Akdeniz Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Akdeniz Mühendislik Dergisi

Akdeniz Journal of Engineering

YEAR | YIL
2024

VOLUME | CİLT
2

ISSUE | SAYI
1

Akdeniz Mühendislik Dergisi
Akdeniz Journal of Engineering
(AKUJE)

YEAR | YIL	VOLUME | CİLT	ISSUE | SAYI
2024	2	1

OWNER | SAHİBİ

on behalf of Akdeniz University | Akdeniz Üniversitesi adına

Rector | Rektör

Prof. Dr. Özlenen ÖZKAN

EDITOR-IN-CHIEF | BAŞ EDİTÖR

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Akdeniz University | Akdeniz Üniversitesi

CO-EDITOR | YARDIMCI EDİTÖR

Prof. Dr. Ayhan TOPUZ

Akdeniz University | Akdeniz Üniversitesi

Akdeniz Mühendislik Dergisi
Akdeniz Journal of Engineering
(AKUJE)

YEAR | YIL
2024

VOLUME | CİLT
2

ISSUE | SAYI
1

EDITORIAL BOARD | ALAN EDİTÖRLERİ

Prof. Dr. Prof. Dr.	Afşin GÜNGÖR	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Mechanical Engineering Makine Mühendisliği
Prof. Dr. Prof. Dr.	Erdal KOŞUN	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Geological Engineering Jeoloji Mühendisliği
Prof. Dr. Prof. Dr.	Mehmet Serkan AKKİRAZ	Kütahya Dumlupınar University Kütahya Dumlupınar Üniversitesi	Geological Engineering Jeoloji Mühendisliği
Prof. Dr. Prof. Dr.	Meltem ASİLTÜRK ERSOY	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Materials Science and Engineering Malzeme Bilimi ve Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Ali DANANDEH MEHR	Antalya Bilim University Antalya Bilim Üniversitesi	Civil Engineering İnşaat Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Alper BİLGE	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Computer Engineering Bilgisayar Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Çiğdem SARAÇ	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Biomedical Engineering Biyomedikal Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Emre YALÇIN	Sivas Cumhuriyet University Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	Computer Engineering Bilgisayar Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	İ. Ethem KARADİREK	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Environmental Engineering Çevre Mühendisliği

Akdeniz Mühendislik Dergisi
Akdeniz Journal of Engineering
(AKUJE)

YEAR | YIL	VOLUME | CİLT	ISSUE | SAYI
2024	2	1

EDITORIAL BOARD | ALAN EDİTÖRLERİ

Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	H. Feza CARLAK	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Electrical and Electronics Engineering Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Kubilay YILDIRIM	Ondokuz Mayıs University Ondokuz Mayıs Üniversitesi	Molecular Biology and Genetics Moleküler Biyoloji ve Genetik
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Mehmet TORUN	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Food Engineering Gıda Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Mustafa KILIÇ	Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi	Mechanical Engineering Makine Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Rıfat TÜR	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Civil Engineering İnşaat Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Süleyman POLAT	Çukurova University Çukurova Üniversitesi	Food Engineering Gıda Mühendisliği
Asst. Prof. Dr. Dr. Öğr. Üyesi	Cihan ÖZGÜR	Isparta University of Applied Sciences Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	Environmental Engineering Çevre Mühendisliği
Asst. Prof. Dr. Dr. Öğr. Üyesi	Görkem Eğemen GÜLOĞLU	Middle East Technical University Orta Doğu Teknik Üniversitesi	Aerospace Engineering Havacılık ve Uzay Mühendisliği
Asst. Prof. Dr. Dr. Öğr. Üyesi	Sıtkı GÜNER	Eskişehir Technical University Eskişehir Teknik Üniversitesi	Electrical and Electronics Engineering Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Akdeniz Mühendislik Dergisi
Akdeniz Journal of Engineering
(AKUJE)

YEAR | YIL	VOLUME | CİLT	ISSUE | SAYI
2024	2	1

ADVISORY BOARD | DANIŞMA KURULU

Prof. Dr. Prof. Dr.	Adnan KAYA	İzmir Kâtip Çelebi University İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi
Prof. Dr. Prof. Dr.	Cihan KALELİ	Eskişehir Technical University Eskişehir Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Prof. Dr.	Faruk ŞEN	Muğla Sıtkı Koçman University Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi
Prof. Dr. Prof. Dr.	Mecit Halil ÖZTOP	Middle East Technical University Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Prof. Dr.	Mustafa Alper SELVER	Dokuz Eylül University Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Prof. Dr.	Müfit BAHADIR	Technische Universität Braunschweig Braunschweig Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Prof. Dr.	Serdar KARAKURT	Selçuk University Selçuk Üniversitesi
Prof. Dr. Prof. Dr.	Vahid NOURANI	Near East University Yakın Doğu Teknik Üniversitesi
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Volkan TUNALI	University of The West of Scotland Batı İskoçya Üniversitesi

Akdeniz Mühendislik Dergisi
Akdeniz Journal of Engineering
(AKUJE)

YEAR | YIL	VOLUME | CİLT	ISSUE | SAYI
2024	2	1

LANGUAGE EDITOR | DİL EDİTÖRÜ

Asst. Prof. Dr. *Dr. Öğr. Üyesi*	*Joseph William LEDET*	*Akdeniz University* *Akdeniz Üniversitesi*

TECHNICAL EDITORS | TEKNİK EDİTÖRLER

Res. Asst. Dr. *Arş. Gör. Dr.*	*Fatih UÇAR*	*Akdeniz University* *Akdeniz Üniversitesi*
Res. Asst. *Arş. Gör.*	*Ceyhun ÇELEBİ*	*Akdeniz University* *Akdeniz Üniversitesi*
Res. Asst. *Arş. Gör.*	*Serenay AŞIK-AYGÜN*	*Akdeniz University* *Akdeniz Üniversitesi*
Res. Asst. *Arş. Gör.*	*Taha Yiğit ALKAN*	*Akdeniz University* *Akdeniz Üniversitesi*

Akdeniz Mühendislik Dergisi
Akdeniz Journal of Engineering
(AKUJE)

YEAR | YIL	VOLUME | CİLT	ISSUE | SAYI
2024	2	1

CORRESPONDENCE ADDRESS | YAZIŞMA ADRESİ

Akdeniz University – Faculty of Engineering
Dumlupınar Boulevard, Akdeniz University Campus
07070 - Konyaaltı, Antalya, TÜRKİYE

Akdeniz Üniversitesi - Mühendislik Fakültesi
Dumlupınar Bulvarı, Akdeniz Üniversitesi Yerleşkesi
07070 - Konyaaltı, Antalya, TÜRKİYE

E-MAIL | E-POSTA

muhendislik@akdeniz.edu.tr

WEB PAGE | WEB SAYFASI

https://dergipark.org.tr/tr/pub/akuje

Akdeniz Mühendislik Dergisi
Akdeniz Journal of Engineering
(AKUJE)

YEAR | YIL 2024
VOLUME | CİLT 2
ISSUE | SAYI 1

CONTENTS | İÇİNDEKİLER

PAGE | SAYFA	ARTICLES | MAKALELER
1-12	FARKLI KİMYASAL YÜZEY İYİLEŞTİRME İŞLEMLERİNİN PİRİNÇ KABUĞU EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ M. S. DEMİRTAŞ E. AVCIOĞLU G. E. GÜLOĞLU Materials Engineering / Malzeme Mühendisliği — Research Article / Araştırma Makalesi
13-23	GERÇEK ZAMANLI VERİ AKIŞLARINDA OTOMATİK ANORMALLİK TESPİTİ: FİNANSAL TEKNOLOJİLER ŞİRKETİNDE BİR UYGULAMA D. ASLAN Information and Computing Sciences / Bilgi ve Bilgi İşleme Bilimleri — Research Article / Araştırma Makalesi
24-34	GÜNLÜK YAŞAM ALANLARINDAKİ YÜKSEK FREKANSLI ELEKTROMANYETİK ALANLARIN İNCELENMESİ VE MARUZİYET ANALİZİ E. YAVUZ DİRİK K. ATEŞ N. İL Ş. ÖZEN Electrical Engineering / Elektrik Mühendisliği — Research Article / Araştırma Makalesi
35-48	DESIGN OF A BATTERY MANAGEMENT SYSTEM WITH ACTIVE BALANCING TOPOLOGY T. AYKUT S. CETIN A. MANDACI S. GUNER Electrical Engineering / Elektrik Mühendisliği — Research Article / Araştırma Makalesi
49-57	DESIGNING OPTIMUM CAPACITANCE AND SWITCHING FREQUENCY PARAMETERS FOR MINIMIZING BALANCING DURATION IN CELL-LEVEL BALANCING USING ONE SWITCHED CAPACITOR TECHNIQUE: A MATLAB-BASED APPROACH T. AYKUT S. CETIN A. MANDACI S. GUNER Electrical Engineering / Elektrik Mühendisliği — Research Article / Araştırma Makalesi

Akdeniz Mühendislik Dergisi
Akdeniz Journal of Engineering
(AKUJE)
2024, 2(1), pp. 1-12
Araştırma Makalesi Research Article

FARKLI KİMYASAL YÜZEY İYİLEŞTİRME İŞLEMLERİNİN PİRİNÇ KABUĞU EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

EFFECT OF DIFFERENT CHEMICAL SURFACE MODIFICATION PROCESSES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF RICE HUSK-EPOXY COMPOSITE MATERIALS

Mehmet Selim DEMİRTAŞ[*1] **Emir AVCIOĞLU**[1] **Görkem Eğemen GÜLOĞLU**[2]

1 Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Hitit Üniversitesi, Çorum, Türkiye
2 Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye

ABSTRACT

Rice husks, a common agricultural waste product, contain fibrous structures that can be utilized as reinforcement or filler materials in polymer matrix composites. The availability and favorable mechanical properties of rice husks make them an attractive choice. However, when the untreated husk is mixed with thermoset polymers, the resulting interface between rice husk and polymer remains weak. To improve interface properties, physical and chemical pretreatments are applied. In this study, chemical surface treatments were performed on rice husks to enhance adhesion at the interfaces of rice husk-epoxy biocomposite materials. Various concentrations of acid and base chemicals were used for the pretreatments. Subsequently, mixtures with different rice husk content were molded into tensile test specimens. Mechanical tests revealed that as the rice husk content increased, the tensile strength decreased. Among the surface treatments, alkali treatments outperformed acidic treatments, with 3% sodium hydroxide-treated samples exhibiting the highest mechanical properties. Microscopic analysis indicated that the interfacial voids decreased after surface treatments, with the lowest void content observed in samples treated with sodium hydroxide.

Keywords: Biocomposites, Composite Materials, Mechanical Testing, Rice Husk, Surface Treatment

ÖZET

Bazı tarım ürünlerinin atık kısımlarında bulunan lifli yapılar, polimer matrisli kompozit malzemeler içerisinde takviye veya dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Pirinç kabuğu da bu yapıdaki tarımsal atıklarına örnektir. Bunun en temel sebeplerinden bir tanesi pirinç kabuğunun kolaylıkla bulunması ve iyi mekanik özelliklere sahip olmasıdır. Atık eldesi sonrası elde edilen kabuk kısmın işlem görmeden termoset ile karıştırılmasıyla pirinç kabuğu ve polimer arasındaki arayüz zayıf kalmaktadır. Arayüz özelliklerinin iyileştirilmesi için fiziksel ve kimyasal ön işlemler uygulanmaktadır. Bu çalışmada pirinç kabuğu-epoksi biyokompozit malzemelerin ara yüzeylerindeki adhezyon artışı için pirinç kabuklarına kimyasal ön işlemler uygulanmıştır. Bu ön işlemler farklı konsantrasyonlara sahip asit, baz kimyasalların tatbiki ile gerçekleştirilmiştir. Ön işlemler sonrası farklı pirinç kabuğu oranlarına sahip karışımları kalıplara dökülmüştür. Uygulanan mekanik testler sonrasında çekme dayanımının pirinç kabuğu oranı artması ile düştüğü görülerken, alkali yüzey işlemlerinin asidik işlemlere oranla daha iyi sonuç verdiği, çalışılan yüzey iyileştirmeler arasında %3 sodyum hidroksit uygulanmış numunelerin en yüksek mekanik özellikleri gösterdiği tespit edilmiştir. Mikroskop çalışmasının sonuçlarına göre, arayüzde oluşan boşluk miktarı yüz işlemleri ile azalmıştır ve en az boşluk miktarı sodyum hidroksit ile iyileştirme yapılan numunelerde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyokompozit, Kompozit Malzemeler, Mekanik Test, Pirinç Kabuğu, Yüzey İşlemi

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: mehmetselimdemirtas@hitit.edu.tr

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayım Tarihi
25.05.2024	10.06.2024	10.06.2024	30.06.2024

1. GİRİŞ

Endüstriyel ihtiyaçlar doğrultusunda çok amaçlı kullanılabilen yeni malzemelerin geliştirilmesi günümüzde önem kazanmış durumdadır. Bu bağlamda biyokompozitler; biyo bozunabilirlik, yenilenebilirlik, hafiflik ve yüksek mukavemet gibi öne çıkan avantajları sebebiyle üzerinde odaklanılan konulardan birisidir. Biyokompozit malzemeler; en az biri doğal olarak türetilmiş, iki veya daha fazla farklı bileşen malzemenin meydana getirdiği yeni bir malzemedir. Ortaya çıkan yeni malzeme kendini oluşturan malzemelerin tekil özelliklerinden daha iyi performansa sahip olabilir ve mühendislik uygulamasındaki gerekliliklere göre bileşenlerin belirli oranda karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Bileşenler matris malzeme ve takviye malzemesi sınıflandırılır, matris ana bileşen olup bu malzemeye şeklini verip takviye elemanlarını malzemeye bağlarken, takviye elemanı ise dolgu malzemesi olup yapının özelliklerinin geliştirilmesi için kullanılır. Polimer içeren biyokompozit malzemelerde doğal veya sentetik olarak elde edilen polimerler matris malzemesi olarak kullanılırken; karbon, cam, kevlar, boron ve doğal fiberler takviye malzemeleri olarak kullanılabilmektedir. Sentetik polimerlerden olan termosetler ile doğal fiber malzemelerin birleştirilmesiyle ortaya çıkan kompozit malzemeler ağırlıklı olarak yapı, havacılık ve otomotiv sektöründe kullanılmaktadır [1]. Bu alanda kullanılan termosetlerden öne çıkan matris malzemesi epoksi reçine olurken, doğal fiber takviye malzemeleri kenevir, jüt, ısırgan otu, hindistan cevizi, agave, şeker palmiyesi, sisal, keten, rami, pamuk ve pirinçten elde edilmektedir [2]. Epoksi reçine neme ve kimyasal bozuculara dirençli, yüksek mukavemetli, kayda değer esnekliği, yüksek aşınma direnci, iyi elektrik yalıtım özelliği olması sebebiyle ilgili sektörlerde kullanılabilmektedir [3-5]. İçeriğinde yüksek oranda selüloz ve lignin bulunduran bunlara ek olarak pentosan doğal fiber içeren düşük yoğunluklu en ucuz biyomalzeme olarak pirinç kabuğunun biyokompozit malzemelerde kullanımı öne çıkmaktadır [6].

Biyokompozit imalatında kullanılan polimer ile doğal fiberler birbirine yapışması esnasında oluşan problemler sebebiyle ortaya çıkan malzemenin mekanik özellikleri düşük olabilmektedir. Doğal fiberin yüzeyindeki polar hidroksil grupları polar olmayan matris malzemesi ile yapışma için iyi bir arayüzey oluşturmamaktadır [7]. Polar matris olan bazı epoksi reçine ile lignoselüloz bazlı takviye malzemesindeki polarhidroksil grupları yapışmaya direnç göstermektedir. Buna ek olarak pirinç kabuğu üzerindeki mumsu yapı ve pirinç kabuğu içeriğindeki lignin, pektin ve hemi-selüloz uyumsuzluğa neden olmaktadır. Bu yapışmama mekanizması ortaya çıkan biyokompozit malzemenin mekanik dayanımını düşürmektedir bu durumun önüne geçebilmek için yapışma arayüzünün iyileştirilmesi gerekmektedir. Arayüz iyileştirilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler litaratürde, uyumlulaştırıcıların kullanımı [7, 8], merserizasyon [9], plazma işlemi [10], elektron ışını uygulaması [11], kimyasal işlemler [12-15], adhezyon iyileştirici kimyasal kullanımı [16] olarak bulunmaktadır.

Kimyasal olarak alkalizasyon, asetilizasyon, benzasyon, silan uygulaması gibi işlemler yaygın olarak kullanılmaktadır [17]. Alkalizasyon işlemi doğal elyafların konsantre sodyum hidroksil (NaOH) çözeltisi içerisine batırılması işlemidir. NaOH hidroksil grupları ile reaksiyona girerek, doğal fiberlerin içerisindeki yarı-selüloz, mum ve yağ gibi maddeleri yüzeyden arındırarak, yüzey pürüzlülüğünü arttırır. Ayrıca fiber çapını düşürerek, selülozik yapıyı merserize ederek fiber-matris arasındaki bağlanma gücünü arttırmaktadır [18].

Tipik bir doğal fiberin yüzeyi mum, yağ gibi yabancı maddelerle kaplıdır. Alkalizasyon işlemi ile yüzey bu maddelerden arındırılır ve yüzey pürüzlülüğü arttırılır. Ayrıca yüzeydeki yüzde selüloz miktarı da bu işlemle arttırılmış olur [19].

Asetilasyon, genel olarak selüloz temelli fiberlerde, esterleme işlemi olarak da bilinmektedir. Fiberler asit katalizör içerisinde, asetil gruplarının selülozik yapıya dahil edilmesidir. Bu sayede fiberlerin hidrofobikliğini azaltılacak olup, boyutsal kararlılığında arttırılmaktadır. Bu yöntemle selülozik fiberler matris içerisinde daha iyi tutunmuş ve nem almaya karşı dirençleri arttırılmıştır [7,18].

