner işbirliği ve ortaklık fırsatlarının değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, yenilikçi malzeme bilimi ve mühendislik çözümlerine odaklanarak, PEM yakıt hücresinin performansını artırmak ve maliyetini düşürmek için yeni stratejiler geliştirilmelidir. Bununla birlikte, çevresel etki ve sürdürülebilirlik açısından daha fazla araştırma yapılmalı ve teknolojinin endüstriyel uygulamalarının yanı sıra toplum üzerindeki potansiyel etkileri de değerlendirilmelidir. Eğitim ve bilinçlendirme çabalarının artırılmasıyla da PEM yakıt hücresi teknolojisinin toplumda daha geniş bir kabul görmesi ve benimsenmesi sağlanabilir. Bu önerilerin, PEM yakıt hücresi teknolojisini daha sürdürülebilir bir gelecek için önemli bir bileşen haline getirme yolunda atılacak adımlara rehberlik etmesi beklenmektedir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Agyekum, E. B., Ampah, J. D., Wilberforce, T., Afrane, S., and Nutakor, C. (2022). Research progress, trends, and current state of development on PEMFC-new insights from a bibliometric analysis and characteristics of two decades of research output. *Membranes*, 12(11), 1103. <https://doi.org/10.3390/membranes12111103>
- Andújar, J. M. and Segura, F. (2009). Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(9), 2309-2322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.03.015>
- Aria, M. and Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of informetrics*, 11(4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Aria, M., Alterisio, A., Scandurra, A., Pinelli, C. and D'Aniello, B. (2021). The scholar's best friend: Research trends in dog cognitive and behavioral studies. *Animal Cognition*, 24(3), 541-553. <https://doi.org/10.1007/s10071-020-01448-2>
- Beicha, A. (2012). Modeling and simulation of proton exchange membrane fuel cell systems. *Journal of Power Sources*, 205, 335-339. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.12.059>
- Blažun Vošner, H., Bobek, S., Sternad Zabukovšek, S. and Kokol, P. (2017). Openness and information technology: a bibliometric analysis of literature production. *Kybernetes*, 46(5), 750-766. <https://doi.org/10.1108/K-10-2016-0292>
- Castañeda, K., Sánchez, O., Herrera, R. F., and Mejía, G. (2022). Highway planning trends: a bibliometric analysis. *Sustainability*, 14 (9), 5544. <https://doi.org/10.3390/su14095544>
- Cervera-Ferri, J. L. and Luz Ureña, M. (2017). Green production indicators, a guide for moving towards sustainable development. <https://hdl.handle.net/11362/41853>
- Chen, X., Zhang, Y., Xu, S. and Dong, F. (2023). Bibliometric analysis for research trends and hotspots in heat and mass transfer and its management of proton exchange membrane fuel cells. *Applied Energy*, 333, 120611. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120611>
- Cui, W., Espley, S., Liang, W., Yin, S., and Dong, X. (2025). Microbial Fuel Cells for Power Generation by Treating Mine Tailings: Recent Advances and Emerging Trends. *Sustainability*, 17(2), 466. <https://doi.org/10.3390/su17020466>
- Deng, Z., Li, B., Gong, J., and Zhao, C. (2022). A Bibliometric Study on Trends in Proton Exchange Membrane Fuel Cell Research during 1990–2022. *Membranes*, 12(12), 1217. <https://doi.org/10.3390/membranes12121217>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N. and Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of business research*, 133, 285-296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>

- Eberle, U., Müller, B. and Von Helmolt, R. (2012). Fuel cell electric vehicles and hydrogen infrastructure: status 2012. *Energy & Environmental Science*, 5(10), 8780-8798. <http://dx.doi.org/10.1039/C2EE22596D>
- Fan, L., Xing, L., Tu, Z. and Chan, S. H. (2021). A breakthrough hydrogen and oxygen utilization in a H₂-O₂ PEMFC stack with dead-ended anode and cathode. *Energy Conversion and Management*, 243, 114404. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114404>
- Gall, M., Nguyen, K. H. and Cutter, S. L. (2015). Integrated research on disaster risk: Is it really integrated?. *International journal of disaster risk reduction*, 12, 255-267. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.01.010>
- Grivel, L., Mutschke, P. and Polanco, X. (1995). Thematic mapping on bibliographic databases by cluster analysis: A description of the SDOC environment with SOLIS. *Knowledge organization*, 22(2), 70-77. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02459296>
- Guo, M., Nowakowska-Grunt, J., Gorbanyov, V. and Egorova, M. (2020). Green technology and sustainable development: Assessment and green growth frameworks. *Sustainability*, 12(16), 6571. <https://doi.org/10.3390/su12166571>
- Hart, D., Lehner, F., Rose, R., Lewis, J. and Klippenstein, M. (2015). The fuel cell industry review 2015. *E4Tech: London, UK*.
