



Farklı tip anot ve katot bazlı Li-iyon pillerinin küresel ısınma etkisinin (GWI) hesaplanması

Calculating the global warming impact (GWI) of different types of anode and cathode based Li-ion batteries

Rümeysa Hülya Balcı¹, Mine Sertsöz²,

¹Enerji Kaynakları ve Yönetimi, Eskişehir Teknik Üniversitesi
rumeysabc98@gmail.com

²Ula tırma MYO, Eskişehir Teknik Üniversitesi 26140, Eskişehir/Türkiye
msertsoz@eskisehir.edu.tr

Özet

Günümüzde ilerleyen teknoloji ile birlikte elektrik talebi her geçen gün artmaktadır. Bu durum, elektrik enerjisinin her durumda hazır bir şekilde bulunmasını gerektirir; enerji depolama teknolojilerini gündeme getirmiştir. Son yıllarda depolama teknolojilerinden en iyi şekilde faydalanabilmek oldukça önemli bir konudur. Ancak bunun yanında, enerji depolama aygıtlarının çevreyle olan ilişkisi ise göz ardı edilemeyecek bir diler konudur.

Bu çalışmada, üzerinde birçok araştırmaya yapılan Li-iyon pillerde kullanılan farklı anot ve katot malzemeler için hesaplamalar yapılmıştır. Anot için grafit ve silikon malzemeler kullanılırken katot için yeni nesil NCA/NMC ve LiMnO₄ bileşikleri tercih edilmiştir. Bu çalışmada mayı özgül kütlesi, Li-iyon pillerin anot ve katot kısmında kullanılan farklı metallerle oluşturulan yeni nesil pillerin küresel ısınma etkilerinin hesaplanmasıdır. Hesaplamalar GWP₁₀₀ modeli üzerinden SimaPro programı ile yapılmıştır.

Abstract

Today, with the advancing technology, electricity demand is increasing every day. This has required the availability of electrical energy in all cases; it brought up energy storage technologies. In recent years, it is very important to make the most of storage technologies. However, the relationship of energy storage devices with the environment is also another issue that cannot be ignored.

In this study, calculations have been made for different anode and cathode materials used in Li-ion batteries, on which many studies have been conducted. While graphite and silicon materials are used for the anode; new generation NCA/NMC and LiMnO₄ compounds are preferred for the cathode. Novelty of this study is the calculation of the global warming effect values of the new generation batteries formed with different metals used in the anode and cathode parts of Li-ion batteries. Calculations are made with the SimaPro program on the GWP₁₀₀ model.

1. Giriş

Küresel ısınmanın etkilerinin fazlasıyla yaşadığımız bu zamanlarda enerji üretimdeki yönelim yenilenebilir enerji kaynaklarına dayandırılmaya çalışılmaktadır. En güncel 2022 verilerine göre; Türkiye'nin elektrikteki kurulu gücü yaklaşık 100.334 MW seviyesine yükselerek bunun 54.176,5 MW'nı yenilenebilir enerji santralleri oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında ise rüzgâr ve güneş en büyük paya sahiptir. Rüzgâr enerjisi 2022 yılında kurulu gücünü 10.861 MW'a yükselterek lider konuma geçmiştir [1]. Güneş ve rüzgâr gün içerisinde sürekliliği olmayan kaynaklardan üretim yapıldığı için enerji depolama teknolojilerinin en çok kullanıldığı kaynak türleridir. Küresel enerji taleplerini karşılamak için fosil yakıtlarının yoğun kullanımı, yılda binlerce metrik ton karbondioksit (CO₂) ve diğer kirlenitçileri üretir ve bu da küresel ısınmayı ve büyük iklim değişikliklerini hızlandırır [2]. Enerjinin bütünüyle tirilmesi ve iyi değerlendirilmesi için yüksek verimli enerji depolama cihazlarına ihtiyaç duyulur. Pillerin elektrokimyasal kapasiteleri kadar, güvenli ve depolanan enerjinin akıllı şekilde kullanılması da en az pil kapasitesi kadar önemlidir [3]. Sonuçta, sadece pil kapasitesi önemi üzerine değil son tüketiciye güvenli ve verimli şekilde sunmak da önemlidir. Her ne kadar yararlarını söylesek de enerji aygıtlarının çevreyle olan ilişkisine baktığımızda kullanılan malzemeler kısa ve uzun vadeli iklim değişikliği üzerinde etkisi olduğu görülmektedir. İnsan sağlığı ve ekosistem üzerindeki etkileri kullanılan anot ve katot malzemeye göre de değişiklik gösterir. Bu etkileri tüm parametreleriyle gösteren SimaPro 9.3 yazılım programı kullanılmaktadır.