Epoksi ile pirinç kabuğu yüzeyler arası yapışmanın kimyasal ön işlemler arttırılması ile ilgili çalışmalarda bulunmaktadır. Bisht ve Gope yaptığı çalışmada pirinç kabuğu tozuna ön işlemi %2, %4, %6, %8, ve %10 konsantrasyona sahip NaOH tatbik ederek gerçekleştirmiştir. NaOH konsantrasyonun %8'e kadar artan konsantrasyonlarda mekanik özellikleri iyileştirdiği bu değerden sonrasında mekanik özelliklerinin düştüğünü gözlemlemiştir. En yüksek mekanik özelliklere %8 alkali konsantrasyonunda

ön işlem ile ulaştığı ve ulaşılan çekme ve eğme mukavemetinin işlemsiz pirinç kabuğu epoksi biyokompozit malzemeye göre %36 ile %69 arttığını gözlemlemiştir [19]. Na ve OH iyonlarının pirinç kabuğunda pektin, lignin ve selüloz ile reaksiyona girip yüzeyi pürüzlendirerek tutunmayı arttırdığını tespit etmiştir. Bisht ve Gope gerçekleştirdiği diğer çalışmada epoksi ile alkali içeren kimyasal ön işlem uygulanmış pirinç kabuğu, işlemsiz pirinç kabuğu ve pirinç kabuğu külünü farklı oranlarda karıştırıp kırılma tokluğuna etkileri incelemiştir. Pirinç kabuğunun epoksiye oranı %20 olana kadar kırılma tokluğunun artış gösterdiğini gözlemlemiştir. Bu değerde elde ettiği kırılma tokluğu değerinin katkısız epoksinin kırılma tokluğu değerinden %159 oranında daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Bir önceki çalışmasında kullandığı verilerden yola çıkarak NaOH konstrasyonun optimum değeri olarak %8 olduğu ön işlem ile kırılma tokluğunu %3.12 kadar arttırmıştır [20]. Lai vd. gerçekleştirdiği çalışmada epoksi ile farklı konsantrasyonlarda kimyasal ile ön işleme tutulmuş farklı oranlardaki pirinç kabuğu içeren karışımların mekanik ve ısıl özelliklerini değişimini gözlemlemiştir. NaOH ve 3-glycidoxypropyltrimethoxy silane (GPS) konsantrasyon değerlerinin %2, %4, %6, ve %8 olduğu kimyasal karışımları pirinç kabuğuna tatbik edip farklı oranlarda epoksi ile karşılaştırdığı çalışmada optimum NaOH oranının %6 olduğunu, optimum 3-glycidoxypropyltrimethoxy silane (GPS) oranınında %10 olduğunu gözlemlemişlerdir. GPS ile ön işleme tutulmuş pirinç kabuğu oranının %70 olduğu durumda en optimum mekanik özelliklere ulaşıldığı, NaOH ile ön işleme tutulmuş pirinç kabuğu oranının %50 olduğu durumda en yüksek mekanik özelliklere ulaşıldığı raporlanmıştır [21].

Doğal lif takviyeli kompozit malzemeler ile ilgili yapılan çalışmaların bazılarında kimyasal yüzey iyileştirme işlemlerine etkisi de incelenmiştir. Pirinç kabuğu takviyeli kompozitlerde yüzey işlemlerinin arayüze ve mekanik özelliklerine etkisi yeterince irdelenmemiştir. Bu çalışmada, pirinç kabuğu tarımsal atıkların hangi kimyasal işlemlerle daha etkili bir şekilde polimer matrisli kompozitler içerisinde kullanılabileceği irdelenmiştir. Farklı konsantrasyonlarda asetik asit (CH_3COOH), alkali yüzey işlemi olarak da NaOH ve potasyum hidroksit (KOH) ile ön-işlem uygulanarak yüzey iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca farklı oranlarda pirinç kabuğu içeren biyokompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenerek karışımdaki pirinç kabuğu oranına bağlı özelliklerin değişimi ele alınmıştır. Pirinç kabuğu ile epoksi arasında bağlanma mikroskop yardımı ile görüntülenmiştir.

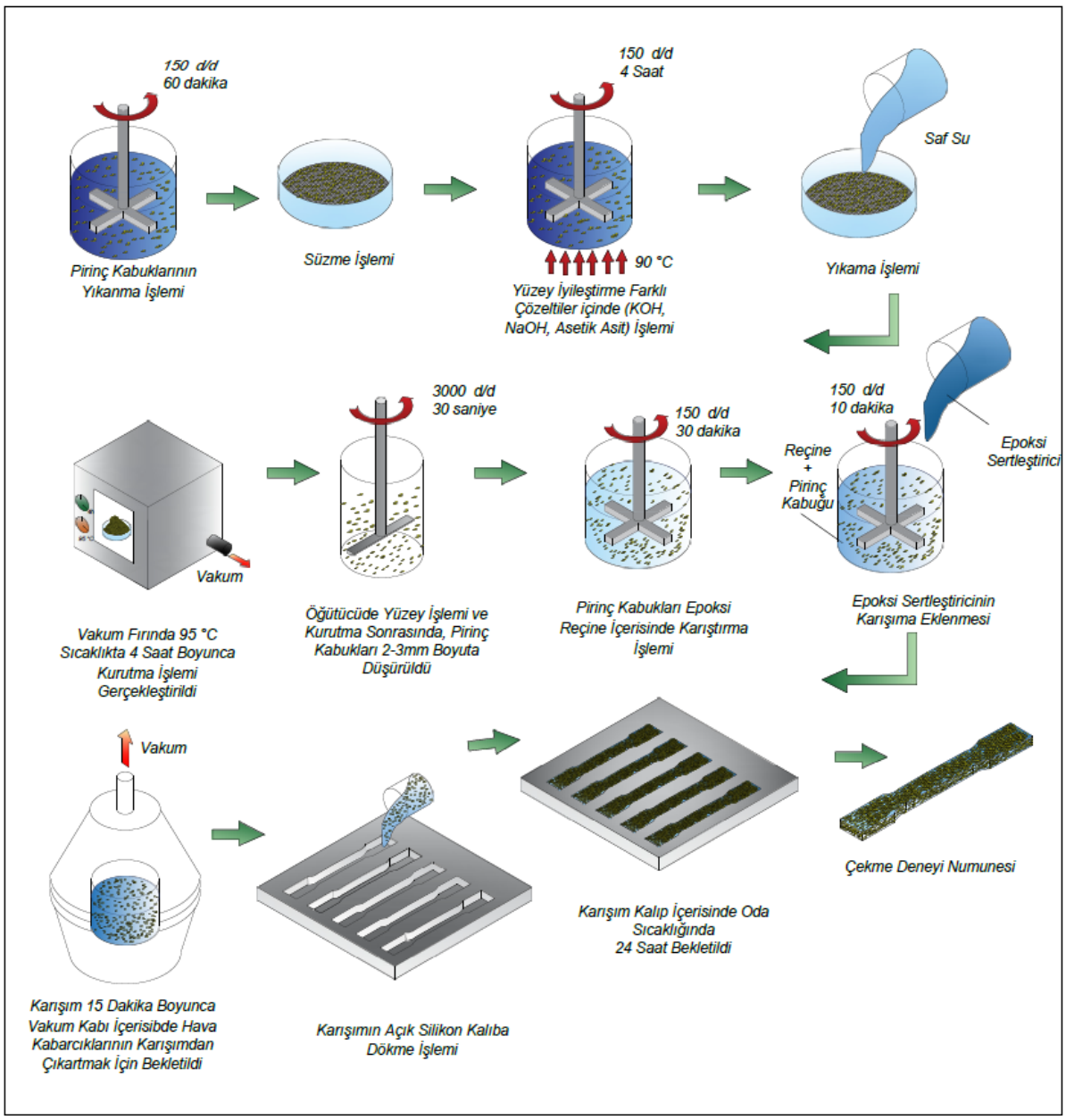
2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Hexion'un ürettiği MGS Laminasyon L160 epoksi reçine ve bu reçine ile uyumlu olan sertleştirici MGS H160 kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak kullanılan pirinç kabukları Osmancık bölgesinde yer alan yerel pirinç fabrikalarından temin edilmiştir. %99,9 saflıktaki asetik asit Likitkimya'dan, %99,9 saflıktaki NaOH ve KOH Kimyalab'dan satın alınmıştır.

Şekil 1'de görüldüğü üzere çekme deneyi numunelerinin hazırlanması için pirinç kabuklarının bir çok aşamadan geçmesi gerekmektedir. Bu aşamaları sırası ile, yıkama, kurutma, kimyasal işlem, tekrar yıkama kurutma şeklindedir. Tüm pirinç kabuğu (PK) numuneler saf sıcak su ile yıkanıp, vakum fırında kurutularak üzerlerinde muhtemel bulunan toz, yağ vb. istenmeyen maddelerinden temizlenmesi gerekmektedir. İşlem görmemiş pirinç kabukları ise yıkama işleminden sonra süzülerek vakum fırında 95°C sıcaklıkta 4 saat boyunca kurutulmuş ardında öğütme işlemi uygulanmıştır.

Kimyasal işlem uygulanacak pirinç kabuklarına yıkama işleminden sonra %100, %50 ve %30 asetik asit, %1, %3 ve %5 NaOH ve KOH çözeltilerinde 90°C'de, mekanik karıştırıcıda 150 d/d hızında 4 saat boyunca karıştırılmış, daha sonra saf suda 3 kez yıkanıp süzüldükten sonra vakum fırında 4 saat boyunca 95°C'de kurutulmuştur. Kurutulan numuneler boyutları 2-3 mm oluncaya kadar öğütme işleminden geçmiştir. Öğütme işleminin ardından ağırlık olarak %5, %10 ve %15 oranlarında epoksi reçine içerisine karıştırılarak 150 d/d hızında 30 dakika boyunca karıştırılmış ve ardından epoksi sertleştirici eklenerek 10 dakika daha karıştırılmıştır. Karıştırma esnasında içerisinde oluşan hava kabarcıklarının giderilmesi için karışım 15 dakika boyunca vakum altında tutulmuştur. Ardından American Society for Testing and Materials (ASTM) D638 numaralı çekme deneyi standardına uygun olarak hazırlanmış silikon kalıplar içerisine numuneler boşaltılmıştır. 24 saat boyunca sertleşmesi beklenen numuneler ardıdan kalıplardan çıkartılmıştır. Çekme deneyler AG-IS, Shimadzu Co., Japan, 10 kN yük hücresi bulunan çekme cihazsında ve ASTM D638 standardına uygun bir şekilde gerçekleştirmiştir. Mikroskop çalışmaları ise mikroskop için hazırlanmış numuneler sırası ile 500-1000-1500-2000-2500 kum zımparalandıktan sonra

elmas tozu katkılı parlatıcı ile parlatılarak mikroskop çalışması için hazırlanmıştır. Meiji Techno ML8100 ışık mikroskobu kullanılarak görüntüler kaydedilmiştir.



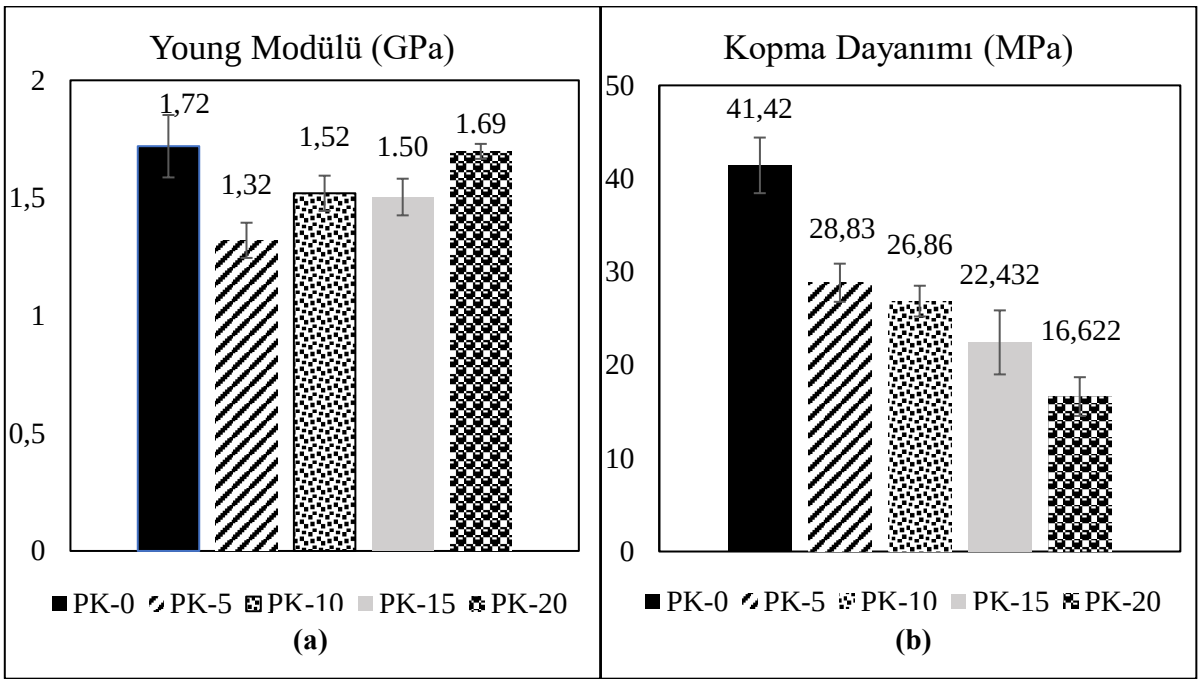
Şekil 1. Pirinç kabuğu-epoksi çekme numunelerinin hazırlanmasındaki aşamaların sırası ile gösterimi.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

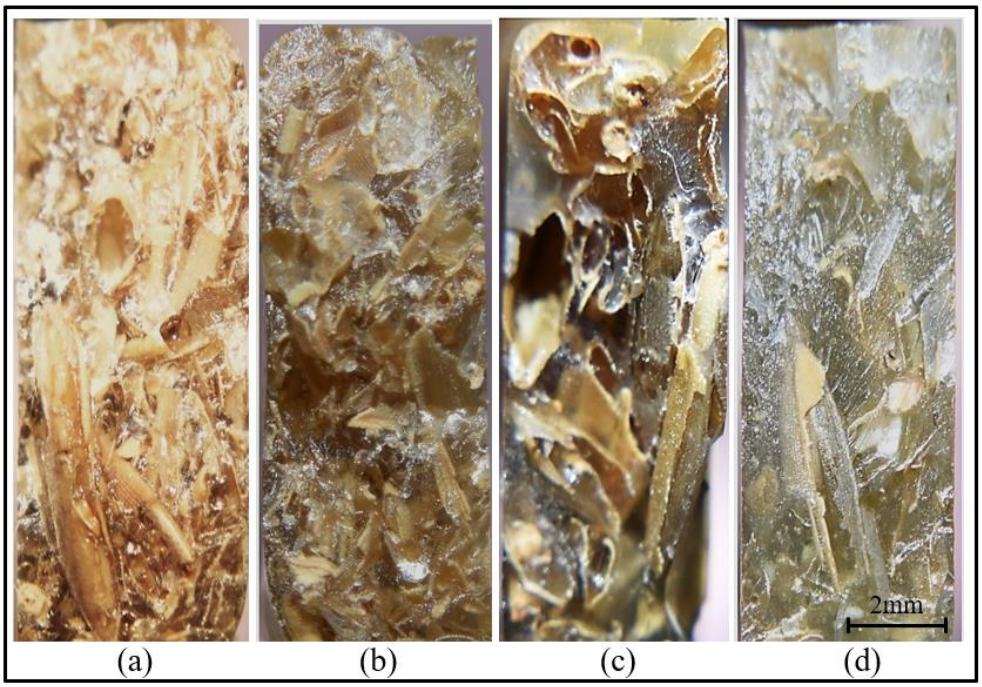
Pirinç kabuğunun ve kabuk miktarının reçineni mekanik performansı üzerindeki etkisini araştırmak üzere farklı miktardaki pirinç kabuklu kompozitlerin çekme testi sonuçları saf reçine sonuçları ile karşılaştırılmış ve bu karşılaştırmanın sonuçları Şekil 2'de verilmiştir.

Şekil 2a'da görüldüğü üzere reçineye pirinç kabuğu katkısı Young modülünü düşürerek reçinenin daha esnek bir davranış sergilemesine sebep vermiştir. Pirinç kabuğu miktarı ağırlıkça %5 iken Young modülü %23'lük bir düşüş yaşamasına rağmen pirinç kabuğu miktarı arttıkça kompozitin Young modülü saf reçinenin Young modülüne yaklaşmıştır. Pirinç kabuğunun Young modülü pirinç kabuğunun cinsine bağlı olarak 0.4 – 2.6 GPa arasında değişmektedir [22]. Ağırlıkça %20 pirinç kabuğu katkılı kompozitin Young modülü ve katkısız Epoksi Young modülü arasında karışım kuralı kullanılınca pirinç kabuğunun Young modülü 1.5 GPa çıkmaktadır. Bu hesap yapılırken kompozit yapıda hiç boşluk olmadığı farz edilmiştir. Aynı şekilde karışım kuralı kullanılarak ve kompozitte boşluk olmadığı farz edilerek ağırlıkça

%5 pirinç katkılı kompozitin ve saf epoksinin Young modüllerini kullanıp pirinç kabuğunun Young modülünü hesaplamak istediğinde, pirinç kabuğunun Young modülü negatif çıkmaktadır. Bunun nedeni de Şekil 3'te görüldüğü üzere pirinç kabuğu/epoksi kompozitlerinde boşlukların bulunmasıdır. Boşluk miktarı bilinmeden pirinç kabuğunun Young modülü tam olarak hesaplanamaz ancak Şekil 2a'da verilen veriye göre kullanılan pirinç kabuğunun Young modülü en az 1.5 GPa olması gerekmektedir. Kompozit yapıda boşlukların olması yapının mekanik özelliklerinin kötüleşmesine neden olmaktadır. Bu mekanik kötüleşme oranı boşluk oranına bağlıdır [23].

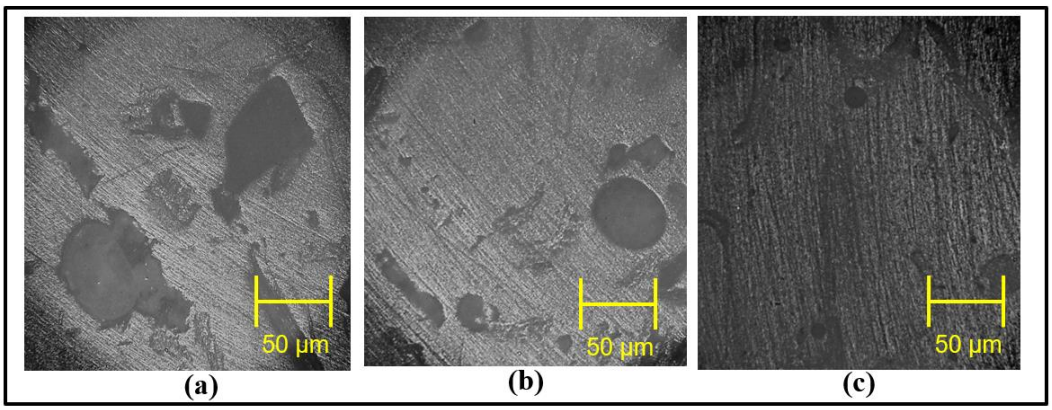


Şekil 2. Saf ve pirinç kabuğu katkılı reçinelerin **(a)** Young modülü ve **(b)** kopma dayanımı.



Şekil 3. Çekme deneyi sonrası kimyasal işleme maruz kalmamış numunelerin kırılma yüzeylerinin fotoğrafı **(a)** %20 PK takviyeli **(b)** %15 PK takviyeli **(c)** mekanik öğütülme işlemi yapılmamış %15 PK takviyeli **(d)** %5 PK takviyeli.