- Holdren, J. P. (2008). Science and technology for sustainable well-being. *Science*, 319(5862), 424-434. <https://doi.org/10.1126/science.1153386>
- Kates, R. W. (2011). What kind of a science is sustainability science? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(49), 19449-19450. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116097108>
- Li, W. and Zhao, Y. (2015). Bibliometric analysis of global environmental assessment research in a 20-year period. *Environmental Impact Assessment Review*, 50, 158-166. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.09.012>
- Luo, Y. and Jiao, K. (2018). Cold start of proton exchange membrane fuel cell. *Progress in Energy and Combustion Science*, 64, 29-61. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.10.003>
- Painter, D. T., Daniels, B. C. and Jost, J. (2019). Network analysis for the digital humanities: principles, problems, extensions. *Isis*, 110(3), 538-554. DOI: 10.1086/705532
- Pamplona Solis, B., Cruz Argüello, J. C., Gomez Barba, L., Gurrola, M. P., Zarhri, Z., and Trejo Arroyo, D. L. (2019). Bibliometric analysis of the mass transport in a gas diffusion layer in PEM fuel cells. *Sustainability*, 11(23), 6682. <https://doi.org/10.3390/su11236682>
- Pourrahmani, H., Yavarinasab, A., Siavashi, M. and Matian, M. (2022). Progress in the proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) water/thermal management: From theory to the current challenges and real-time fault diagnosis methods. *Energy Reviews*, 1(1), 100002. <https://doi.org/10.1016/j.enrev.2022.100002>
- Pourrahmani, H., Siavashi, M., Yavarinasab, A., Matian, M., Chitgar, N., Wang, L. and Van Herle, J. (2022). A review on the long-term performance of proton exchange membrane fuel cells: From degradation modeling to the effects of bipolar plates, sealings, and contaminants. *Energies*, 15(14), 5081. <https://doi.org/10.3390/en15145081>
- Prasad, P. N. and Kalla, S. (2021). Plant-microbial fuel cells-A bibliometric analysis. *Process Biochemistry*, 111, 250-260. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.10.001>
- Rogers, G., Szomszor, M. and Adams, J. (2020). Sample size in bibliometric analysis. *Scientometrics*, 125(1), 777-794. <https://doi.org/10.1007/s11192-020-03647-7>
- Soete, L. and Freeman, C. (2012). *The economics of industrial innovation*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203357637>
- Song, A., Rasool, Z., Nazar, R. and Anser, M. K. (2024). Towards a greener future: How green technology innovation and energy efficiency are transforming sustainability. *Energy*, 290, 129891. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129891>
- Soni, G. D. (2015). Advantages of green technology. *Social Issues and Environmental Problems*, 3(9), 1-5. <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v3.i9SE.2015.3121>
- Wang X.D., Duan Y.Y., Yan V.M. and Peng F.X., (2008). Effects of flow channel geometry on cell performance for PEM fuel cells with parallel and interdigitated flow fields, *Electrochimica Acta*, 53(16), 5334-5343. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.02.095>
- Wang, Q., Yang, Z., Yang, Y., Long, C. and Li, H. (2014). A bibliometric analysis of research on the risk of engineering nanomaterials during 1999–2012. *Science of the Total Environment*, 473, 483-489. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.066>

- Wang, S. and Wang, Y. (2016). Investigation of the through-plane effective oxygen diffusivity in the porous media of PEM fuel cells: Effects of the pore size distribution and water saturation distribution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 98, 541-549. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.060>
- Wang, Y., Diaz, D. F. R., Chen, K. S., Wang, Z. and Adroher, X. C. (2020). Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells—a review. *Materials today*, 32, 178-203. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.06.005>
- Wang, Y., Liu, T., Sun, H., He, W., Fan, Y. and Wang, S. (2020). Investigation of dry ionomer volume fraction in cathode catalyst layer under different relative humidities and nonuniform ionomer-gradient distributions for PEM fuel cells. *Electrochimica acta*, 353, 136491. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136491>
- Wang, L., Li, X., Guo, P., Guo, S., Yang, Z. and Pei, P. (2022). Bibliometric analysis of prognostics and health management (PHM) in hydrogen fuel cell engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(80), 34216-34243. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.024>
- Xie, H., Zhang, Y., Wu, Z. and Lv, T. (2020). A bibliometric analysis on land degradation: Current status, development, and future directions. *Land*, 9(1), 28. <https://doi.org/10.3390/land9010028>
- Yan, M., Ren, J., Dong, S., Li, X., and Shen, Q. (2023). A bibliometric and content analysis of membrane electrode assemblies for proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Electrochemical Science*, 18(12), 100350. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100350>
- Yang, L., Chen, Z., Liu, T., Gong, Z., Yu, Y. and Wang, J. (2013). Global trends of solid waste research from 1997 to 2011 by using bibliometric analysis. *Scientometrics*, 96, 133-146. <https://doi.org/10.1007/s11192-012-0911-6>
- Yuan, B. Z. and Sun, J. (2019). Bibliometric and mapping of top papers in the subject category of green and sustainable science and technology based on ESI. *COLLNET Journal of Scientometrics and Information Management*, 13(2), 269-289. <https://doi.org/10.1080/09737766.2020.1716643>
- Zhao, C., Wang, F., and Wu, X. (2024). Analysis and review on air-cooled open cathode proton exchange membrane fuel cells: Bibliometric, environmental adaptation and prospect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 197, 114408. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114408>
- Zou, X., Yue, W. L. and Le Vu, H. (2018). Visualization and analysis of mapping knowledge domain of road safety studies. *Accident Analysis & Prevention*, 118, 131-145. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.06.010>
- Zou, L., Xu, L., Jiang, Z., Liao, J., Gao, P., Yang, G., Li S. and Shen, Q. (2024). A bibliometric study on the research trends and hotspots of proton exchange membrane electrolyzer. *International Journal of Electrochemical Science*, 19(3), 100482. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100482>