SimaPro, bir Life Cycle Assessment (LCA) yazılımıdır. Yaşam Döngü Analizi (YDA) ürünlerin ham madde ekstraksiyonundan üretime kullanımdan, ömür sonu (EoL) a amasına kadar tüm yaşam döngüsü boyunca çevre ve insan sağlığı etkilerini değerlendirmek için en önde gelen yöntemdir [4], aynı zamanda çeşitli çevresel içerikleri ölçebilen dünyaca tanınan bir uygulamadır. En belirgin etki kategorisi, karbon ayak izi çıktılarıdır, küresel ısınma potansiyeli (GWP₁₀₀) modeliyle belirlenmiştir ve bunu küresel ısınma etki (GWI) olarak hesaplamasıdır [4].

Enerji depolama aygıtlarına olan yoğun ilgi özellikle elektrik ebekesine uzak olan bölgeler ve yenilenebilir enerji

kaynaklarından elde edilen enerjinin depolanma gereksinimi ile son yıllarda önemi artarak devam eden bir konudur [5]. Bu önemi artan konu üzerine ele alınan çalı mada, kimyasal enerji depolama sistemleri üzerinde durulmu , elektrokimyasal piller arasında yerini alan Li-iyon piller ile ilgili bazı detaylı çalı malar anlatılmı tır. Geni bir konu olan enerji depolama teknolojileri arasında olan elektrokimyasal piller, elektrik ebekesi sektörlerinin CO₂ ayak izini azaltmak için gerekli kilit araçlarıdır [6]. Li-iyon pillerin yüksek enerji verimlili i, rüzgâr, güne , jeotermal ve di er yenilenebilir kaynaklardan toplanan enerjinin kalitesinin iyile tirilmesi de dâhil olmak üzere çe itli elektrik ebekeleri uygulamalarında kullanılma potansiyeline sahiptir [7]. Li-iyon piller; uzun kullanımlı ve raf ömrü skalası geni , kullanım sıcaklık kapasitesi büyük, hızlı arj edilebilirli i yüksek, enerji verimlili i gibi özellikleriyle öne çıkan ve ara tırma konusu olan bir enerji kayna ıdır [8]. Enerjiyi üretmek ve depolamaktan birincil derece sorumlu üç ana bile enden olmaktadır. Bunlar anot, katot ve elektrolit olarak sıralanabilir. Anot malzeme negatif elektrot, katot ise pozitif elektrot olarak görev alır. Bunun yanında ayırıcılar da vardır ki Li-iyon pillerin en önemli bile enleri arasına girmektedir. Ayırıcılar, elektriksel teması önler iki elektrot arasında fiziksel bariyer görevi görürler, Li-iyon pillerin performansını, çevrim ömrünü ve güvenli ini etkileyen bir bile endir [7]. Pozitif elektrotlar genelde tünel veya tabakalı yapılara sahip metal oksitlerden (LiMO_x) olurlar. Negatif elektrot malzemeleri de tabakalı yapıya sahiptirler. Bu yapılar sayesinde hücrenin/pilin arjı ve de arjı esnasında Li iyonları pozitif ve negatif elektrotları arasında kar ılıklı olarak yer de i tirebilmektedir [9]. Pillerde kullanılan anot ve katot malzeme belli artlara göre seçilmelidir. Göz önünde tutulan parametreler sırasıyla kapasitesi, seçilecek olan malzemenin yeryüzünde bulunabilirli i, pilin ömrü süresince güvenilirli i, pilin çevreye olan etkisi (zehir etkisinin olup olmadı ı, geri dönü üm prosesine uygunlu u gibi), hücre üretim maliyeti ve de i ik yöntemlerle üretilebilirli i olarak sıralanabilir. Pek çok kriterleri ve avantajları bilinen enerji depolama sistemlerinin dikkatsizce yapılacak uygulamalarda emisyon de erlerinin artırabilece i de bilinmektedir [5]. Çalı mada ele alınan Li-iyon piller baz alınarak de i en anot ve katot malzemelerle bu emisyon de erleri hakkında bilgiler verilip detaylı hesaplamalar yapılmı tır.