Şekil 2a'da gözlemlenen Young modülünün epoksiye pirinç kabuğu eklenince düşüp sonra pirinç kabuğu miktarı ile artması, yapıda epoksi pirinç kabuğu arayüzlerinde boşlukların bulunması ve pirinç kabuğu miktarı arttıkça boşluk miktarının azalması ile açıklanabilir. Şekil 4'te göründüğü üzere yüksek pirinç kabuğu olan kompozitlerdeki boşluk miktarı daha azdır. Pirinç kabuğu miktarı arttıkça kompozitin içindeki pirinç kabukları daha fazla sıkışıp, pirinç kabuğunun kavisli geometrisinden oluşan boşlukların azalmasına sebep olmuştur. Bu sebeplerden dolayı kompozitin Young modülü pirinç kabuğu katkısı ile önce düşmüş sonra yükselmiştir.



Şekil 4. İşlem görmemiş pirinç kabuğu ile üretilmiş PK-epoksi numenlerin boşluk yapısı **(a)** %15 PK-epoksi **(b)** %10 PK-epoksi **(c)** %5 PK-epoksi

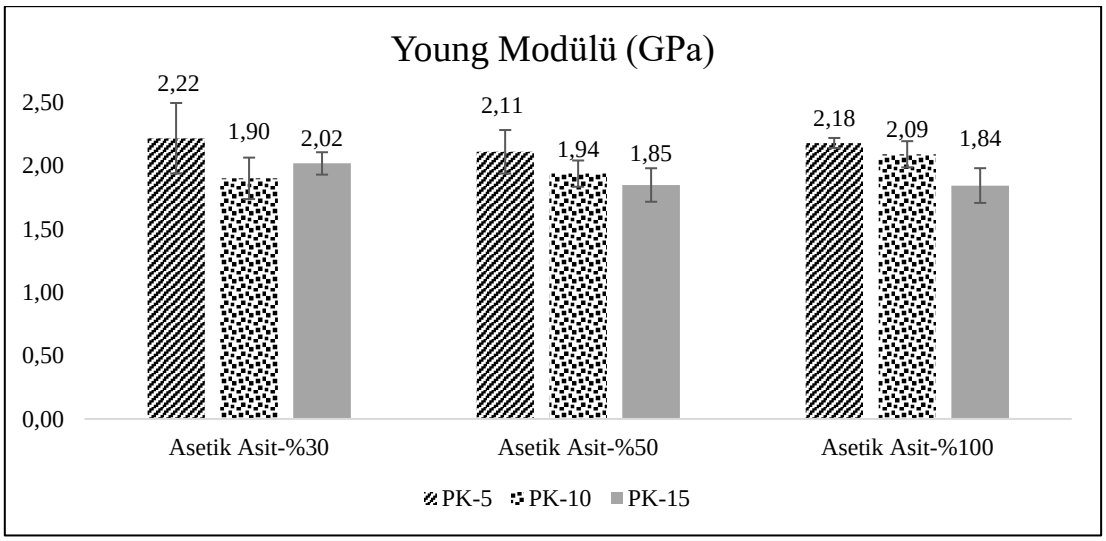
Pirinç katkı miktarının kopma dayanımına etkisini gösteren Şekil 2b'den anlaşılacağı gibi pirinç kabuğu miktarı arttıkça kompozitin kopma dayanımı düşmektedir. Pirinç kabuğu yapısal bir katkı maddesi olarak kullanılmadığından dolayı kopma dayanımındaki bu düşüş beklenmektedir. Pirinç kabuğunda fiziksel olarak görülebilen gevreklik ve kolay toz haline getirilebilme özelliği bu sonuçlar ile nicel olarak görülmüştür. Kopma dayanımındaki düşüş lineer bir eğilim izlemektedir ve belirleme katsayısı $R^2 = 0{,}92$ dir. Karışım kuralına göre de lineer bir eğilim izlenmesi beklenmektedir. Belirleme katsayısının 1'den uzak olmasının nedeni yapıdaki boşlukların mekanik özellikleri düşürmesi ve kopma dayanımı eğiliminin doğrusallıktan saptırmasıdır [23]. Pirinç kabuğu katkısının mekanik özelliklerde yaptığı bu düşüşe önişlem ile yüzey iyileştirmesi yaparak engellemeye çalışılmıştır. Bu sebeple pirinç kabukları kompozit üretimi öncesi farklı solüsyonlar ile önişleme tabi tutulmuştur.

Şekil 5'te %30, %50, ve %100* konsantrasyonda asetik asit ile önişlem görmüş farklı oranlardaki pirinç kabukları ile üretilmiş kompozitlerin çekme testi sonucu ortaya çıkan mekanik özellikleri verilmiştir.

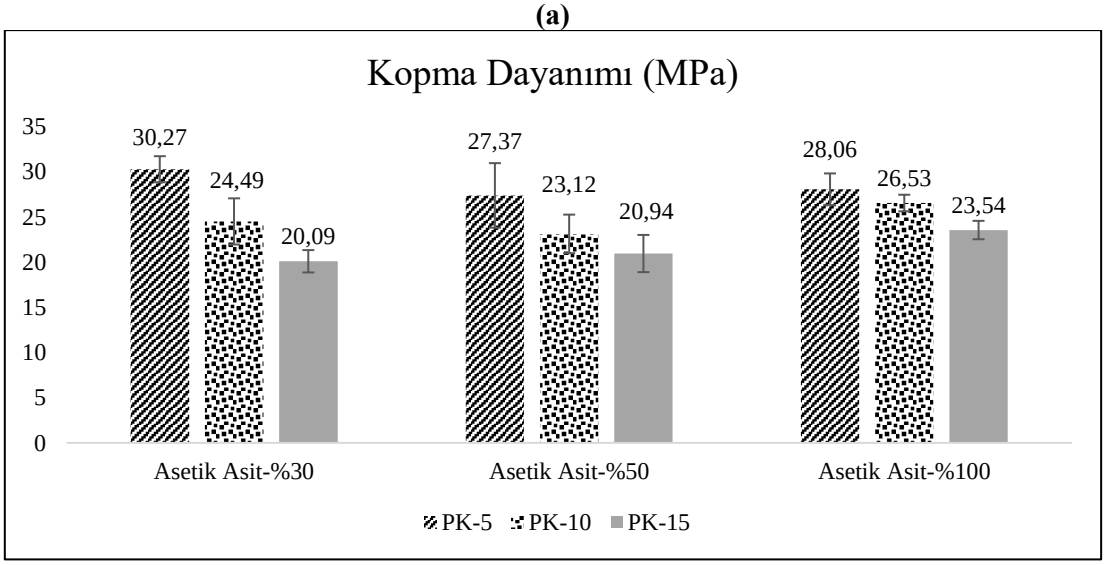
Şekil 5a'da asetik asit ile önişlem görmüş pirinç kabukları ile üretilmiş kompozitin Young modülü grafikleri verilmiştir. Asetik asit ile pirinç kabuklarının önişleme tatbiki Young modülünü hem saf epoksiye göre hem de işlem görmemiş pirinç kabuklu kompozite göre artırmıştır. Saf epoksiye göre %7 ila %29 artış gözlemlenmiştir. Yüzdelik pirinç kabuğu oranına göre işlem görmüş ve görmemiş kompozitler karşılaştırılınca, %5, %10, ve %15 oranında pirinç kabuğu içeren kompozitlerde Young modülü sırasıyla %60-68, %25-38, ve %23-34 artış göstermiştir. Bu artışın sebebi asetik asit işleminin pirinç kabukları yüzeyine etkisi ile epoksi pirinç kabuğu arayüzünün iyileştirmesini sağlamasıdır. Asetik asit işlemi [22] pirinç kabuğu yüzeyindeki safsızlıkları giderebilir, yüzey pürüzlülüğünü artırabilir, yüzeye fonksiyonel gruplar katabilir, ve selüloz bileşenin kristalliğini artırabilir [24, 25]. Bu da kompozit malzemelerde takiyeye elemanı ve matris arasındaki yapışmayı geliştirebilir. **Hata! Başvuru k aynağı bulunamadı.**a-c'de görüldüğü üzere asetik asit işlemi epoksi pirinç kabuğu arayüzeyini geliştirmiştir. Pirinç kabuğundaki değişimler ve arayüz iyileştirmesine bağlı boşluk azalımı Young modülündeki artışın nedeni olabilir. Asetik asitin konsantrasyonu ile Young modülündeki artış arasında belirli bir korelasyon gözlemlenmemiştir.

Şekil 5b'de üretilen kompozitlerin asetik asit ile önişlem sonucu kopma dayanımındaki değişiklikler gösterilmiştir. Önişlem sırasında kullanılan asetik asit konsantrasyonunun, kopma dayanımına büyük bir etkisi olmadığı gözükmektedir. Onun dışında saf epoksi numunelerde gözlemlendiği üzere kopma dayanımı katkı oranı arttıkça azalmıştır. Daha önce de belirtildiği üzere pirinç kabuğunun kopma

dayanımı epoksiden saha düşük olduğundan dolayı pirinç kabuğu katkı miktarı arttıkça kompozitin kopma dayanımı düşmektedir. Asetik asidin kopma dayanımı üzerine etkisi incelenecek olursa, aynı oranda pirinç kabuğu katılmış önişlem görmüş kompozitlerin kopma dayanımları ile ön işlemsiz kompozitlerin kopma dayanımı deneysel dağılım da hesaba katılınca fark gözetmemektedir.



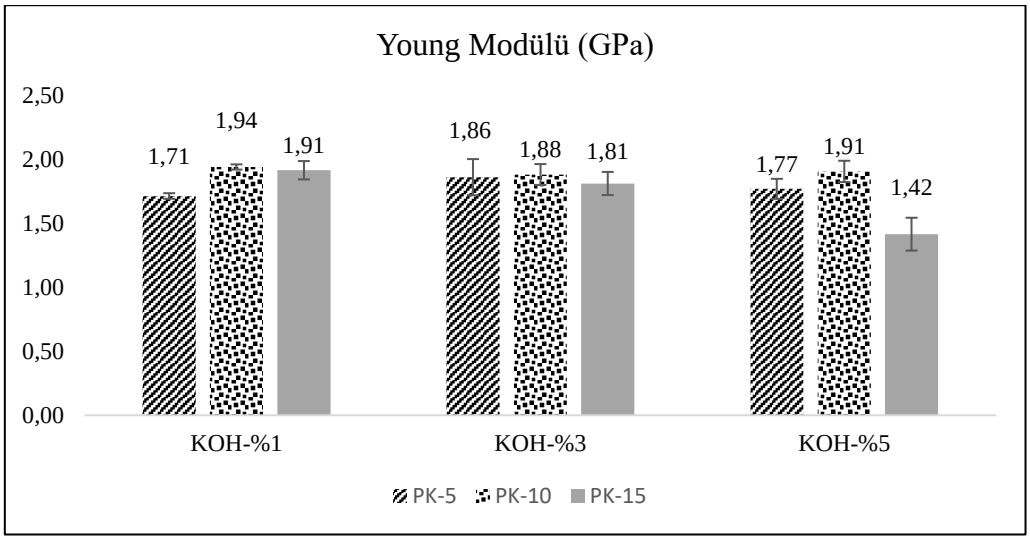
(a)



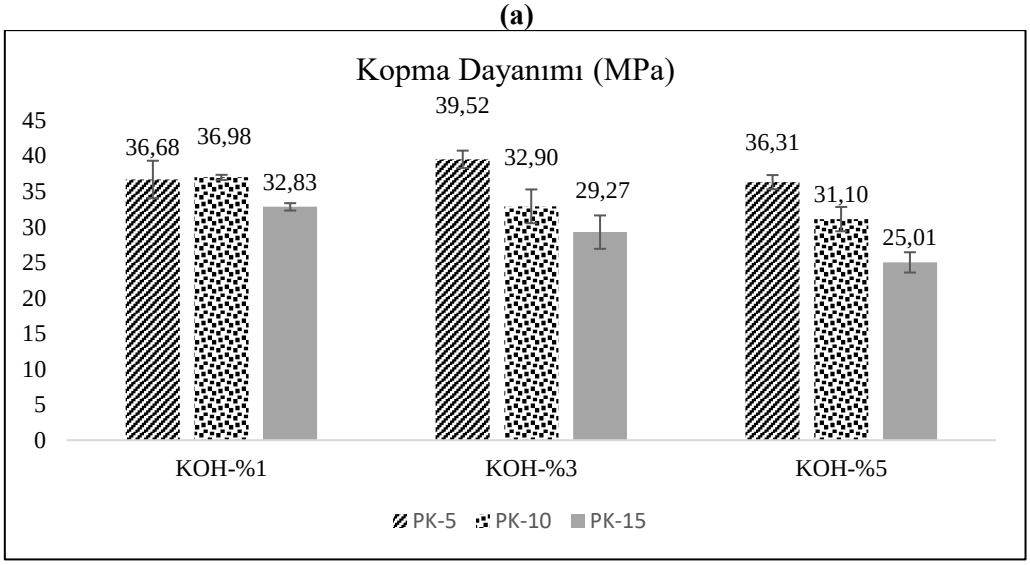
(b)

Şekil 5. Asetik Asit ile yıkanmış pirinç kabuğu katkılı reçinelerin **(a)**Young modülü **(b)** kopma dayanımı.

Şekil 6'da farklı oranlarda KOH ile önişlem görmüş pirinç kabuğu katkılı epoksi kompozitlerin Young modülü ve kopma dayanımı sonuçları verilmiştir. Şekil 6a'da %1-3 arasında KOH ile önişlem görmüş ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarda pirinç kabuğu kullanılmış kompozitlerin Young modülleri gösterilmiştir. Genel olarak önişlem görmemiş kompozitlerin Young modülleri ile karşılaştırıldığında KOH ile önişlem görmüş pirinç kabuğu kompozitler daha yüksek rijitlik göstermektedir (%5 KOH ile işlem görmüş %15 pirinç kabuğu içeren kompozitler hariç). Young modülündeki bu artış alkali önişleminin yüzey alanını artmasından ve yüzey değişkelerindendir [26, 27]. Young modülündeki spesifik değişiklikler alkali konsantrasyonu, işlem süresi ve pirinç kabuğunun spesifik özellikleri gibi çeşitli faktörlere bağlıdır [28]. Alkali önişleminin yüzey gözenekliliği artırması kompozitlerde boşluklu veya yüksek reçine barındıran alanlar oluşturduğundan Young modülündeki artış pirinç kabuğu artışı ile doğru bir orantı göstermediği düşünülmektedir. Ayrıca pirinç kabukları üzerinde yapılan alkali işleminin etkilerinin farklılık göstermesinden dolayı farklı KOH oranlarının Young modülü üzerine etkisi gözlemlenememiştir.



(a)



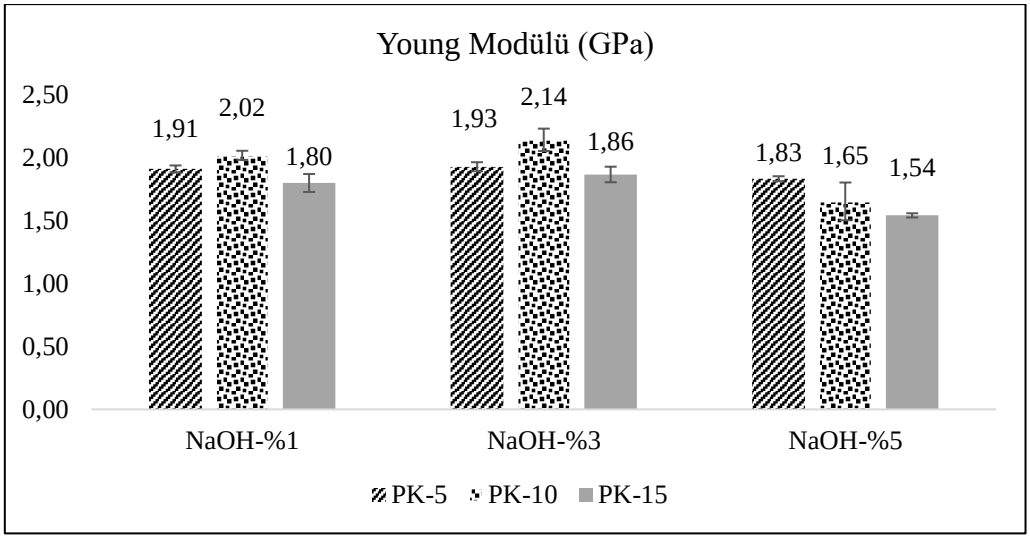
(b)

Şekil 6. KOH ile yıkanmış pirinç kabuğu katkılı reçinelerin **(a)**Young modülü **(b)** kopma dayanımı.

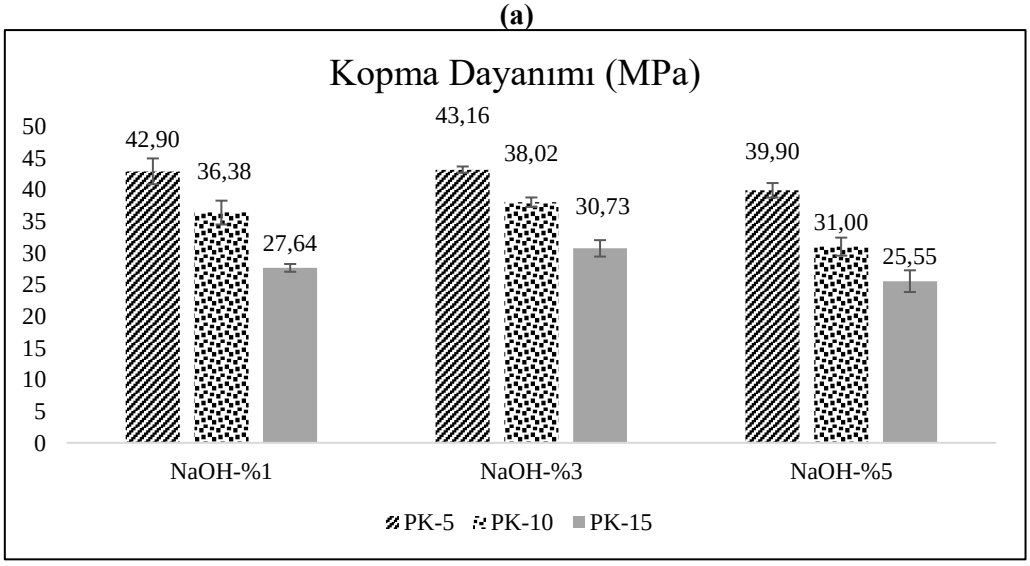
KOH önişlemi gibi NaOH önişlemi de yüzeyi aşındırarak yüzey alanı artırır ve yüzey kimyasını değiştirir [29] Bu sebeple de mekanik özelliklerde önişlem görmemiş pirinç kabuklu kompozitlere göre artış beklenmektedir. Şekil 7a'da verilen NaOH ile önişlem görmüş pirinç kabuğu katkılı epoksi kompozitlerin Young modülü ve kopma dayanımı sonuçları da bu tezi desteklemektedir. Şekil 7a'da verilen %1, %3, ve %5 konsantrasyonda NaOH ile önişlem görmüş pirinç kabuğu katkılı kompozitler Young modülü hem önişlem görmemiş hem de KOH ile önişlem görmüş kompozitlerden daha yüksek çıkmıştır (%5 NaOH ile işlem görmüş %10 pirinç kabuğu içeren kompozitler hariç). NaOH önişlemi en yüksek Young modüllerini %3 konsantrasyonda vermiştir. Fazla NaOH kullanımı kazanılan rijitliğin kaybolmasına neden olmuştur. Bunun nedeninin yüksek konsantrasyonlu alkali metal hidroksitlerin pirinç kabuklarından fazla miktarda lignin ve silikayı gidererek çapını azaltması [28] ve sonuç olarak esnekliği artırıp aynı zamanda gözenekli yapı oluşturarak rijitliğin düşmesi olduğu düşünülmektedir [27].

NaOH önişleminin kopma dayanımına etkisi Şekil 7b'de gösterilmiştir. Young modülünde olduğu gibi en iyi kopma dayanımını %3 konsantrasyondaki NaOH ile önişlem görmüş pirinç kabukları ile üretilen kompozitler vermiştir. NaOH ile önişlem görmüş kompozitler ve aynı miktarda pirinç kabuğu içeren kompozitler karşılaştırıldığında NaOH önişleminin kopma dayanımını en çok artıran işlem olduğu gözükmektedir. NaOH ile önişlem görmüş ağırlıkça %5 pirinç kabuklu kompozitlerin kopma dayanımını saf epoksinin kopma dayanımı bir standart sapma dahilinde çıkmıştır. NaOH önişleminin

pirinç kabuğu yüzeylerinin iyileştirmesi ve yüzey kimyasını değiştirmesinin sonucu olarak pirinç kabuğunun çekme dayanımının arttığı ve bu sebeple kompozitin kopma dayanımını yükselttiği düşünülmektedir. Ancak NaOH önişlemine tabi tutulmuş pirinç kabuğu kompozitlerinde diğer üretilen kompozitlerde olduğu gibi kopma dayanımı pirinç kabuğu miktarı ile azalmıştır. NaOH önişleminin pirinç kabuğunun çekme dayanımını artırarak ağırlıkça %5 pirinç kabuklu kompozitlerde saf epoksi düzeyine getirdiğinden dolayı ağırlıkça %10 ve %15 pirinç kabuğu içeren kompozitlerin de kopma dayanımının saf epoksininkine yakın olması gerekirdi. Bunun sebebi NaOH kullanımının pirinç kabuğunda Şekil 8g-i'de görüldüğü üzere pürüzlü yapı oluşturmasından dolayı [25] düşen mukavemetinin yüksek pirinç kabuğu oranlarında NaOH işleminden gelen yüzey iyileştirmesinin üstüne geçmesi olabilir. Yüksek pirinç kabuğu oranlarında pirinç kabuklarının tam dağılım sağlanamaması, yüzey oranının hacim oranıyla aynı doğrultuda artmamasına sebep olduğundan kopma dayanımındaki bu gerilemenin görüldüğü düşünülmektedir.

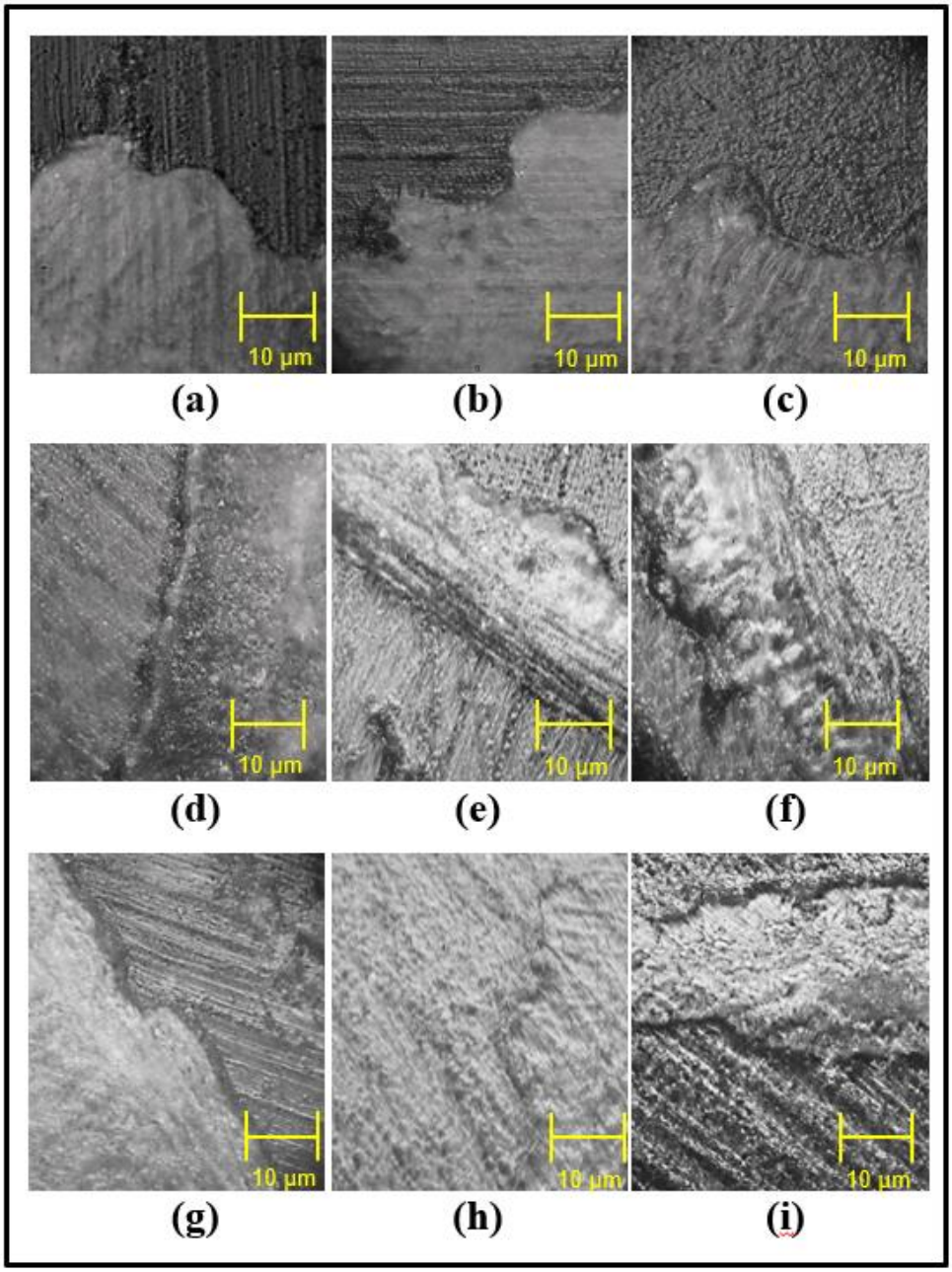


(a)



(b)

Şekil 7. NaOH ile yıkanmış pirinç kabuğu katkılı reçinelerin **(a)** Young modülü **(b)** kopma dayanımı.



Şekil 8. Kimyasal işlemlere göre PK ile matris arasındaki ara yüzey yapısı, asetik asit **(a)** %30, **(b)** %50, **(c)** %100, KOH **(d)** %1, **(e)** %3, **(f)** %5, NaOH **(g)** %1, **(h)** %3, **(i)** %5.

4. SONUÇ

Pirinç kabuğu miktar olarak çokça bulunan bir tarımsal atık olup, bu çalışmada polimer malzemeler içerisinde takviye elemanı olarak performansının nasıl geliştirileceği üzerine çalışmalar yapılmıştır. Asit ve alkali olmak üzere farklı kimyasal yüzey işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu kimyasal işlemler göz önüne alındığı zaman işlem görmemiş PK-epoksi kompozitlerle kıyaslandığında, kimyasal işlemlerin mekanik özellikleri arttırdığı gözlemlenmiştir. Mikroskop görüntüleri göz önüne alındığı zaman bu iyileşmenin, yüz iyileşmesinden dolayı pirinç kabukları ile reçine arasındaki ara yüzün güçlenmesinden dolayı olduğu görülmektedir. Alkali yüz işlemlerinin, mekanik özellikler dikkate alındığında daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. NaOH ile yapılan yüz işlemlerinin pirinç kabuğu için KOH ile kıyaslandığında bir miktar daha iyi sonuç verdiği sonucuna varılmıştır.

Polypropilen gibi daha düşük Young modülü ve çekme dayanımı olan polimerlerde kullanılması daha uygun. Bu özelliklerdeki polimerlerde mekanik özelliklerde artırma gösterme potansiyeli yüksek. Ayrıca

pirinç kabuğu yapısal iyileştirme adına kullanılmasa bile Avrupa Birliği'nin 2050 iklim nötrlüğü hedefi kapsamında yapılarda karbon depolama konusunda dolgu malzemesi olarak kullanılarak atık olmak yerine iklimi korumak adına kullanılabilir.

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma Hitit Üniversitesi tarafından MUH19001.19.010 numaralı bilimsel araştırma proje kapsamında desteklenmiştir.

REFERANSLAR

[1] A. Gomez-Campos, C. Vialle, A. Rouilly, L. Hamelin, A. Rogeon, D. Hardy, and C. Sablayrolles "Natural Fibre Polymer Composites - A game changer for the aviation sector?," *J. Clean. Prod.*, vol. 286, p. 124986, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124986.

[2] R. V. Patel, A. Yadav, and J. Winczek, "Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Natural Fiber-Reinforced Epoxy Composites for Construction and Automotive Applications," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 8, 2023, doi: 10.3390/app13085126.

[3] S. Vemuganti, R. Chennareddy, A. Riad, and M. M. Reda Taha, "Pultruded gfrp reinforcing bars using nanomodified vinyl ester," *Materials (Basel).*, vol. 13, no. 24, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/ma13245710.

[4] F. L. Jin, X. Li, and S. J. Park, "Synthesis and application of epoxy resins: A review," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 29, pp. 1–11, 2015, doi: 10.1016/j.jiec.2015.03.026.

[5] A. Belaadi, A. Bezazi, M. Bourchak, F. Scarpa, and C. Zhu, "Thermochemical and statistical mechanical properties of natural sisal fibres," *Compos. Part B Eng.*, vol. 67, pp. 481–489, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.07.029.

[6] S. D. A. Shubbar, "Experimental Investigation of Rice Husk Particles as Filler in Hybrid Composites," *Eng. Sci.*, no. 26, p. 2018, 2018.

[7] G. Frisoni, M. Baiardo, M. Scandola, D. Lednická, M. C. Cnockaert, J. Mergaert, and J. Swings, "Natural cellulose fibers: Heterogeneous acetylation kinetics and biodegradation behavior," *Biomacromolecules*, vol. 2, no. 2, pp. 476–482, 2001, doi: 10.1021/bm0056409.

[8] N. Petchwattana, S. Covavisaruch, and S. Chanakul, "Mechanical properties, thermal degradation and natural weathering of high density polyethylene/rice hull composites compatibilized with maleic anhydride grafted polyethylene," *J. Polym. Res.*, vol. 19, no. 7, 2012, doi: 10.1007/s10965-012-9921-6.

[9] H. S. Yang, H. J. Kim, H. J. Park, B. J. Lee, and T. S. Hwang, "Effect of compatibilizing agents on rice-husk flour reinforced polypropylene composites," *Compos. Struct.*, vol. 77, no. 1, pp. 45–55, 2007, doi: 10.1016/j.compstruct.2005.06.005.

[10] M. H. Nguyen, B. S. Kim, J. R. Ha, and J. Il Song, "Effect of plasma and NaOH treatment for rice husk/PP composites," *Adv. Compos. Mater.*, vol. 20, no. 5, pp. 435–442, 2011, doi: 10.1163/092430411X570112.

[11] I. Ahmad, C. E. Lane, D. H. Mohd, and I. Abdullah, "Electron-beam-irradiated rice husk powder as reinforcing filler in natural rubber/high-density polyethylene (NR/HDPE) composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 8, pp. 3069–3075, 2012, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.04.071.

[12] H. D. Rozman, M. H. Lee, R. N. Kumar, A. Abusamah, and Z. A. Mohd Ishak, "Effect of chemical modification of rice husk with glycidyl methacrylate on the mechanical and physical properties of rice husk-polystyrene composites," *J. Wood Chem. Technol.*, vol. 20, no. 1, pp. 93–109, 2000, doi: 10.1080/02773810009349626.

[13] R. Santiagoo, H. Ismail, and K. Hussin, "Effects of Acetic Anhydride on the Properties of Polypropylene(PP)/Recycled Acrylonitrile Butadiene(NBRr)/Rice Husk Powder(RHP)

Composites," *Polym. - Plast. Technol. Eng.*, vol. 51, no. 15, pp. 1505–1512, 2012, doi: 10.1080/03602559.2012.698685.

[14] H. Gu, "Tensile behaviours of the coir fibre and related composites after NaOH treatment," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 9, pp. 3931–3934, 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2009.01.035.

[15] J. Rout, M. Misra, S. S. Tripathy, S. K. Nayak, and A. K. Mohanty, "The influence of fibre treatment of the performance of coir-polyester composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 61, no. 9, pp. 1303–1310, 2001, doi: 10.1016/S0266-3538(01)00021-5.

[16] M. M. Rahman and M. A. Khan, "Surface treatment of coir (Cocos nucifera) fibers and its influence on the fibers' physico-mechanical properties," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 11–12, pp. 2369–2376, 2007, doi: 10.1016/j.compscitech.2007.01.009.

[17] S. Sair, A. Oushabi, A. Kammouni, O. Tanane, Y. Abboud, and A. El Bouari, "Mechanical and thermal conductivity properties of hemp fiber reinforced polyurethane composites," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 8, no. October 2017, pp. 203–212, 2018, doi: 10.1016/j.cscm.2018.02.001.

[18] J. Madera-santana and M. O. W. Richardson, "Effects of natural fiber surface treatments on ethylene vinyl acetate composites," *Plast. Res. Online*, no. July, pp. 1–3, 2012.

[19] N. Bisht and P. C. Gope, "Effect of Alkali Treatment on Mechanical Properties of Rice Husk Flour Reinforced Epoxy Bio-Composite," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 11, pp. 24330–24338, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.228.

[20] N. Bisht and P. Chandra Gope, "Effect of rice husk (treated/untreated) and rice husk ash on fracture toughness of epoxy bio-composite," *J. Mech. Behav. Mater.*, vol. 29, no. 1, pp. 177–185, 2021, doi: 10.1515/jmbm-2020-0018.

[21] L. S, H. J, and Y. Y, "Properties of Rice Husk/Epoxy Composites Under Different Interfacial Treatments," *Polym. Compos.*, no. 38, pp. 1992–2000, 2017, doi: 10.1002/pc.

[22] Z. Chen, Y. Xu, and S. Shivkumar, "Microstructure and tensile properties of various varieties of rice husk," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 98, no. 3, pp. 1061–1070, 2018, doi: 10.1002/jsfa.8556.

[23] K. a Olivero, H. J. Barraza, E. a O. Rear, and M. C. Altan, "Effect of Injection Rate and Post-Fill Cure," *J. Compos. Mater.*, vol. 36, no. 16, pp. 2010–2028, 2011, doi: 10.1106/002199802026244.

[24] S. Kalia, B. S. Kaith, and I. Kaur, "Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites—A review," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 49, no. 7, pp. 1253–1272, Jul. 2009, doi: 10.1002/pen.21328.

[25] S. S. Bhambure, A. S. Rao, and T. Senthilkumar, "Characterization of Control and Chemically Modified Kenaf Fiber," *J. Nat. Fibers*, vol. 19, no. 15, pp. 10320–10330, Nov. 2022, doi: 10.1080/15440478.2021.1993500.

[26] C. Mongioví *et al.*, "Use of Chènevotte, a Valuable Co-Product of Industrial Hemp Fiber, as Adsorbent for Pollutant Removal. Part I: Chemical, Microscopic, Spectroscopic and Thermogravimetric Characterization of Raw and Modified Samples," *Molecules*, vol. 26, no. 15, p. 4574, Jul. 2021, doi: 10.3390/molecules26154574.

[27] T. P. T. Tran, J.-C. Bénézet, and A. Bergeret, "Rice and Einkorn wheat husks reinforced poly(lactic acid) (PLA) biocomposites: Effects of alkaline and silane surface treatments of husks," *Ind. Crops Prod.*, vol. 58, pp. 111–124, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.indcrop.2014.04.012.

[28] W. Frącz, G. Janowski, and Ł. Bąk, "Influence of the Alkali Treatment of Flax and Hemp Fibers on the Properties of PHBV Based Biocomposites," *Polymers (Basel).*, vol. 13, no. 12, p. 1965, Jun. 2021, doi: 10.3390/polym13121965.

Akdeniz Mühendislik Dergisi
Akdeniz Journal of Engineering
(AKUJE)
2024, 2(1), pp. 13-23
Araştırma Makalesi Research Article

GERÇEK ZAMANLI VERİ AKIŞLARINDA OTOMATİK ANORMALLİK TESPİTİ: FİNANSAL TEKNOLOJİLER ŞİRKETİNDE BİR UYGULAMA

AUTOMATED ANOMALY DETECTION IN REAL-TIME DATA STREAMS: AN APPLICATION AT FINANCIAL TECHNOLOGIES COMPANY

Dicle ASLAN[*1]

1 Token Finansal Teknolojiler, İTÜ Maslak Kampüsü Arı 8 Binası, İstanbul, Türkiye

ABSTRACT

Abnormalities are sample in data that do not fit the normal patterns. Various reasons such as malware, fraud, cyber-attack, terrorist activities, faults, system behavior changes, instrument and human error might generate abnormalities. Anomaly detection is a technique that provides unexpected situations or patterns to be found in the data. These unexpected situations or patterns are called as anomalies, outliers and unexpected cases in the literature that do not fit to the expected behavior of the data. Diverse research and applications have been carried out for the anomaly detection which is a critical task for the industries. The studies about the anomaly detection in the literature are mostly trying to build the system for security and error finding activities. Increasing IoT devices in the banking and finance sector, healthcare, manufacturing, IT and telecom, defense and government might drive the anomaly detection market. These industries regularly deal with the important data, enabling criminals to be prone to serious fraud, theft, and attacks that give them control over the firm's infrastructure. To predict the anomaly, there are numerous learning methods as supervised, semi-supervised and unsupervised. As a traditional method, anomalies might be alarmed according to fixed threshold-level. This approach might not be having satisfied and accurate outcome. In this scope, this paper proposes a novel concept as building automated anomaly detector system for business operation platform at Financial Technologies company which is a leader in payment systems industry in Turkey by using Isolation Forest algorithm developed in Python. Thanks to this system, abnormal data in the system might be detected in real time. In this study, to integrate the business operation platform, we have firstly examined the data of deleting banking applications on the EFT-POS devices and detected the anomaly. The detection helped the company to save more than 50% of the banking applications on the devices from deletion by contacting banks and customers instantly in the last quarter of 2023.