2. Li-iyon pillerde kullanılan anot malzemeler ve yeni nesil anot malzemeler

Anot, birincil hücrenin negatif elektrotudur ve daima elektronların dı devreye salınmasıyla birlikte oksidasyon reaksiyonu ile ili kilidir. kincil bir hücrede anot, de arj sırasında negatif kutup arj sırasında pozitif kutup olmaktadır. Bir Li-iyon bataryalarda kullanılan anot materyali için temel gereksinimler, malzemenin arj/de arj i lemi sırasında minimum hacim geni lemesine, yüksek elektronik iletkenli e, ilk arj veya araya ekleme i leminde dü ük geri dönü ümsüz kapasiteye, optimum performans ve güvenlik için dü ük spesifik yüzey alanına sahip olması, indirgeyici bir ortamda geni çalı ma sıcaklı ıtında kararlı olması gerekmektedir [10].

Li-iyon pillerin arj hızı ve enerji yo unlu u dâhil elektrokimyasal performansları, seçilen anot malzemelerden önemli ölçüde etkilenir. Karbonlu malzemeler kısa sürede Li-iyon pil için anot seçimi olarak kullanılmaya başlanmı tır. Karbonlu anotların ilk ticarile tirilmesinden bu yana karbon, günümüzde ticari Li-iyon pillerde büyük bir önem ta ır [11]. Karbon esaslı anot elektrotların en önemli özellikleri yüksek elektriksel iletkenlik ve litasyon/dilatasyon sırasında meydana

gelen nispeten dü ük hacim de i imi, dü ük maliyeti, bol miktarda bulunması ve dü ük dilatasyon potansiyeline sahip olması gerekti ine daha önce de de inilmis tir. Böylece karbon, di er interkalasyon tipi anot malzemelerine (farklı türde atomların molekülleri veya grupları arasına, moleküller, iyonlar veya atomların geri dönü ümlü bir giri idir) kıyasla nispeten dü ük maliyetli, bol bulunması, orta yo unlukta enerji yo unlu u, güç yo unlu u ve çevrim ömrü açısından çekici bir dengeye sahiptir [12]. Li-iyon bataryalarda metalik lityum (Li) elementinin dendritik yapıda büyüyerek kısa devrelere neden olabilmemesinden ötürü farklı türde bir anot malzemesi gereklidir. Ayrıca, metalik lityum elementi zayıf çevrim ömrüne sahiptir. u anda Li-iyon pillerde genellikle anot malzeme olarak max. 372 mAh/g spesifik kapasite sergileyebilen grafit kullanılmaktadır. Ama yüksek enerji yo unlu u ihtiyacını kar ılayamamaktadır. Buna alternatif olarak Si, Li ile ala ımlı grafit kullanılmaktadır. Li-iyon pillere yönelik artan taleple birlikte yüksek teorik kapasiteleri (yakla ık 3579 mAh/g) nedeniyle alternatif elektrotlar olarak çe itli silikon aktif malzemelerin tasarlanmasına büyük önem verilmi tir [13]. Ticari olarak kullanılan grafitin tamamen silikonla de i tirilmesi, dü ük elektrot yüklemesi ve yetersiz alan kapasitesi gibi olumsuzluklara yol açması, kolay ve ölçeklenebilir bir harmanlama i lemiyle modifiye silikonun geli tirilmesi, grafit elektrotu geri dönmesine ortam hazırlar [13]. Grafit alternatif olarak kalay esaslı elektrot malzemeleri yüksek kapasite de erlerinden dolayı da ilgi çekicidir. Ancak arj/de arj esnasında kalay esaslı elektrot malzemesinin kar ılıklı en büyük problem hacim geni lemesidir. Bu problemi a mak için aktif ve inaktif malzeme ile birle tirerek de i ebilir, buna örnek olarak Sn-Cu tozları kullanılmaktadır [14]. Grafit ham maddesine özgün yöntemlerle yüksek iletkenlik mekanik ve yüzey alanına sahip çok tabakalı grafen yapısı üretilmi tir [15]. Böylece yeni nesil yüksek çevrimli nanokompozit elektrotlarla verim yükseltilmi tir. Grafen oksitin indirgenmesidir, grafen geli tirilerek Li-iyon bataryalar yapmak mümkündür. Katmanlara ayrılmasında ve birle mesinde anyonik ve katyonik yüzey aktif malzemeler kullanılarak indirgenme ve oksitleme i lemleri yapılabilir [16]. Bir di er yeni nesil anot malzeme ise bor içerikli yeni polioxonotolat türevleri ile grafen kuantum noktacıklarını içeren nanokompozit temelli anot malzemesidir [17]. Ara tırmacılar yıllardır karbon grafit anodu, oksitlenmi silikon anot ile de i tiriminin yollarını aramı tır çünkü silikon anodun grafitte oranla daha fazla iyon depolayabilece ini öngörmü lerdir. Silikon, teoride grafitte kıyasla 10 kat daha fazla Li-iyonu emebilir. Sayısal olarak ifade edersek, grafit anotlu pil 372 mAh/g enerji depolayabiliyorken silikon anotlu pil 3572 mAh/g enerji depolayabilmektedir [17]. Ele alınan çalı mada da silikon anot bazlı piller kullanılması öngörölmü tür. Bir di er ara tırmada, biten Li-iyon pillerde elde edilen grafit malzeme, bir geri dönü üm i lemi yoluyla Na-iyon piller ve K-iyon piller için uygun bir anot olarak yeniden kullanılabilir. Optimize edilmi elektrot, Na-iyon pillerde 162 mAh/g ve K-iyon pillerde 320 mAh/g gibi geli mi elektrokimyasal performans gösterir [18].

Çizelge 1: Anot malzemesi, Silikon ve Grafit bazlı Li-iyon pillerin GWI de erleri (SimaPro 9.3)

Küresel Isınma Etkisi	Anot Grafit, Li-iyon Pil	Anot Silikon, Li-iyon Pil
Kg CO ₂ eq.	6,06	6,23

Çizelge 1’de anot malzemesi grafit ve silikon olarak de i kenlik gösteren Li-iyon pillerin, uluslararası ölçüm kabul edilen GWP 100a olan ham madde kaynaklı karbon miktarının 1 kg malzeme başına miktarı verilmiştir.

Li-iyon malzemeler üzerinde yapılan çalışmalardan ilham alan yeni bir elektrot malzemeleri araştırması başlatılmıştır ve çok sayıda Na-bazlı yerleştirilebilir, Li-iyon muadilleri ile benzer yapısal tiplere sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunlar sırasıyla, pozitif elektrot için ve negatif elektrot için karbonlu malzemeler veya intermetalik alaşımlar (saf metaller arasındaki ara bileşimde oluşan bir faz) için katmanlı oksitlerin benzer ailelerine aittir [6].

Daha yüksek enerji yoğunluklarına sahip gelişmiş Li-iyon piller elde etmek için interkalasyon anot materyallerinin (grafit gibi) kullanımını anotlarla değiştirilmesi gerekmektedir. Si, Ge, Sn, Sb ve Pb gibi alaşım tipi anot malzemeleri, yüksek kapasite değerleri üreten lityumca zengin ikili alaşımların oluşumuyla lityum depolayabilmektedir. Silisyum, umut verici bir anot materyali olarak; bulunabilirliği, düşük maliyeti ve diğer anot materyallerine kıyasla güvenlik marjının yüksek olması gibi avantajlara sahiptir. Li-iyon pillerde Si anotlarının elektrokimyasal performansını optimize etmek için mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, Si anot iletkenliğini artırılması ve elektrot elektrolit interfazın kimyasal stabilitesinin artırılması önemlidir. Bu yöndeki çabaların çoğunluğu nano yapılar, gözenekli veya Si ince filmlerin sentezi ve Si aktif malzemenin diğer elementlerle kaplanması veya alaşımlanması gibi diğer sentez prosedürleri dâhil olmak üzere malzeme tasarım yönlerine odaklanılmıştır [19]. Yeni nesil anot malzeme olarak karıştırmaya çıkan, spinel yapılu lityum titanat (Li₄TiO₅) mükemmel güvenli ve uzun çevrim ömrü nedeniyle Li-iyon piller için büyük ilgi görmektedir. Ancak spinel fazlı LTO elde etmek için yüksek sıcaklık (> 800°C) kalsinasyon gerekmektedir [20]. Bu elektrokimyasal performans için iyi olsa da nano boyutlu malzeme olarak LTO parçacıklarının sentezini engelleyen bir durumdur. Li-hava (Li-O₂) bataryalar fosil yakıtlara yakın yüksek enerji depolama kapasitelerine nedeniyle yeni nesil enerji depolama sistemleri olarak kabul edilmektedir [21]. Günümüzde anot malzemesi olarak Si ve Sn elementlerinin üstün özelliklerinden yararlanabilmek için birçok çalışmaya başlanmıştır veya Sn içeren kompozit elektrotların üretimi üzerinde araştırmalarına devam ederken; büyük bir araştırmacı grubu da yüklenme/boşaltma işlemi sırasında gerçekleşen hacimsel değişim miktarlarını en yüksek mertebede tolere edebilecek mekanik kararlılıkta, boşaltma anot malzemesi üretimi için çalışmaktadır [22].