Keywords: Anomaly Detection, Ensemble Methods, Isolation Forest, Outlier Detection, Payment Systems, Unsupervised Learning, Financial Technologies

ÖZET

Anormallikler, normal desenlere uymayan veri örnekleridir. Kötü amaçlı yazılım, dolandırıcılık, siber saldırı, terörist faaliyetler, hatalar, sistem davranışı değişiklikleri, araç ve insan hataları gibi çeşitli nedenler anormallikler oluşturabilir. Anomali tespiti, verilerde beklenmeyen durumların veya desenlerin bulunmasını sağlayan bir tekniktir. Bu beklenmeyen durumlar veya desenler, literatürde verinin beklenen davranışına uymayan anormallikler, aykırı değerler ve beklenmeyen durumlar olarak adlandırılır. Endüstriler için kritik bir görev olan anormallik tespiti için çeşitli araştırmalar ve uygulamalar yapılmaktadır. Literatürdeki anormallik tespitiyle ilgili çalışmalar genellikle güvenlik ve hata bulma faaliyetleri için sistem oluşturmaya çalışmaktadır. Bankacılık ve finans sektöründe, sağlık, üretim, bilişim teknolojileri ve telekomünikasyon, savunma ve hükümet gibi IoT cihazlarının artması, anormallik tespiti pazarını artırabilir. Bu endüstriler düzenli olarak önemli verilerle uğraşır ve suçluların firma altyapısı üzerinde kontrol sahibi olmalarına neden olan ciddi dolandırıcılık, hırsızlık ve saldırılarına karşı savunmasız olabilirler. Anormalliği tahmin etmek için denetimli, yarı denetimli ve denetimsiz birçok öğrenme yöntemi bulunmaktadır. Geleneksel bir yöntem olarak, anormallikler sabit eşik seviyesine göre alarm verilebilir. Bu yaklaşım tatmin edici ve doğru bir sonuç sağlamayabilir. Bu kapsamda, bu çalışma, Türkiye'de ödeme sistemleri sektöründe lider olan bir firmanın işletme platformu için otomatik bir anormallik tespit sistemi oluşturma konseptini önermektedir. Python'da geliştirilen İzolasyon Ormanı algoritmasını kullanarak bu sistem sayesinde Finansal Teknolojiler şirketinde, sistemdeki anormal veriler anlık olarak tespit edilmektedir. Bu çalışmada, işletme platformunu entegre etmek için, EFT-POS cihazlarındaki bankacılık uygulamalarının silinme verilerini inceledik ve anormalliği tespit ettik. Bu tespit, Finansal Teknolojiler alanında yer alan firmanın 2023 yılının son çeyreğinde bankalar ve müşterilere hemen ulaşarak cihazlardaki bankacılık uygulamalarının %50'den fazlasının silinmesini engellemesine yardımcı oldu.

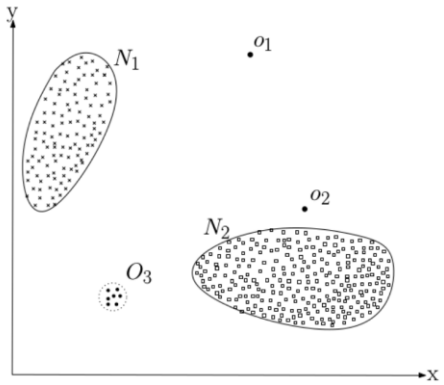
Anahtar Kelimeler: Anormallik Tespiti, Denetimsiz Öğrenme, Finansal Teknolojiler, İzolasyon Ormanı, Ödeme Sistemleri, Topluluk Öğrenmesi

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: dicle.aslan@tokeninc.com

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayım Tarihi
01.03.2024	15.05.2024	11.06.2024	30.06.2024

1. GİRİŞ

Anomali, verinin beklenen davranışıyla uyuşmayan durumları veya desenleri ifade edebilir [1]. Bu, diğer gözlemlerden önemli ölçüde farklı olan nadir gözlemlerdir. Şekil 1'de, N_1 ve N_2 olarak iki gözlem alanı bulunmaktadır. Bu alanlardaki noktalar normaldir; ancak, bu alanlardaki noktalar; o_1, o_2, o_3 anomali olarak kabul edilir.



Şekil 1. 2-boyutlu bir veri setindeki anormallikler [1]

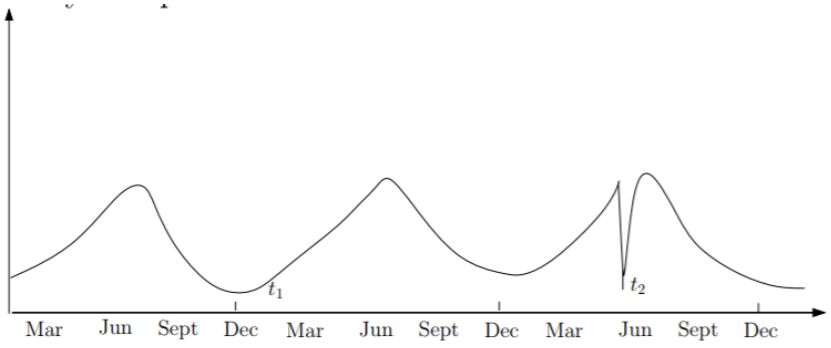
Şekil 1'de gösterilen yapıda normal ve anormal noktaların tespiti genellikle kolaydır. Ancak, genellikle normal ve anormal davranış durumlarının sınırı belirsizdir. Dolayısıyla, yakın bir alandaki anormal bir gözlem normal gibi görünebilir ve bu tanımlanması zor olabilir. Anormallik tespitinde belirli zorluklar vardır. Çoğu veri setinde, anormallik tespiti için normal ve anormal veriler genellikle açıkça küme oluşturmaz. Bir normal veri, anormallik verisi kümesine yakın olabilir ve bir anormallik verisi, normal veri kümesine yakın olabilir. Bu durumda, anormallik tespiti oldukça zorlaşır. Normal olarak adlandırdığımız davranışlar veya veriler zamanla değişebilir. Dolayısıyla, normal davranışları her zaman tanımlamak mümkün olmayabilir. Tüm alanlara belirli bir anormallik tespit tekniği uygulanamayabilir. Örneğin, tıbbi alandaki vücut sıcaklığındaki küçük bir dalgalanma anormallik davranışını gösterebilirken, hisse senetlerindeki küçük bir dalgalanma normal davranışı gösterebilir. Bu nedenle, tüm alanlara bir anormallik tespit yöntemi uygulamak mümkün değildir. Veri setlerindeki gürültü anormalliklerinin tespiti için gürültü giderme gereklidir. Ancak, gürültüyü ayırt etmek çok zor bir süreçtir [1].

Anormallik türleri, nokta anormallik, bağlamsal anormallik ve kolektif anormalliktir. Bir bireysel durumun diğer normal verilere uzak olması durumunda, bu bir nokta anormalliği verisidir çünkü anormallik tespiti bir özellikten bağımlıdır. Örneğin, kredi kartımızda harcanan tutar (harcama miktarı), anormallikleri tespit etmek için kullanılabilir. Şekil 1 nokta anormallikleri gösterir. Bir veri örneği her metinde anormal ise, bu bağlamsal bir anormallik olarak adlandırılır ve aynı zamanda koşullu bir anormallik olarak da adlandırılır. Bir bağlam, veri setindeki yapı tarafından indirgenir ve problem formülasyonunun bir parçası olarak belirtilmelidir. Bu bağlam, bazı durumlarda bazı verilerimizin anormalliğe işaret ettiği ve diğer durumlarda normal verilere işaret ettiği bir örnek olarak, bir bağlamda anormallik davranışı sergilerse bir anormallik örneğidir.

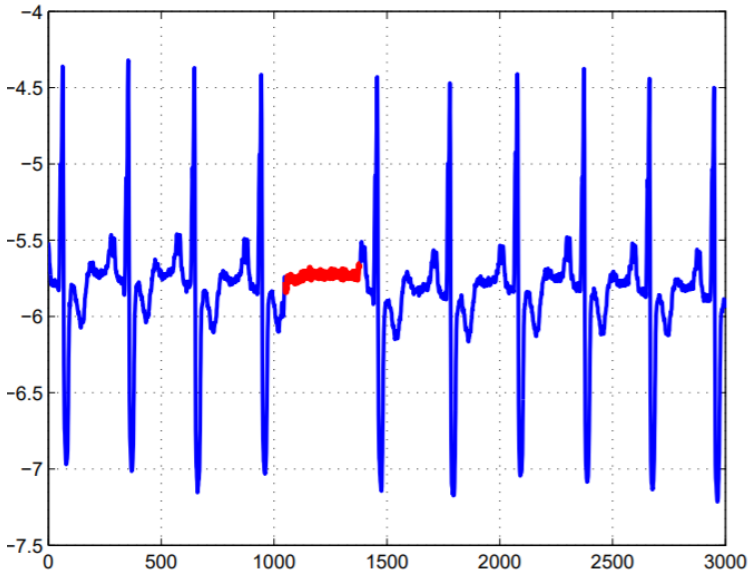
Şekil 2, belirli zamanlarda yılın belirli zamanlarında sıcaklık değişikliklerini gösteren bir zaman serisini sunar. Bu örnekte, t_1 zamanında düşük sıcaklık kışın normal davranışken, t_2 zamanında düşük sıcaklık yazın anormaldir.

Bu, verilerin birbiriyle ilişkilendirilmesi durumunda tüm veri setinde anormallik davranışı oluşturan kolektif bir anormallik örneğidir. Onunla ilişkilendirilen verilerden bazıları birlikte anormallik oluşturabilirken, bu veriler tek başına herhangi bir anormallik davranışı göstermeyebilir. Bu tür bir anormallik, bazı bilgisayar üretimi eylemlerin birlikte gerçekleştiğinde anormallik gösterdiğinde görülebilir.

Şekil 3, bir insanın elektrokardiyogramının çıktısını gösteren bir örneği açıklar. Kırmızı çizgi bölgesi, uzun süreli dönemde istikrarlı düşük değerin anormal olarak mevcut olduğu için anormallik gösterir.



Şekil 2. Sıcaklık zaman serisinde bağlamsal anormallik [1]



Şekil 3. İnsan elektrokardiyogramı çıktısında kolektif anormallik [1]

Uygulama Türkiye'de önde gelen ve %50 Pazar payına sahip bir Finansal Teknolojiler firmasında yapılmaktadır. İlgili firma, Türkiye'de 850.000 üzerinde terminale ve içerisinde de bankacılık, yemek kartı ve diğer uygulamalara sahiptir.

Literatürde, gerçek zamanlı veri akışları için otomatik anormallik tespit sistemi, bir Finansal Teknolojiler firması tarafından her EFT-POS (Noktadan Satışta Elektronik Fon Transferi) cihazı için uygulanan ilk deneyimdir. Çalışmanın geri kalanı şu şekilde yapılandırılmıştır: İkinci bölümde, anormallik tespitinde önceki çalışmalar tartışılmaktadır. Üçüncü bölüm, denetimsiz anormallik tespit algoritmaları hakkında bilgi sunmaktadır. Sonraki bölümde, yaklaşım, veri ve modelleme dahil olmak üzere çalışmanın metodolojisi incelenmektedir. İlerleyen bölüm, deneysel sonuçların tartışılmasını içermektedir. Sonuçlar ve ileri araştırmalar, makalenin son bölümünde önerilmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Anormallik tespiti ve aykırı değer tespiti konuları literatürde en yaygın olarak kullanılan konulardandır. Ayrıca, bu çalışmalar gelişen teknolojinin etkisiyle endüstriler tarafından gerçekleştirilmektedir. Çalışma, istatistiksel ve makine öğrenimi algoritmalarında geliştirilen aykırı değer tespiti tekniklerinin kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır. Bu çalışmada, sınıflandırma, kümeleme, en yakın komşu istatistiksel temelli teknikler kullanılmıştır [2]. [3], hem sayısal hem de sembolik veriler için aykırı değer tespiti madenciliği tekniklerinin kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır. Bu çalışmalar, sırasıyla istatistiksel ve sinir ağı tabanlı alanlarda yenilik tespiti sağlar [4-5]. [6], anormallik tespit sistemleri ve siber sızma tespit sistemlerinin geniş bir incelemesini sunmaktadır.

Son dönem çalışmaları genellikle Nesnelerin İnterneti (IoT) konusundaki anormalliklerle ilgilidir. Genişletilmiş IoT altyapısının kullanımıyla, çalışma, IoT sistemlerindeki saldırıları ve anormallikleri doğru bir şekilde tahmin etmek için çeşitli makine öğrenimi tekniklerini kullanır. Bu çalışmada, makine öğrenimi algoritmaları olarak lojistik regresyon (LR), karar ağacı (KA), destek vektör makinesi (DVM), yapay sinir ağı (YSA), rastgele orman (RO) kullanılmış ve bu yöntemler performans ölçütlerine göre karşılaştırılmıştır. Sistem, KA, RO ve YSA teknikleri kullanılarak %99,4 doğruluk elde etmiştir [7]. [8], gerçek dünya veri setinde sistem sağlık durumunu tahmin etmek için makine öğrenimi sınıflandırıcıları önermektedir. Sonuçlar, tekrarlayan sinir ağları tekniğinin sağlık sorunlarında anormallikleri tahmin etmede daha etkili olduğunu göstermektedir. Çalışma, anormallik davranışına dayalı bir sızma tespit sistemi geliştirir. Çalışmanın deneysel sonuçları, bilinen ve bilinmeyen sensör saldırıları için doğru tespit sağlar [9].

Çalışma, denetimsiz öğrenme paradigmasından türetilmiş yarı denetimli anormallik tespiti için matematiksel bir yöntem sunmaktadır. Bu, destek vektör veri açıklamasına (SVDD) dayanmaktadır [10]. [11], yüksek boyutlu veri setleri için hibrit yarı denetimli anormallik tespiti önermektedir. Veri, derin otokodlayıcı (DAE) ve ansambl k-en yakın komşu grafik tabanlı anormallik dedektöründen oluşur. [12], izolasyon ormanı algoritmasını kullanarak insansız hava aracında gerçek zamanlı anormallik tespiti sunar. [13], 10 farklı veri setinde kullanılan 19 farklı denetimsiz anormallik tespiti algoritmasının uygulanmasını önermektedir. Bu makale, denetimsiz öğrenme için yeni ve iyi finanse edilmiş bir inceleme olmayı amaçlamaktadır.

[14], sunuculardaki anormallikleri tespit etmek için kullanılan tekniklerin performanslarını incelemiştir. Çalışmada beş tekniğin (Yapay Sinir Ağları (YSA), Karar Ağacı, Rastgele Orman, K-En Yakın Komşu ve Ekstra Karar Ağacı) performansları karşılaştırılmış ve en iyi sonucun YSA algoritmasının verdiği tespit edilmiştir. [15], bilgisayar ağlarına yapılan saldırıları ağ trafiğindeki anormallikler kapsamında saldırı tespit sistemi geliştirilmiştir. İlgili sistemin geliştirilmesi kapsamında Rastgele Orman ve Ekstrem Gradyan Artırma algoritmaları en başarılı performans göstermiştir. [16], elektrik güç dağıtımında akıllı sayaç verilerindeki anormallikleri tespit etmek ve tahminleme yapmak için İzolasyon Ormanı, Yerel Aykırı Değer Faktörü ve FbProphet algoritmaları kullanılarak performanları karşılaştırılmıştır. Enerji tüketim ölçümlerinin hatalı yapılmasının önüne geçmek ve verimliliği ve tasarrufu artırmaya yönelik bir sistem geliştirmek istenmiştir. Çalışma sonucunda ise İzolasyon Ormanı yönteminin en başarılı sonuçlara sahip olduğu ve ilgili yöntemin kullanılarak sistemin geliştirilmesi gerektiği tespit edilmiştir. [17], IoT sistemlere yönelik siber saldırıların önceden tahmin edilmesine yönelik yapay zeka teknikleri ile tahminleme yapmışlardır. Klasik makine öğrenme tekniklerinden Destek Vektör Makineleri ve Naive Bayes algoritmaları ile derin öğrenme tekniklerinden Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) algoritması çalışma kapsamında tercih edilmiş ve performans karşılaştırması yapılmıştır. LSTM algoritma sonuçlarının diğer klasik makine öğrenme tekniklerine göre daha etkili sonuç gösterdiği tespit edilmiştir.

Son yıllarda, araştırmalara göre, yarı denetimli ve denetimsiz öğrenme anormallik tespiti ve IoT konuları literatürde en çok incelenen konular arasındadır. Literatürde yer alan çalışmalarda da denetimsiz öğrenme tekniklerinden İzolasyon Ormanı tekniği ile pratik ve etkili sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bu çalışma, bir Finansal Teknolojiler firmasındaki ilk gerçek kullanım vakası olarak cihazlardaki bankacılık uygulamalarının İzolasyon Ormanı tekniği kullanılarak denetimsiz anormallik tespitini sağlamaktadır. Bankacılık uygulaması silinmesi, şirket için oldukça önemli bir konudur çünkü gelirin büyük bir kısmı uygulamalardan gelmektedir.

3. METODOLOJİ

Bu metodoloji bölümünde, yaklaşımı, veri toplama yöntemini, modeli ve veri etiketleme adımlarını açıklıyoruz. Bu çalışmada, veri toplama ve model oluşturma kısımları, diğerlerine kıyasla daha kritik ve zordur. Verilerin ve özniteliklerin hazırlanmasının ardından, anormallikleri tespit etmek için Python kullanarak denetimsiz öğrenmeyi kullandık.

3.1. Yaklaşım

Bu çalışmada, ilk olarak anormallik tespit modelini oluşturmak için ilgili verileri ve Finansal Teknolojiler firmasına ait EFT-POS cihazlarında bankacılık uygulamalarının silinmesine ilişkin verileri kullandık. Şirket için gerçek zamanlı veri akışlarında anormallikleri tespit etmek kritik bir konudur.

Verilerde herhangi bir eksik değer veya geçersiz ölçüm bulunmamaktadır. Bu, son 3 yıla ait haftalık uygulama silme verilerini içerir. Bu çalışmada, anormallik tespiti ikili bir sınıflandırma olarak tanımlanmıştır. Verileri "normal" ve "anormallik" sınıfları olarak etiketliyoruz. Ardından, durumumuza en iyi çözümü bulmak için Python'da İzolasyon Ormanı modelini oluşturup geliştiriyoruz. Anormallik tespiti için uygun olan ve en iyi çözümü elde etmek için denetimsiz öğrenme tekniğini kullandık. İlerleyen bölümlerde, bu adımları detaylı olarak açıklayacağız.

3.2. Veri Toplama

Firmaya ait işlem platformuna otomatik anormallik tespit aracını entegre ettik. Operasyonel anormallikleri tespit etmek için öncelikle şirket için hayati öneme sahip olan bankacılık uygulamalarının silinme verilerini aldık. Veri setimizde, son 3 yılı içeren 18 ortağın haftalık bankacılık uygulamalarının silinme verileri bulunmaktadır. Her ortağın 150 uygulama silme kaydı bulunmaktadır. Bankacılık uygulamalarının silinmesine ilişkin verilerde bağlamsal anormallikler bulunmaktadır. Bu bağlam, veri noktalarımızın bazı durumlarda normal ve anormalliğe işaret ettiği, ancak belirli bir bağlamda, örneğin farklı ortaklarda anormallik gösteren bir örnektir. Üretim, kalite, satış, kurulum uygulamaları gibi diğer işletme verileri bir sonraki aşamada birbirine bağlanmıştır.