Çizelge 2: Anot malzemesi, Silikon ve Grafit bazlı Li-iyon pillerin etki kategorilerinin karbon ayak izi miktarları (SimaPro 9.3)

Etki Kategorileri	Birim	Anot, Grafit	Anot, Silikon
klimada kısa dönem	Kg CO ₂ eq.	6,29	6,47
klimada uzun dönem	Kg CO ₂ eq.	5,63	5,8

Çizelge 2’de ikinci yöntem olan IMPACT + 2002 World Midpoint metodu kullanılarak birçok farklı etki grupları üzerinde, kullanılan farklı anot malzemeleri ile miktarı verilen Li-iyon piller gösterilmektedir.

3. Li-iyon pillerde kullanılan yeni nesil katot malzemeler

Bugüne kadar düşünülen sayısız katot materyalinden, tabakalı nikel (Ni) zengini üçlü oksitler, yüksek özgül kapasiteleri, yüksek enerji yoğunlukları, düşük toksik etkileri ve nispeten düşük maliyetleri nedeniyle yoğun araştırmaların konusu olmuştur. Ni içeriği arttıkça, Ni²⁺ fazlası 3a bölgelerinde Li⁺’nin yerini alır ve oksijenle azalan etkileşime girerek elektrokimyasal performansın bozulmasına neden olur. Bu nedenle, Li/Ni katyon oranını azaltmak ve yapısal kararlılığı artırmak için kobalt (Co) eklenir. Ayrıca, Al’un ikamesi, Ni’den zengin tabakalı yapının stabilitesini etkili bir şekilde artırabilir. Bu özellik Li-iyon pildeki pozitif malzeme için öncelikli hedef haline gelmiştir. Li-iyon piller için en umut verici büyük ölçekli ticari katotlardan biri olan nikel kobalt alüminyum oksit (NCA), yüksek çalışma voltajı, yüksek özgül kapasite, çevrimsel ve yapısal kararlılık gibi üstün özelliklere sahiptir. NCA katot malzemesi 200 mAh/g kapasite değerindedir. Katmanlı geçiş metal oksidi olan NCA, düşük termal stabilitesi, ticari LiCoO₂’e kıyasla daha düşük toksik etkiye sahip olması ve düşük maliyeti sebebiyle umut verici bir katot malzemesidir [23]. Li-iyon piller için kullanılan katot malzemelerine alternatif olarak geliştirilen NCA, yüksek çalışma voltajı, yüksek özgül kapasite, çevrimsel ve yapısal kararlılık gibi üstün özelliklere sahip katot materyalidir. Pillerde hücrenin performansı seçilen kimya tarafından etkilenir. Katot malzemeleri ise; lityum nikel mangan kobalt (NMC), lityum nikel kobalt alüminyum oksit (NCA), lityum mangan kobalt oksit (LMO) ve lityum demir fosfat (LFP) olarak katot bazlı Li-iyonları içerir. NMC ve NCA teknolojilerinin ana faydası, daha yüksek enerji yoğunluğudur. NMC bazlı katotların enerji yoğunluğu nikel içeriğiyle orantılıdır. Daha yüksek bir enerji yoğunluğu, belirli bir miktarda aktif malzeme için depolanan enerji miktarını artırır. Bu yeni kimyasalların maliyet avantajlarından yararlanılmadan önce alınması gereken bir zorluktur [24].

3.1 NMC, NCA ve Lityum metal oksit Li-iyon piller ve enerji yoğunluğu

Birim hacimde depolanan elektrik enerjisi miktarına enerji yoğunluğu denir. Wh/kg (1 kg pildeki saatlik güç miktarı) birimi ile gösterilir [25]. Endüstride üç metali lityum nikel mangan kobalt Li (NiCoMn)O₂ (NMC) türü 1000-1500 arasında çevrim yapabilmektedir. 200 Wh/kg enerji yoğunluğuna çıkabilen malzeme olan yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler. Bir diğer tür ise nikel kobalt alüminyum oksit LiNiCoAlO₂ (NCA), her ne kadar çevrim sayısı 500 olsa da 200-250 Wh/kg arasında enerji yoğunluğuna sahip batarya uygulamalarıdır. Dönüştürülmüş NMC üçlü katot malzemeleri, ham ve geri dönüştürülmüş malzeme üretiminin çevresel etkileri en yüksek çevresel baskının, etki kategorisini neredeyse yarısına katkıda bulunan elementlerin, liç ve ekstraksiyon işlemleri olmaktadır [26]. Geri dönüştürülmüş NMC malzemelerin daha az elektrik tükettiği ve etki kategorisinde ciddi azalmalara yardımcı olduğu gösterilmektedir. Lityum metal oksit katotlar, enerji yoğunluğu 270 Wh/kg ve yüksek arız verimliliği olan bataryalardır. Bu bataryalar anot karbon grafit, katot ise lityum metal oksitten (LiCoO₂, LiMnO₄, LiNO₂) oluşur. Lityum kobalt oksit (LiCoO₂) yerine lityum mangan oksit (LiMnO₄) kullanıldığında kobaltın