3.3. Model

Modelimizde, veri setindeki anormallikleri tahmin etmek için Python'da derlenmiş bir denetimsiz öğrenme tekniği olarak İzolasyon Ormanı algoritmasını kullandık. Bu Python kodunu, ortaklara ait tek değişkenli veriler (uygulama silme) için anormallikleri ve veri setindeki anormallik puanını bulmak amacıyla uyguladık. İzolasyon Ormanı algoritmasının parametrelerini belirlemenin kritik bir nokta olduğunu belirtmek gerekir.

Klasik "parametre" kodu, İzolasyon Ormanı modelinde şu şekildedir:

“class sklearn.ensemble.IsolationForest(n_estimators=100, max_samples=’auto’, contamination=’legacy’, max_features=1.0, bootstrap=False, n_jobs=None, behaviour=’old’, random_state=None, verbose=0, warm_start=False)”

Kontaminasyon, veri setindeki aykırı değerlerin oranını ifade eder. Yani, kontaminasyon, veri kümesindeki toplam veri noktalarının ne kadarının anormal olduğunu ifade eder. Veri kümesinin anomalilerle nasıl kirlendiğinin belirlenmesi gerekmektedir. Modelimizde, kontaminasyon oranının veri görselleştirmemizden gelen sezgisel bir değere dayanarak %12 olduğunu belirledik. Genellikle literatürde bu değer %22'dir. Çalışmamızda kontaminasyon değerini daha düşük belirlememizin sebebi, verimizdeki aykırılıkları (kirliliği) daha düşük tutmak istememizdendir. Özellik sayısı 1'dir. Her nokta, İzolasyon Ormanı yöntemiyle diğer noktalardan rastgele olarak ayrılır. Model, her bir noktanın bir düğümü temsil ettiği bir ağaç oluşturur. Anomali veri noktalarının ağaç yollarının genellikle normal veri noktalarından çok daha kısa olması nedeniyle, izolasyon ormanındaki ağaçların geniş bir derinliğe sahip olmasına gerek yoktur, bu nedenle daha küçük bir *max_depth* kullanılabilir ve daha az bellek gereksinimi oluşur. Orman izolasyon yönteminde*, n_estimators* ve max_sample parametrelerine dayanarak bir ağaç ormanı oluşturulur ve skor çıkarılır.

3.4. Veri Etiketleme

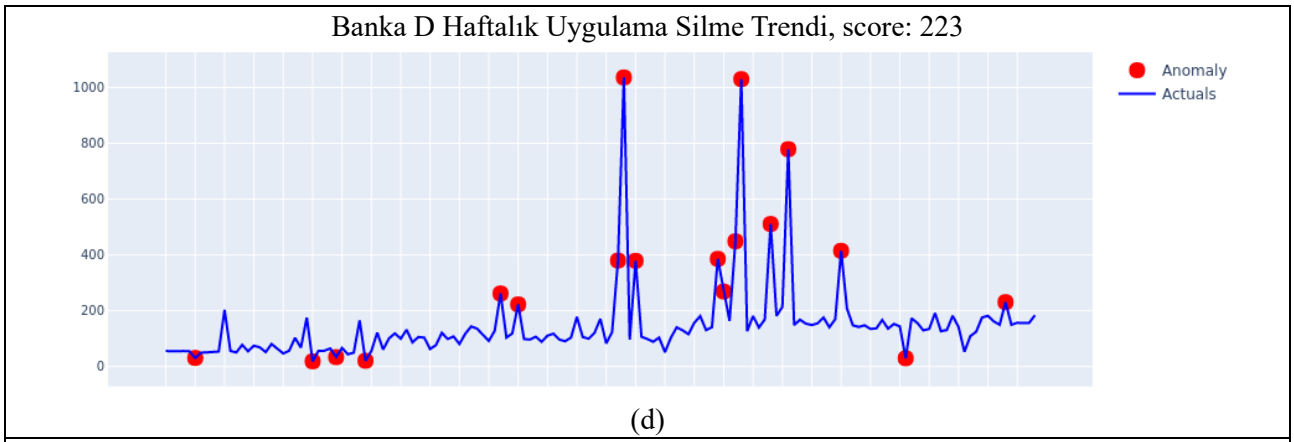
Anormallik tespit algoritmasının iki olası etiket sonucu vardır: anormal veya normal. Çalışma kapsamında her banka verisi için etiket ataması yaptık. Anormallik puanı veya güven değeri, anormalliğin derecesini gösterir. Anormallikleri tespit etmek için veri setindeki büyük miktardaki veriyi manuel olarak işlemek oldukça zor, zaman alıcı ve hata yapmaya açık bir faaliyettir. Ayrıca, geleneksel bir yöntem olarak, veri setindeki anormalliği belirlemek için genellikle sabit bir değer düşünülür. Ancak, bu yöntem tüm verilere ve özelliklere uygun olmadığından, bu şekilde doğru ve etkili sonuçlar sağlamaz. Bu görevi sürekli olarak daha doğru, daha kolay ve daha hızlı hale getirmek için işletme işlem platformuna entegre edilecek otomatik bir anormallik tespit sistemi geliştirdik. Bu sistem sayesinde, hem tek değişkenli hem de çok değişkenli durumlarda veri setindeki her bir öğe için anormallikler otomatik olarak tespit edilebilir.

3.4. Model Sonuçları

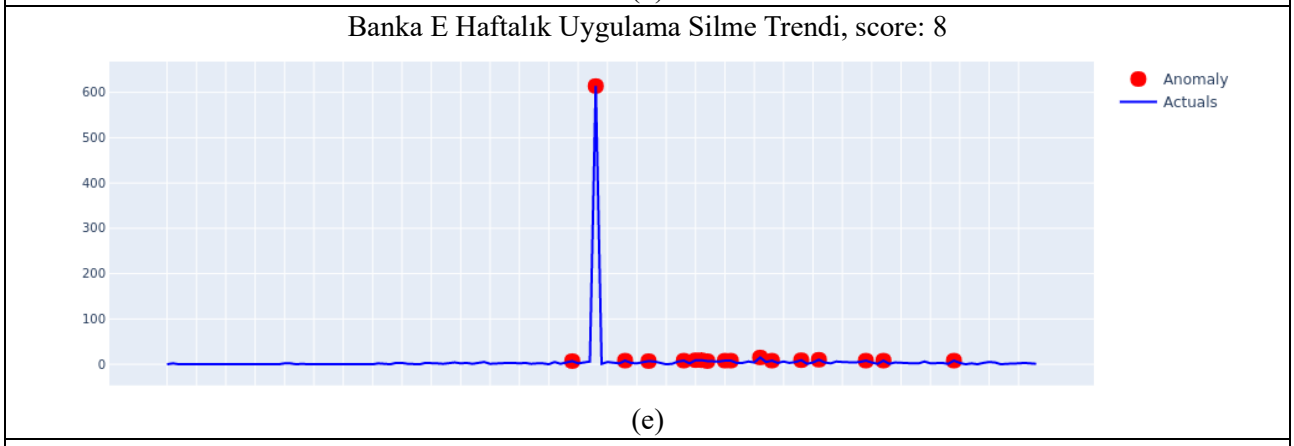
Bu bölümde, modelimizin sonuçlarını belirtiyoruz. Şekil 4, bankacılık uygulaması silme işleminin haftalık eğilimini ve gerçek zamanlı veri setinde tespit edilen anormallikleri göstermektedir. Ayrıca, sistemde uyarı yapmak için her ortak için anormallik puanını bulduk.

Şekil 4, her bir ortak için haftalık bankacılık uygulaması silme eğilimini, anormallikleri ve anormallik puanını göstermektedir. Anormallik puanı, sabit eşik seviyesi yerine kullanılan alarm seviyesidir. Banka A için, uygulama silme işlemi 490'a ulaştığında, bu kritik değer olduğu için sistem otomatik olarak kullanıcıları uyarır.

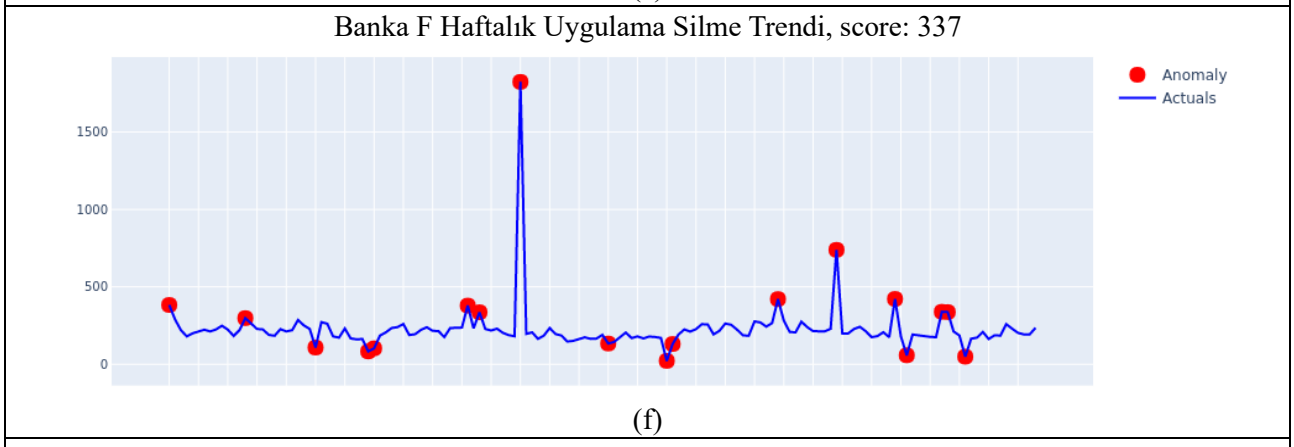
Şekil 4. (a) Banka A; **(b)** Banka B; **(c)** Banka C; **(d)** Banka D; **(e)** Banka E; **(f)** Banka F; **(g)** Banka G; **(h)** Banka H; **(i)** Banka I; **(j)** Banka J; **(k)** Banka K; **(l)** Banka L; **(m)** Banka M; **(n)** Banka N; **(o)** Banka O; **(p)** Banka P



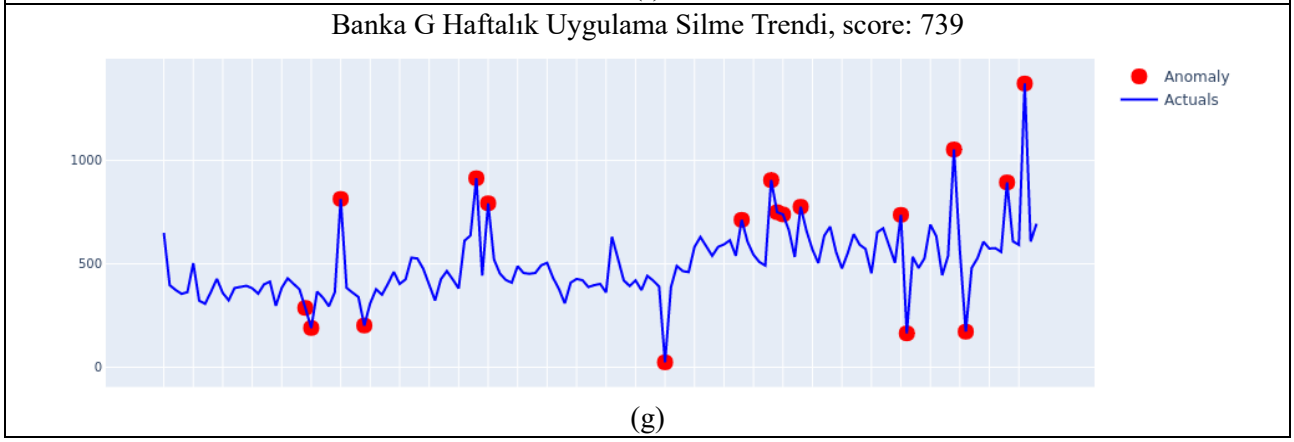
(d)



(e)

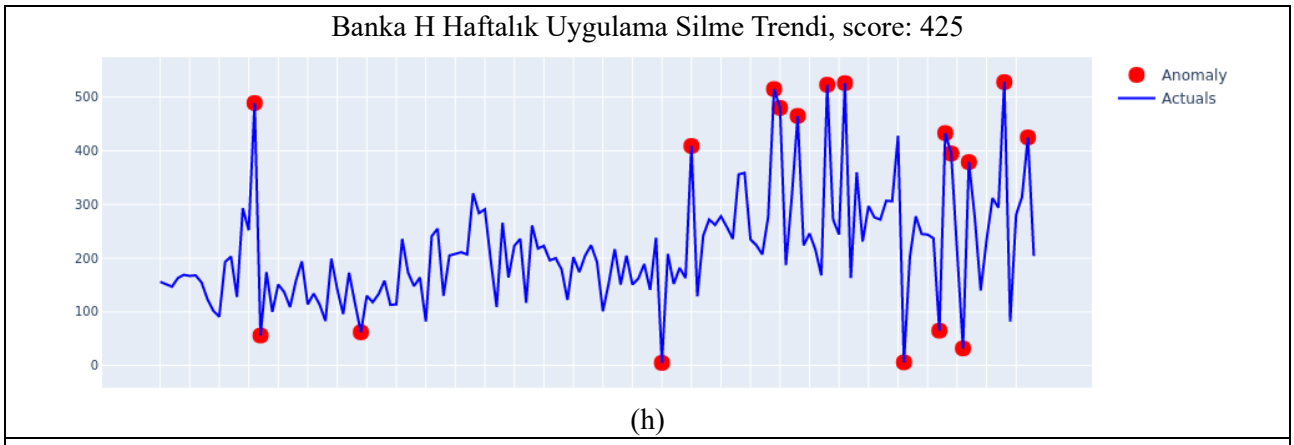


(f)

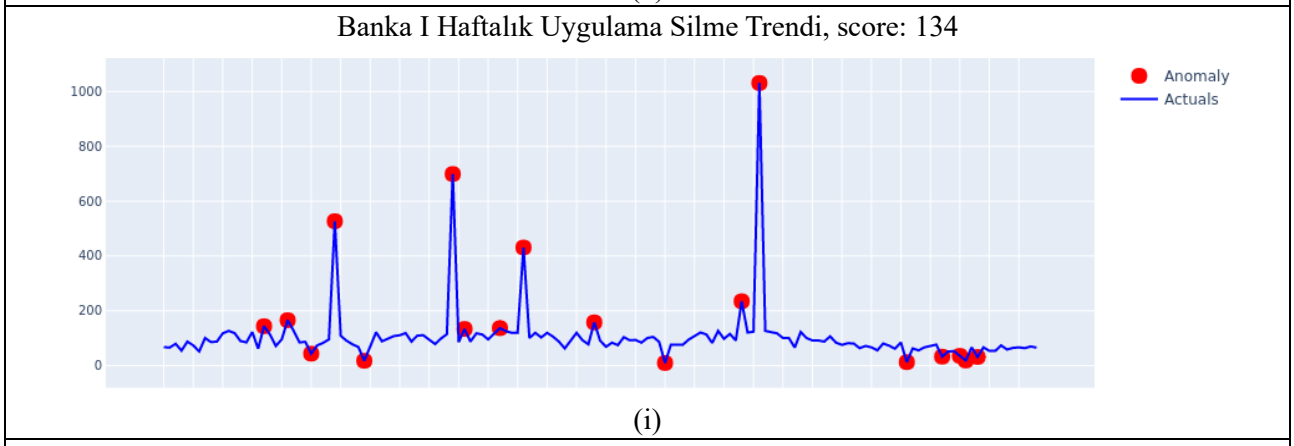


(g)

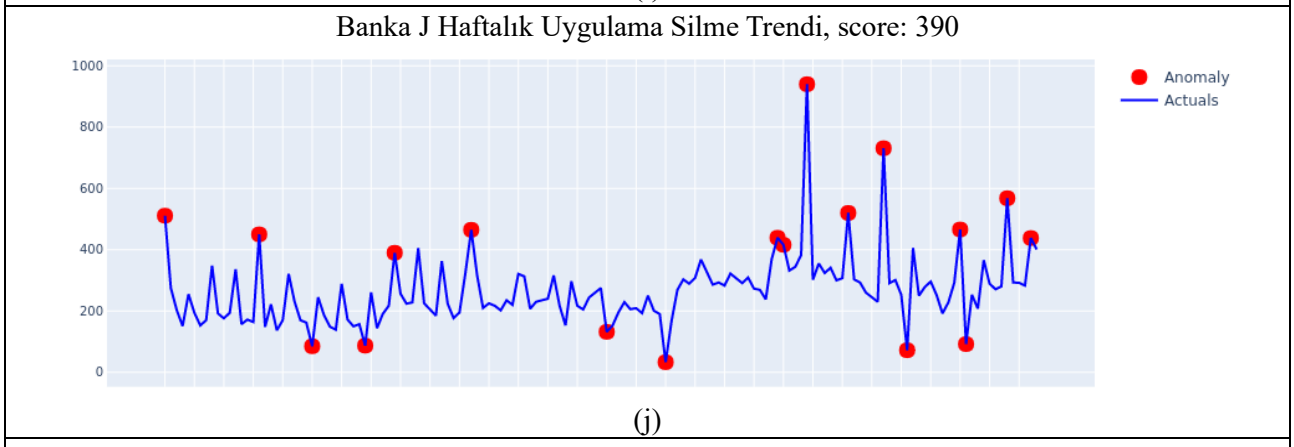
Şekil 4. (devam ediyor)



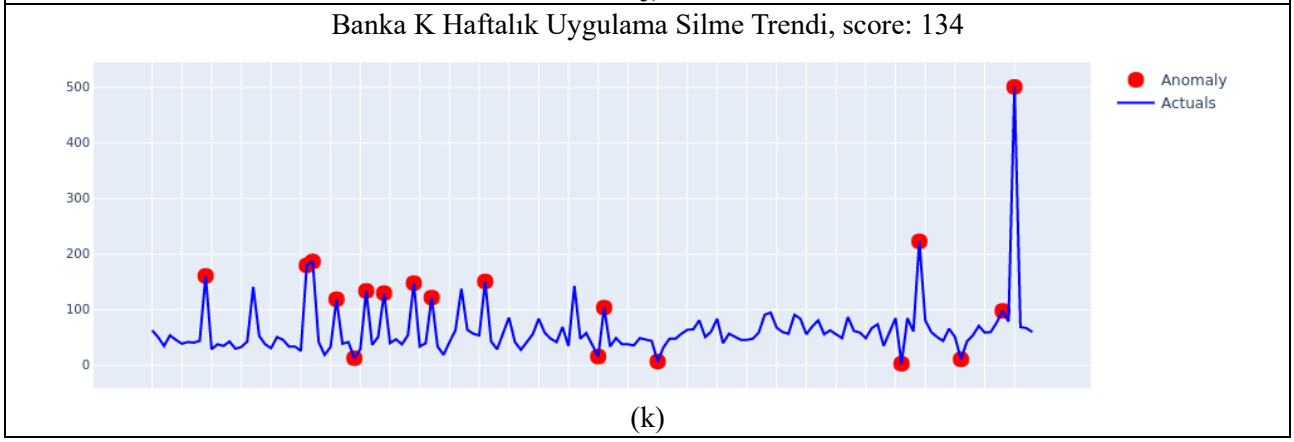
(h)



(i)

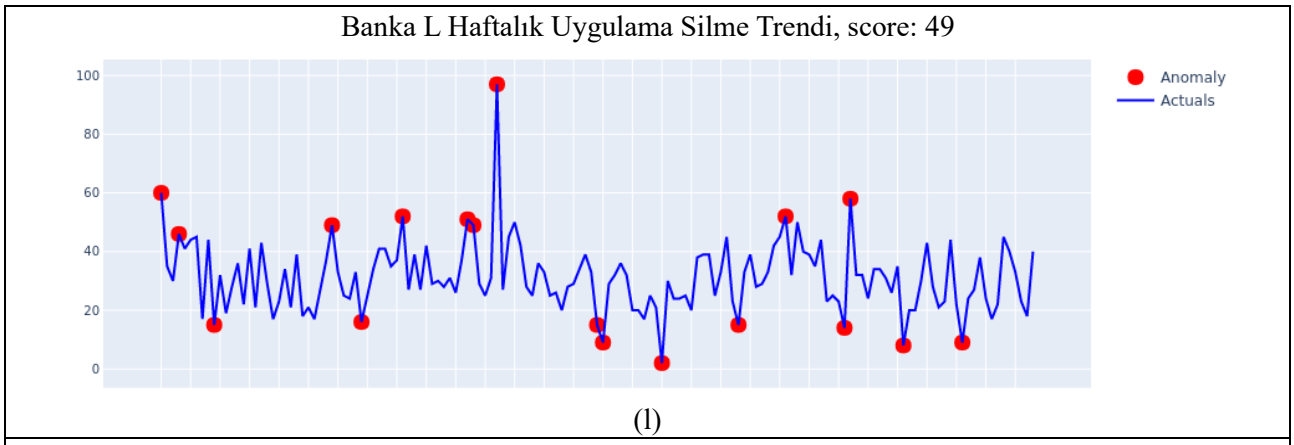


(j)

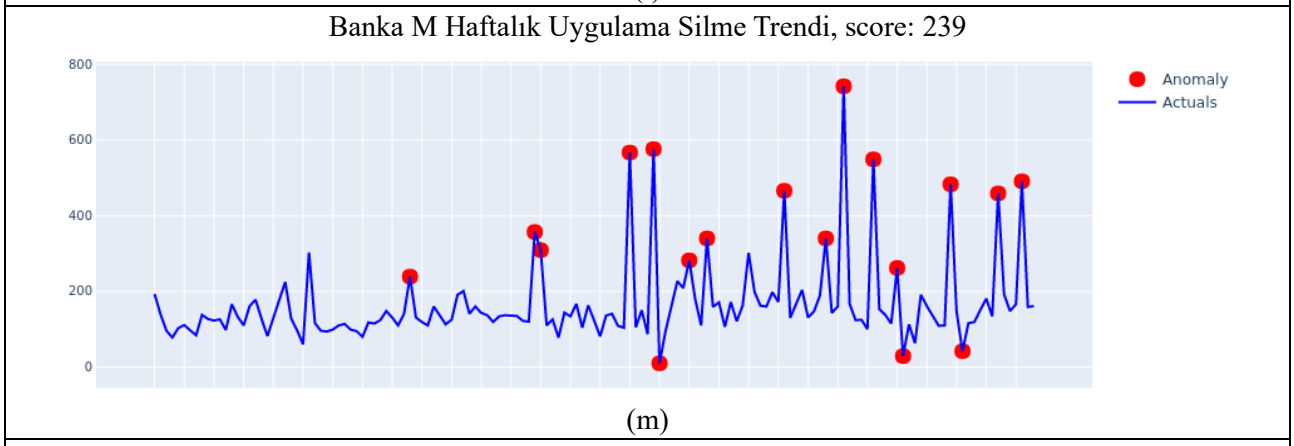


(k)

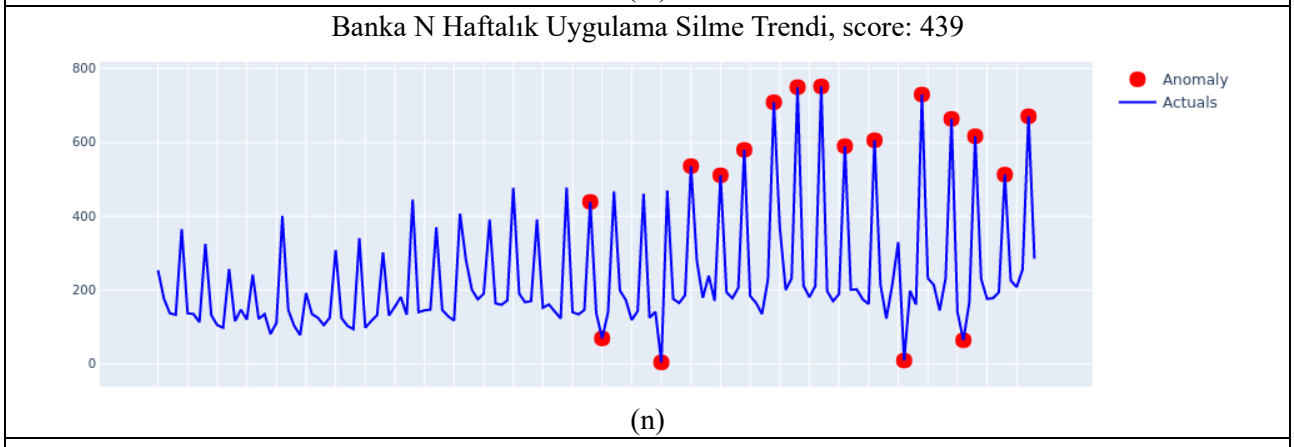
Şekil 4. (devam ediyor)



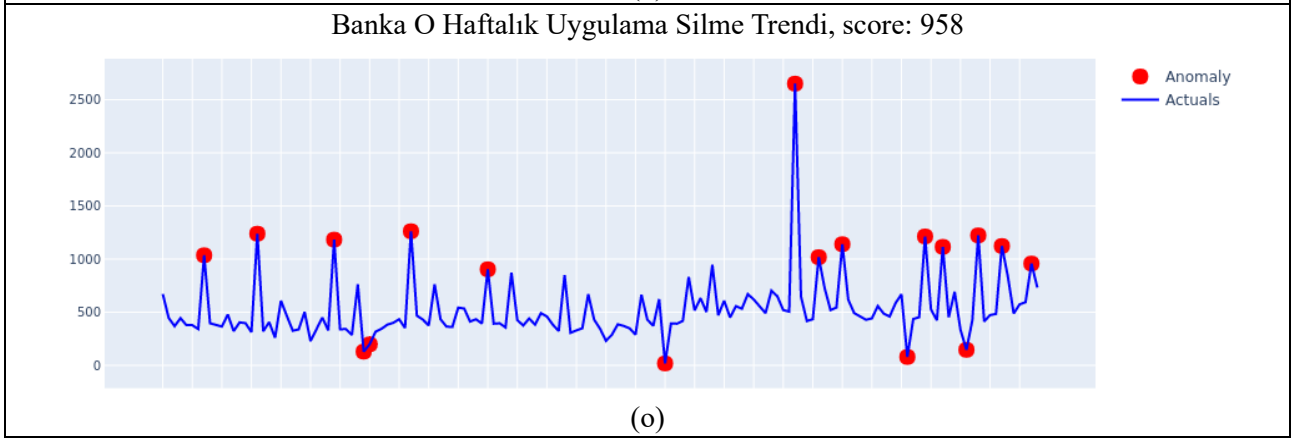
(l)



(m)

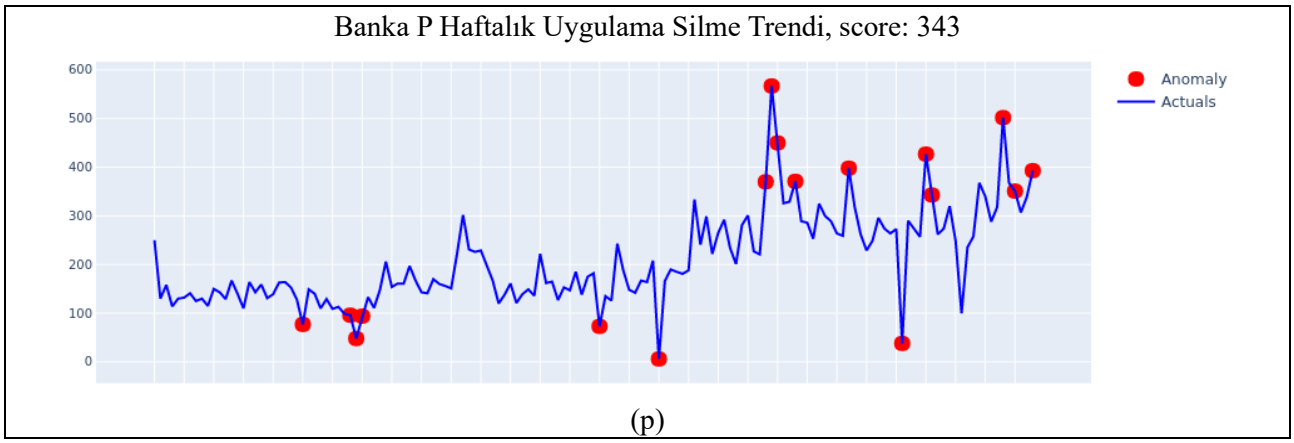


(n)



(o)

Şekil 4. (devam ediyor)



Şekil 4. (devam ediyor)

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Son yıllarda, sistemlerdeki anormal durumları bulmak, endüstriler için hayati bir konu haline gelmiştir. Anormallik tespit sistemleri sayesinde, beklenmedik durumlar ve istisnalar tespit edilebilir ve sorunu çözmek için gerekli adımlar atılabilir. Bu tespitlerin önceden yapılabilmesi sistem verimliliğini ve etkinliğini artırmakta aynı zamanda sistem tasarruf sağlayabilmektedir.

Bu çalışmanın literatüre katkılarından biri, Finansal Teknolojiler firmasında işlem platformuna entegre edilecek otomatik anormallik tespit sisteminin uygulanmasına yönelik ilk girişim olmasıdır. Diğer bir katkı ise, çalışmanın şirketin 18 iş ortağı için bankacılık uygulaması silme verilerini kapsaması ve verilerdeki anormallikleri tespit etmek ve her ortak için anormallik puanı bulmak olmuştur. Ortaklar kapsamında bu anormalliklerin önceden tespit edilmesi ortaklar ile iş birliği kapsamında aksiyon alınabilmesini sağlayabilmiştir. Çalışma kapsamında Python'da otomatik anormallik tespiti oluşturmak için İzolasyon Ormanı algoritmasını kullandık. Bu çalışma sayesinde, 2023'ün son çeyreğinde, firma, bankalar ve müşterilerle hemen iletişime geçerek cihazlardaki bankacılık uygulamalarının silinmesini %50'den fazla engelledi. Bu da gelir kaynağı uygulamalar olan firmanın gelirlerin dramatik düşüşünü önleyebilmiş ve uygulamaların silinme nedenleri iş ortakları ile görüşülmüştür. Aynı zamanda çalışma, firma bünyesinde bir tespit sistemi kurulmasını sağlamıştır.

Daha ileri araştırmalarda, işletme işlem platformunda otomatik çok değişkenli anormallik tespiti geliştirmek için üretim, kalite, satış, şikâyet gibi diğer ilgili veriler de dikkate alınacaktır. Mevcut çalışma kapsamında performansının ve etkinliğinin yüksek olduğu bilinen İzolasyon Ormanı yöntemi kullanılmıştır. Ancak ileriki çalışmalarda, yarı denetimli ve diğer denetimsiz teknikler kullanılabilir ve sonuçlar denetimsiz öğrenme tekniği olan İzolasyon Ormanı ile karşılaştırılabilir. Böylece firma bünyesinde kurulan anomali tespit sisteminin de performansı artırılabilecektir.

REFERANSLAR

[1] Chandola, V., Banerjee, A. & Kumar, V. Anomaly Detection: A Survey. ACM Computing Surveys. 15, 1-72, 2009.

[2] Hodge, V. J., &Austin, J. A Survey of Outlier Detection Methodologies. Artificial Intelligence Review. 13-18, 2004.

[3] Agyemang, M., Barker, K. & Alhajj, R. A comprehensive survey of numeric and symbolic outlier mining techniques. Intelligent Data Analysis. 10, 521-538, 2006.

[4] Markou, M. & Singh, Sameer. Novelty detection: a review-part 1: statistical approaches. Signal Processing. 83, 2481-2497, 2003.

[5] Markou, M. & Singh, Sameer. Novelty detection: a review-part 2: neural network based approaches. Signal Processing. 83, 2499-2521, 2003.

[6] Patcha, A. & Park, J-M. An overview of anomaly detection techniques: Existing solutions and latest technological trends. Computer Networks. 51, 3448-3470, 2007.

[7] Hasan, M., Islam, M., Zarif, I. I., & Hashem, M. M. A. Attack and anomaly detection in IoT sensors in IoT sites using machine learning approaches. Internet of Things, 7, 1-14, 2019.

[8] Huch, F., Golagha, M., Petrovska, A., & Krauss, A. Machine Learning-Based Run-Time Anomaly Detection in Software Systems: An Industrial Evaluation. IEEE Workshop on Machine Learning Techniques for Software Quality Evaluation (MaLTeSQuE). 13-18, 2018.

[9] Pacheco, J. & Hariri, S. Anomaly behavior analysis for IoT sensors, 2016.

[10] Görnitz, N. & Kloft, M. Toward Supervised Anomaly Detection. Journal of Artificial Intelligence Research. 46, 235-262, 2013.

[11] Song, H., Jiang, Z., Men, A. & Yang, B. A hybrid semi-supervised anomaly detection model for high dimensional data. Computational Intelligence and Neuroscience. 1-9, 2017.

[12] Khan, S., Liew, C. F., Yairi, T. & McWilliam, R. Unsupervised anomaly detection in unmanned aerial vehicles. Applied Soft Computing Journal. 83, 1-15, 2019.

[13] Goldstein, M. & Uchida, S. A comparative evaluation of unsupervised anomaly detection algorithms for multivariate data. Plos one. 1-31, 2016.

[14] Savran, M. F. & Müngen, A. A. Sunucuların Anomali Durumlarinin Yapay Zeka Metotları ile Tahmin Edilmesi. Journal of Computer Science. 8 (2), 57-65, 2023.

[15] Ekici, B. & Takcı, H. Bilgisayar Ağlarında Anomali Tespiti Yaklaşımı ile Saldırı Tespiti. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi. 22, 1016-1027, 2022.

[16] Yarat, S. & Orman, Z. Elektrik Güç Dağıtımında Akıllı Sayaç Verileri için Anomali Tespiti ve Tahminleme. Bilgisayar Bilimleri ve Teknolojileri Dergisi. 3 (2), 72-85, 2023.

[17] Gökdemir, A. & Çalhan, A. Deep learning and machine learning based anomaly detection in internet of things environments. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 37 (4), 1945-1956, 2022.

Akdeniz Mühendislik Dergisi
Akdeniz Journal of Engineering
(AKUJE)
2024, 2(1), pp. 24-34
Araştırma Makalesi Research Article

GÜNLÜK YAŞAM ALANLARINDAKİ YÜKSEK FREKANSLI ELEKTROMANYETİK ALANLARIN İNCELENMESİ VE MARUZİYET ANALİZİ

INVESTIGATIOIN OF HIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS IN DAILY LIVING AREAS AND EXPOSURE ANALYSIS

Eda YAVUZ DİRİK[*1] **Kayhan ATEŞ**[2,4] **Niyazi İL**[3] **Şükrü ÖZEN**[4]

[1] Kastamonu Valiliği, Kastamonu, Türkiye
[2] Telecommunications and Remote Sensing Laboratory, Department of Electrical, Computer and Biomedical Engineering, University of Pavia, Pavia, Italy
[3] TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Antalya Şubesi, Antalya, Türkiye
[4] Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye

ABSTRACT

As the use of electronic devices increases nowadays, studies on electromagnetic fields (EMF) and their potential effects have gained momentum. In this study, the electromagnetic environment has been investigated concerning the high-frequency region for daily living areas. Accordingly, the specific absorption rates (SAR) induced in biological tissues by electrical devices used in homes and offices were determined at different distances, and measurements were carried out for high-frequency fields. Electromagnetic simulations were performed using the CST Studio Suite program, which operates based on the finite integration technique (FIT). Exposure analysis was conducted using an anatomical voxel family with realistic electrical properties. As a result of the calculations, the highest SAR value was obtained as 0.198 W/kg in the eye bulb and lens of the child model. According to the measurement results, the highest electric field value was measured as 13.55 V/m in the microwave oven. Results were evaluated in light of international standards, and possible precautions to protect against these fields were proposed.

Keywords: Electromagnetic Dosimetry, Electromagnetic Field Exposure, Measurement and Simulation, Model Analysis, Specific Absorption Rate (SAR)

ÖZET

Günümüzde giderek artan elektronik cihazların kullanımına paralel olarak, elektromanyetik alanlara (EMA) ve bunların potansiyel etkilerine dair yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Bu çalışmada elektromanyetik çevre, günlük yaşam alanları için yüksek frekans bölgesine göre incelenmiştir. Bu doğrultuda, ev ve ofislerde kullanılan elektrikli cihazların farklı mesafelerde biyolojik dokularda indüklediği özgül soğurma oranları (ÖSO) belirlenmiş ve yüksek frekanslı alanlar için ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik benzetimler, sonlu integrasyon tekniği (SİT) temelli çalışan CST Studio Suite programıyla yapılmıştır. Maruziyet analizi ise gerçekçi elektriksel özelliklerle anatomik voksel ailesi kullanılarak yapılmıştır. Hesaplamalar sonucunda en yüksek ÖSO değeri çocuk (7 yaş, kadın) modelindeki göz ampülü ve göz lensinde 0,198 W/kg olarak elde edilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre en yüksek elektrik alan değeri, 13,55 V/m ile mikrodalga fırında ölçülmüştür. Sonuçlar, uluslararası standartlar ışığında değerlendirilmiştir ve söz konusu alanlardan korunmak için olası önlemler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Alan Maruziyeti, Elektromanyetik Dozimetri, Model Analizi, Özgül Soğurma Oranı (ÖSO), Ölçüm ve Benzetim

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: edda_yavvuz@hotmail.com

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayım Tarihi
15.05.2024	27.06.2024	27.06.2024	30.06.2024

1. GİRİŞ

Günlük hayatta elektrik enerjisinin kullanımının artması, bireysel ve çevresel kaynaklardan yayılan elektromanyetik alanların oluşmasına ve etkilerinin incelenmesine sebep olmaktadır [1, 2]. Söz konusu alanlara kontrolsüz bir şekilde maruziyet, araştırmacılar tarafından ele alınan konulardan birisidir [3]. Özellikle Covid-19 pandemisinden sonra hücresel haberleşme frekanslarında çalışan cihazların çocuklar ve gençler tarafından kullanımı artmıştır [4]. Bu yüzden geçmiş yıllarda gerçekleştirilen elektromanyetik maruziyet çalışmalarının güncellenmesi ve yeni nesil sistemler için tekrar ele alınması büyük öneme sahiptir.