patlama riski kalkar ama belli bir sıcaklıkta performansında dü ü ya anır. Mangan kullanıldı nda enerji yo unlu unda bir dü me ya anır fakat mangan kobalta göre daha güvenilir ve çevre dostudur. Katot malzeme amaçlı kullanılan di er yapılar bu alanda yaygın olarak kullanılan tabakalı oksitler $LiMO_2$ ($M=Co, Ni, Mn$) mangan spinel ($LiMn_2O_4$), ve $LiMPO$ yapılarıdır. Ancak $LiCoO_2$ bugün en çok kullanılan katot olmasına ra men kobalt elementinin kısıtlı miktarı, yüksek maliyeti ve çevresel etkisinden dolayı ara tırmacıları farklı malzemelere itmektedir [2].

Çizelge 3: Katot malzemesi farklı olan Li-iyon pillerin GWI de erleri (SimaPro 9.3)

Küresel Isınma Etkisi (GWI)	$LiMn_2O_4$	Katot NCA,	Katot NMC 111,	Katot NMC 811,
Kg CO ₂ eq.	9,4	29	28,8	28,9

Çizelge 3'te NCA, NMC ve metal oksit bazlı farklı katot malzemelerin küresel ısınma etki (GWI) miktarları, SimaPro 9.3 programında EPD (2018) V1.08 metodu esas alınarak elde edilen verilerdir.

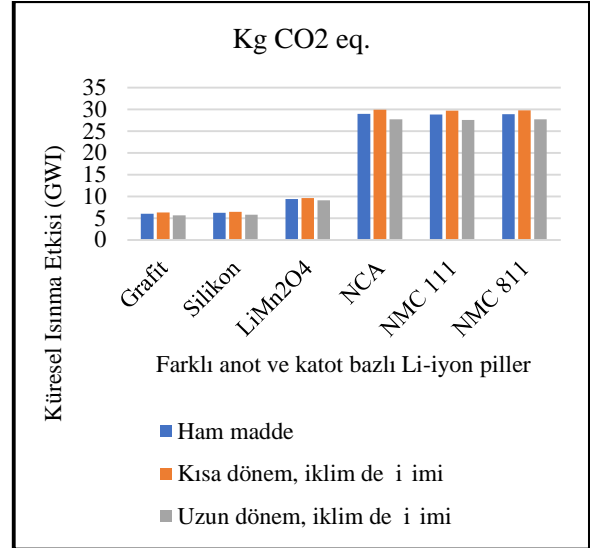
Çizelge 4: Katot malzemesi, de i ken olan Li-iyon pillerin etki kategorilerinin karbon ayak izi miktarları (SimaPro 9.3)

Etki Kategorileri	$LiMn_2O_4$	Katot NCA,	Katot NMC 111,	Katot NMC 811,
klim de i imi, kısa dönem	9,64	29,9	29,7	29,8
klim de i imi, uzun dönem	9,09	27,7	27,6	27,7

Çizelge 4'te de Li-iyon metal oksit katot malzemesi olan $LiMn_2O_4$ ile üçlü katot malzemeli NCA, NMC 111 ve NMC 811 pillerin çevresel etki de erleri gösterilmiştir. IMPACT + 2002 World Midpoint metodu kullanılarak elde edilmiş olan bu de erler karbon ayak izi miktarları uzun/kısa dönem iklim de i ikli i olarak elde edilen verilerdir.

4. Bulgular

SimaPro 9.3 versiyonlu LCA yazılım programından karbon ayak izi (kg CO₂ eq.) hesaplamaları yapılarak enerji depolama aygıtları arasında kar ıla tırmalı sonuçlar ekil 1'de gösterilmektedir. Karbon ayak izi, karbondioksit cinsinden ölçülen zararın bir ölçüsü olarak birimi kg CO₂ equivalent (kg CO₂ eq.) ekinde açıklanır. Grafikteki veriler iki farklı yöntem olan IMPACT + 2002 World midpoint ve EPD (2008) V1.08'den olmaktadır. IMPACT + 2002 World yöntemi ile uzun/kısa dönem iklim de i imi üzerindeki etkilerini, EPD (2008) V1.08 ile ham maddeye göre karbon ayak izi miktarları hesaplanmıştır.



ekil 1: Li-iyon pillerin küresel ısınma etki (GWI) de erleri

Üçlü katot malzemeli NCA ve NMC Li-iyon piller arasında, EPD (2008) V1.08 metodu ile hesaplanan sonuçlarda 29 kg CO₂ eq. ile NCA en yüksek ham madde kaynaklı küresel ısınma etkisine, 28,8 kg CO₂ eq. ile NMC 111 en dü ük ham madde kaynaklı GWI etki de erine, grafit bazlı anot malzemesi ise 6,06 kg CO₂ eq. ile en az GWI etkiye sahip Li-iyon piller olmu tur. $LiMn_2O_4$ lityum metal oksit yapıları katot pil ise, katot malzemeleri arasında 9,4 kg CO₂ eq. ile ideal malzeme arasında yerini almıştır.

IMPACT + 2002 World yöntemi kullanılarak hesaplanan veriler arasında, uzun dönem ve kısa dönem iklim de i imine etki de erleri olarak iki kategoride karbon ayak izi hesaplanmıştır. Çıkan sonuçlara göre; uzun dönem iklim de i iminde grafit bazlı anot malzeme 5,63 kg CO₂ eq. de eri ile en dü ük karbon miktarına; 27,7 kg CO₂ eq. katot NCA ve NMC 811 malzemeleri en yüksek karbon miktarına sahip, 27,6 kg CO₂ eq. NMC 111 en dü ük de erde Li-iyon piller olmu tur. Kısa dönem iklim de i imi kategorisinde anot bazlı Li-iyonlar için yine aynı sıralama kar ımıza çıkmaktadır. Anot, grafit 6,29 kg CO₂ eq. de erine, katot pillerde ise 29,7 kg CO₂ eq. de erinde NMC 111 en dü ük de erde Li-iyon piller olmu lardır.

5. Sonuç

Güne ve rüzgâr gibi kesintili ve zaman zaman belirsiz enerji kaynaklarında enerjinin depolanması sistemin verimi ve süreklili i için tercih edilen uygulamalardır. Bu çalı mada amaç, enerji üretiminde kullanılacak olan enerji depolama sistemlerini çevre dostu sistemler olarak seçmek olmu tur. Bu kapsamda, ham madde ve iklim de i imi üzerindeki karbon ayak izi (kg CO₂ eq.) miktarları hesaplanmıştır. Çalı mada kullanılan enerji depolama aygıtları farklı anot ve katot malzemelerden olu an Li-iyon pillerden seçilmiştir ve her bir seçilen malzemelerin özellikleri açıklanmıştır. Açıklanan malzeme bilgisine dayanarak LCA için ölçüm sonuçları SimaPro yazılımı yardımı ile küresel ısınma etki de erlerini ve karbon ayak izi miktarlarını kar ıla tırmamıza olanak sa lamıştır. Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak, üçlü katot malzemeli piller; NCA/NMC 111, NMC 811 olup yüksek bir küresel etki de erlerine sahip oldu u görülmü ş, buna kar ılık grafit ve silikon bazlı anot malzemeleri en az etki de erlerine sahip Li-iyon piller oldu u anlaşı lmıştır. Yeni nesil katot ve anot malzemeli bataryalar mevcut bataryalara göre geli mekte olan modern bataryalar olup enerji yo unlukları yüksektir. Enerji

yo unlu u yükseldikçe küresel ısınma etki (GWI) miktarında artı meydana gelmektedir, bu da karbon ayak izi de erindeki artı demektir.

LCA metodunu kullanarak pillerin çevresel performansını analiz eden çalı malarla ilgili olarak literatürde çok sayıda yayın vardır fakat bu çalı ma; kullanılan yeni nesil anot ve katot bazlı Li-iyon pillerle, di er tiplerin bir arada bulundu u iki farklı yöntemi de içinde barındıran yenilikçi bir çalı ma olmu tur. Gelecek çalı malarda, farklı tip enerji depolama aygıtları için daha kapsamlı çevresel etkilerin ve karbon ayak izi miktarının de erlendirmeleri yapılması planlanmaktadır.

6. Kaynaklar

- [1] Dinçer, . Ve Ezan, M. A., "Tüba Enerji Depolama Teknolojileri Raporu", Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, Ankara, 2020.
- [2] Nuran, A. Y. "Li-iyon pilleri ayırıcılarında Hekzagonal Bor Nitrür kullanımı ve Geli meler", Journal of Boron, 7 (1), 411-423, 2022.
- [3] Mostert, C., Ostrander, B., Bringezu, S., Kneiske, T. M., "Comparing Electrical Energy Storage Technologies Regarding Their Material And Carbon Footprint", Energies, 11 (12), 3386, 2018.
- [4] Kuma , K., Akyüz, A. Ö., Zaman, M., Güngör, A., "Sürdürülebilir bir çevre için karbon ayak izi tespiti: Makü Bucak sa lık yüksekokulu örne i", El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 6 (1), 108-117, 2019.
- [5] Sertsöz, M., "Raylı Sistemlerde Kullanılacak Depolama Aygıtı Ödünle im Seçimi ve Yatırım Kararı", Demiryolu Mühendisli i 13, 76-85, 2021.
- [6] Tarascon, J. M., "Na-ion versus Li-ion batteries: complementarity rather than competitiveness", Joule, 4 (8), 1616-1620, 2020.
- [7] Koçak, T., "Li-iyon Piller için Lityum Demir Silikat Katot Üretimi Ve Karakterizasyonu", Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Turkey, 2020.
- [8] Winter, M., Barnett, B., & Xu, K., "Before Li ion batteries", Chemical reviews, 118 (23), 11433-11456, 2018.
- [9] Hatipo lu, G., "Li-iyon Piller için Metalurjik Silisyum/Knt/Grafen Çok Fonksiyonlu Anotların Geli tirilmesi", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Turkey, 2019.
- [10] Çayırılı, M., "Lityum pillerde anot malzemesi olarak yüksek entropili oksitlerin kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, ESOGÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.
- [11] Uzun, E., "NCA Tabanlı Katot Elektrotlarının Çamur Bile iminin Elektrokimyasal Özelliklere Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2021.
- [12] Polat, B. D., Kele , Ö., "Li-iyon pil teknolojisi", Metalurji Dergisi, 162, 42-48, 2012.
- [13] Li, P., Hwang, J. Y., & Sun, Y. K., "Nano/microstructured silicon-graphite composite anode for high-energy-density Li-ion battery", ACS nano, 13 (2), 2624-2633, 2019.
- [14] Köse, C., "Grafen Takviyeli CuO Anot Elektrotlarının Tasarımı Ve Li- yon Pil Uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2021.
- [15] Halebi, M., "Lityum hava bataryalar için kimyasal ve biyolojik yöntemlerle metal oksit esaslı katotların geli tirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2021.
- [16] Akbulut, H., Mete, O. H., Güler, M. O., & Bulut, E., "Grafen Sentezinde Yeni Bir Yakla ım ve Yeni Nesil Grafen Esaslı Li-Pil Elektrotları", TÜB TAK MAG Proje, 2021.
- [17] Hor, Ö., "Bor çeren Yeni Polioksometalat Fonksiyonla tırılmı Grafen Kuantum Noktacıklarının Sentezi Ve Lityum- yon Pillerde Anot Malzeme Olarak Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [18] Liang, H. J., Hou, B. H., Li, W. H., Ning, Q. L., Yang, X., Gu, Z. Y., & Wu, X. L., "Staging Na/K-ion de -/intercalation of graphite retrieved from spent Li-ion batteries: in operando X-ray diffraction studies and an advanced anode material for Na/K-ion batteries", Energy & Environmental Science, 12 (12), 3575-3584, 2019.
- [19] Taylan, G., "Li-iyon Pil Hücresinin Termal Karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye, 2019.
- [20] Savran Orhan, B., "Li-iyon Pillerinin Katot Malzemesi Olan Lixmy (PO4) Z Ve Lixmyo4 Tipindeki Bile iklerin Bazı Metaller Kullanılarak Sentezi Ve Karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Türkiye, 2019.
- [21] Lökçü, E., "Metal Hava Pilleri için Li-Si Ala ımı Esaslı Anot le Nanokarbon Esaslı Katot Malzemelerinin Geli tirilmesi Ve Karakterizasyonları", Doktora Tezi, Eski ehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye, 2020.
- [22] Güngör, H., "Li-iyon Piller için NMC/Karbon Hibrit Kompozitlerin Sentezi ve Elektrokimyasal Karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Türkiye, 2018.
- [23] Berberi, E., "Grafen Destekli NCA Katot Elektrotlarının Sentezi ve Elektrokimyasal Özelliklerinin ncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Türkiye, 2021.
- [24] Tokur, M., "Lityum hava pilleri için EMITFSI esaslı nanokompozit elektrolitlerin geli tirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Türkiye, 2015.
- [25] Saleh, S. A., "An investigation on the comparison of the performance of Li-ion batteries and nickel metal hydride batteries used in electric vehicles", Doctoral Dissertation, Karabuk University, Turkey, 2021.
- [26] Yıldız, M., "Uçaklarda Kullanıma Yönelik Batarya Isıl Yönetim Sistemlerinin Ara tırılması", Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Türkiye, 2016.