Elektromanyetik alanların literatürde farklı kullanım alanları olmasına rağmen istenmeyen etkilerinden korunmak için uluslararası standartlar yayınlanmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'nün de (DSÖ) belirttiği Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP) ve Elektrik ve Elektronik Mühendisler Enstitüsü'nün (IEEE) uluslararası standartları bulunmaktadır [5, 6]. Uluslararası standartlar, insanları aşırı maruziyetten korumak için sınır değerleri belirlemekte ve bu sınırların gerekçelerini sunmaktadır. Yüksek frekans bölgesi için bu standartlarda, dokuda indüklenen özgül soğurma oranı (ÖSO) limit değerleri belirtilmektedir. Genel halkın maruziyeti için ÖSO sınırı hem ICNIRP hem de IEEE tarafından 2 W/kg olarak belirlenmiştir. Maruziyet limitlerinin belirlenmesinde kaynak frekansı ve etkileşim senaryosu (bölgesel veya tüm vücut maruziyeti) önemlidir. IEEE, ortalama doku modelindeki ÖSO'nun hesaplanmasına yönelik bir rehber sunmaktadır ve bölgesel maruziyet için 10 gr dokudaki ÖSO'yu incelemektedir.

Yüksek frekanslı elektromanyetik maruziyet ve etkileriyle ilgili olarak literatürde son yıllarda yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Güneş vd. tarafından 2021 yılında yapılan çalışma, elektromanyetik radyasyonun farklı frekanslardaki (900 MHz, 1800 MHz ve 2100 MHz) genotoksik etkilerini *Drosophila melanogaster* üzerinde incelemektedir [7]. Araştırma, cep telefonları ve baz istasyonları gibi cihazlar tarafından yayılan radyasyonun çevre ve insan sağlığı üzerindeki ciddi endişeleri belirtmektedir. *Drosophila melanogaster*, genetik toksikoloji çalışmalarında yaygın olarak kullanılan bir model organizmadır, çünkü genomu insan hastalıklarında tanımlanan genlere oldukça benzerdir. Çalışma boyunca, *Drosophila* larvaları günlük iki, dört ve altı saatlik maruziyet sürelerinde iki gün boyunca elektromanyetik alanlara maruz bırakılmıştır ve bunun sonucunda genel klon parametreleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, 1800 MHz'de altı saatlik uygulama dışında mutant klon sayısının negatif kontrol grubuna göre istatistiksel olarak arttığı gözlemlenmiştir. 2019 yılında Özen ve arkadaşlarının yaptığı başka bir çalışmada ise, elektromanyetik dalgaların endüstriyel mikrodalga kaynaklarından yayılan etkileri incelenmiştir [8]. Araştırma, elektromanyetik dalgaların dokularda oluşturduğu ÖSO değerlerini analiz etmektedir. Çalışmada, çok katmanlı doku modeli kullanılarak 915 MHz ve 2450 MHz frekansları için elektrik alanın doku içindeki değişimi incelenmiştir. Analitik çözümlerden elde edilen verilere göre, deri dokusuna nüfuz eden elektrik alanın 2450 MHz frekansında daha hızlı arttığı gözlemlenmiştir. Pennes biyoısı denklemi kullanılarak dokuda meydana gelen sıcaklık artışının hesaplanması da araştırmanın odak noktalarından birisidir. Özellikle deri dokusunda indüklenen güç yoğunluğu ve ÖSO üzerinde detaylı analizler yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları, endüstriyel mikrodalga kaynaklarına maruz kalan çalışanların elektromanyetik risklerinin değerlendirilmesinde önemlidir. Elektromanyetik dalgalara maruziyetin insan sağlığı üzerindeki etkilerini anlamak ve bu etkilere karşı korunma önlemleri geliştirmek için yapılan bu tür analizler, endüstriyel güvenlik standartlarının belirlenmesinde ve çalışanların sağlığının korunmasında kritik bir rol oynamaktadır. 2019'da yapılan diğer bir çalışma, kablosuz haberleşme sistemlerinin insan vücut modelleri üzerindeki etkilerini araştırmaktadır [9]. Çalışma, özellikle metalik ortopedik implantların vücutta bulunduğu durumda elektromanyetik alanlara maruziyetin nasıl değiştiğini incelemektedir. Buna göre, insan vücudunun elektriksel özellikleri dikkate alınarak bir model oluşturulmuş ve dokuda indüklenen ÖSO incelenmiştir. Benzetimler sırasında 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz frekansları için ICNIRP tarafından belirlenen elektromanyetik ışıma limitleri göz önünde bulundurulmuştur. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre, implantlı kolda ÖSO değerlerinin 1800 MHz ve 2450 MHz frekanslarında implantlı olmayan modele göre arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, frekansın azalmasıyla ÖSO farkının da azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, metalik ortopedik implantların elektromanyetik alanlara maruziyet üzerindeki etkilerini anlamak açısından önemli bir bulgu olarak değerlendirilebilir. 2022 yılında Abdul-Al ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, elektromanyetik alanların biyolojik

ortamdaki davranışı ele alınmıştır [10]. Bunun yanında, 1978 ile 2021 yılları arasında ÖSO'yu değerlendirmede kullanılan en yaygın teknikler de frekans spektrumu, bant genişliği ve ÖSO değerleri bakımından özetlenmiştir. Elektromanyetik alanların, indüklenen akımlar ve dielektrik kayıplardan kaynaklanan ısı üretimi sonucunda biyolojik ortamla etkileşimi açıklanmıştır. Makalede, modelleme ve ölçümler bakımından daha önce yayınlanmış araştırmaların detaylı incelemesi ve çeşitli güvenlik standartlarına dayanarak elektromanyetik maruziyet tehlikeleri ele alınmıştır. 2018 yılında yapılan farklı bir araştırmada ise, kablosuz vücut alanı ağı uygulamaları için ISM bandının 5,8 GHz frekansında çalışan bir yama anten, farklı senaryolardaki kafa modellerinde oluşturduğu dozimetrik etkileri açısından incelenmiştir [11]. Tasarlanan anten, küresel şekilli insan kafası fantomunda 0,206 W/kg ile en yüksek ÖSO'ya sebep olmuşken, kübik şekilli insan kafası fantomunda ise 0,166 W/Kg ile en düşük ÖSO indüklemiştir. Kübik fantomlu senaryoda 6,46 dBi, küresel fantomlu senaryoda ise 6,2 dBi kazanç elde edilmiştir. 2017 yılında yapılan farklı bir çalışmada, insan kafa modelinin GSM-850 frekans bandında cep telefonu kullanımına göre dozimetri analizi araştırılmıştır [12]. Biyolojik dokular tarafından soğrulan enerji miktarını gösteren ÖSO, doku özellikleri ve frekans gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Yapılan çalışma, gerçekçi doku özelliklerine sahip çok katmanlı bir küre kafa modelini ele alan sonlu elemanlar yöntemine dayalı benzetimler içermektedir. Sonuçlara göre deri ve beyin omurilik sıvısında en yüksek ÖSO hesaplanmıştır. Ayrıca kafa modelinde belirgin bir sıcaklık artışı da gözlemlenmiştir. Çalışma, özellikle kafadaki hassas bölgelerde indüklenen elektromanyetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkilerini araştırmanın önemini vurgulamaktadır.

Literatüre bakıldığında, elektromanyetik alanlara maruziyet ile ilgili farklı frekans bölgelerinde çalışmalar bulunmaktadır [13-19]. Ancak, gelişen teknoloji ile ev ve işyerlerinde artan cihaz yoğunluğuna bağlı yüksek frekans bölgesindeki elektromanyetik alan (EMA) kaynaklarını inceleyen ve bu kaynaklara maruz kalan kadın, çocuk, hamileler ve çalışanlara ilişkin elektromanyetik (EM) risk analizini birlikte ele alan kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca, literatürdeki çalışmaların Covid-19 pandemisi sonrası dönem için yeni nesil teknolojik cihazların elektromanyetik risk analizi açısından güncellenmesi önemlidir. Bu çalışmada; günlük yaşam alanlarımızı çevreleyen çeşitli elektronik cihazların ve bunların yakın çevresinde oluşturdukları EMA seviyeleri belirlenerek yüksek frekans bölgesi için güncel veriler birlikte ele alınmış; çocuk, kadın, hamile ve çalışanlar için EMA dozimetri analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, farklı anatomik modellerde indüklenen ÖSO; yaş gruplarına, doku özelliklerine, etkileşim durumundaki cihazın çalışma frekansına ve uzaklık gibi parametrelere bağlı olarak analiz edilerek sunulmuştur. Çalışma şu şekilde planlanmıştır: Öncelikle bu çalışmanın temel aldığı yöntem ve teorik bilgi açıklanmıştır. Ardından, elde edilen deneysel ölçüm sonuçları ve elektromanyetik dozimetri benzetimleri belirtilmiştir. Son olarak, uluslararası standartlar ışığında ölçüm ve benzetim sonuçları değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Elektromanyetik Dalgaların Biyolojik Dokularla Etkileşimi ve Elektromanyetik Benzetim Modeli

Elektronik cihazların kullanımı sırasında, biyolojik dokular EMA'nın bir kısmını emer. Bu emilen enerji nedeniyle dokuda indüklenen elektrik alan ve ÖSO, Maxwell denklemleri yardımıyla belirlenebilir. Bu çalışmada, farklı cihazlar tarafından yüksek frekans bölgesindeki elektromanyetik alanlara maruz kalan voksel ailesi üyelerinin 10 gr ortalama dokularındaki ÖSO dağılımı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar için CST Studio Suite yazılımı altındaki zaman düzlemi çözücüsü kullanılmıştır. CST Studio Suite altındaki zaman düzlemi çözücüsü, Maxwell denklemlerinin integral formunu kullanan sonlu integrasyon tekniğine (SİT) göre benzetimleri gerçekleştirmektedir [20, 21]. Çalışmadaki problem uzayı, CST Studio Suite programında "open-add space" olarak adlandırılan sınır koşulları için tanımlanmıştır [22]. Benzetimlerde, voksel tabanlı gerçekçi anatomik modeller kullanılmıştır.

EMA'nın doku tarafından soğurulması, EMA parametrelerine ek olarak dokuların dielektrik özelliklerine de bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan dokuların dielektrik özellikleri literatürden alınmıştır [23].

Biyolojik dokuyla yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar etkileşime girdiğinde, dalga enerjisi doku tarafından emilir [24]. Bu emilim süreci, ÖSO olarak adlandırılan bir parametre ile karakterize edilir.

ÖSO, elektromanyetik dalga enerjisinin birim kütleye düşen miktarını ifade eder ve aşağıdaki denklemle tanımlanır:

$$ÖSO = \frac{\sigma}{\rho}|\boldsymbol{E}|^2 \quad (1)$$

denklemde |**E**| dokuda indüklenen elektrik alanın büyüklüğünü (V/m), σ dokunun elektriksel iletkenliğini (S/m) ve ρ ise dokunun kütle yoğunluğunu (kg/m^3) ifade eder.

Doku içindeki elektrik alanın genliğinin yüzeydeki asıl değerinin %37'sine (yaklaşık olarak $1/e$) düştüğü noktaya "deri kalınlığı" denir [22]. Bu kalınlık, elektromanyetik dalganın dokudaki davranışı açısından önemlidir ve aşağıdaki şekilde incelenir:

$$\delta = \left(\frac{67.52}{f}\right)\left[\sqrt{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2} - \varepsilon'\right]^{-1/2} \quad (2)$$

bu denklemde f, frekansın MHz cinsinden değeridir. ε' ve ε'' ise sırasıyla karmaşık dielektrik sabitinin gerçek ve sanal kısımlarıdır.

İncelenecek elektromanyetik maruziyet modeli için, literatürde belirtildiği üzere [25, 26] aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır: Problem senaryosu üç boyutlu olarak modellenmiştir ve biyolojik dokular doğrudan elektromanyetik dalgalar tarafından etkilenmiştir. Ayrıca, dokuların dielektrik özellikleri homojen olarak kabul edilmiştir. Bu varsayımlar, elektromanyetik maruziyet modelinin oluşturulması ve sonuçların elde edilmesinde kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Elektromanyetik Alan Ölçümleri

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen elektrik alan ölçümleri ICNIRP'nin belirlemiş olduğu 6 dakikalık maruziyet senaryosu referans alınarak 3 cm, 30 cm ve 1 m olmak üzere farklı mesafelerde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Narda Broadband Field Meter NBM-550 marka cihaz ve uygun prob ile yapılmıştır.

Söz konusu ölçüm sonuçları, Tablo 1'de ortalama değer olarak sunulmuştur. Boş ortamın elektrik alan değeri 0,02 V/m olarak kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçları arasından en yüksek elektrik alan değeri 3 cm uzaklıkta mikro dalga fırın cihazından 13,55 V/m, en düşük elektrik alan değeri ise 1 m uzaklıkta cep telefonundan 0,05 V/m olarak kaydedilmiştir. Tablet ve cep telefonunda sırasıyla 3 cm için 1,32 V/m ve 0,12 V/m ölçülmüştür. Aynı cihazların 30 cm için ölçüm sonuçları sırasıyla 0,32 V /m ve 0,35 V/m'dir. Modemin yaymış olduğu elektrik alan ise 3 cm uzaklıkta 1,6 V/m, 30 cm uzaklıkta 0,48 V/m ve 1 m uzaklıkta ise 0,28 V/m'dir.

Tablo 1. Yüksek frekansta ışıma yapan cihazların çeşitli uzaklıklardaki elektrik alan ölçüm sonuçları (V/m)

Elektrikli Cihaz	3 cm Uzaklık	30 cm Uzaklık	1 m Uzaklık
Boş Ortam	0,02	0,02	0,02
Mikrodalga Fırın	13,55	11,73	2,24
Masaüstü Bilgisayar	0,86	0,35	0,17
Tablet	1,32	0,32	0,12
Modem	1,6	0,48	0,28
Cep Telefonu	0,12	0,07	0,05
Laptop	0,73	0,35	0,28

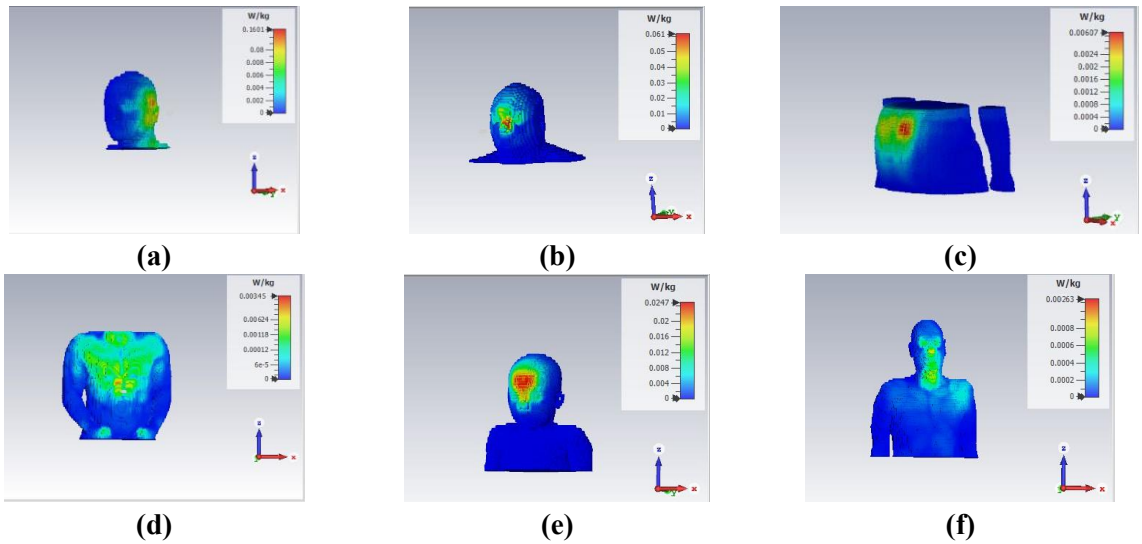
3.2. Yüksek Frekans Bölgesi EMA Maruziyet Analizleri

Maruziyet analizleri kapsamında gerçekleştirilen iyonize olmayan dozimetri benzetimleri, CST Studio Suite ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, farklı cinsiyet ve yaşlardaki anatomik voksel modellerde elektromanyetik kaynakların dokuda indüklediği elektrik alan ve ÖSO hesaplanmıştır. Anatomik model olarak CST Studio Suite kütüphanesindeki çocuk, hamile kadın, yetişkin kadın, yetişkin erkek ve fetüs

modelleri incelenmiştir [20]. Modellerdeki biyolojik dokuların dielektrik özellikleri ise, daha önceki bölümlerde açıklandığı şekilde literatürdeki gerçekçi değerlere göre referans alınmıştır. Elektromanyetik kaynak olarak 0,5 W güç ile beslenen ve cep telefonu için 1800 MHz, tablet için 2400 MHz ve mikrodalga fırın için 2450 MHz'de ışıma yapan elektromanyetik dalga kaynakları kullanılmıştır ve anatomik modellere belirli uzaklıklarda konumlandırılarak benzetimler gerçekleştirilmiştir. Benzetimler esnasında elektromanyetik kaynakların anatomik voksellerden uzaklığı, günlük hayattaki cihazların kullanımına göre ele alınmıştır.

Benzetimler sonucunda, 10 gr ortalama doku için ÖSO dağılımları elde edilmiştir. Benzetim sonuçları Şekil 1'de sunulmuştur. Şekil 1.a'da kadın (40 yaş) modelinden 1 cm uzaklıkta 1800 MHz'de ışıma yapan kaynak sonucu oluşan ÖSO dağılımı gösterilmiştir. Burada, en yüksek olarak 0,16 W/kg hesaplanmıştır. Şekil 1.b'de ise ortalama erkek yetişkin modelinin yüz bölgesinden 3 cm uzaklıktaki 1800 MHz'deki ÖSO dağılımı sunulmuştur ve en yüksek değer olarak yüz bölgesinin orta kısmında yaklaşık 0,06 W/kg elde edilmiştir. Şekil 1.c'de ise kadın (43 yaş, 24 haftalık hamile) modelinden 30 cm uzaklıktaki ÖSO dağılımı sunulmuştur. Burada, 2400 MHz'deki en yüksek ÖSO 6 mW/kg olarak elde edilmiştir. Şekil 1.d'de 2400 MHz'deki ÖSO dağılımı erkek (38 yaş, şişman) modeli için 30 cm uzaklıkta en fazla 0,03 mW/kg olarak gözlenmiştir. Şekil 1.e'de gösterildiği üzere çocuk (7 yaş, kadın) modelinden 3 cm uzaklıkta ÖSO dağılımı yaklaşık 0,02 W/kg olarak hesaplanmıştır. Şekil 1.f'de erkek (38 yaş) modelinden 1 m uzaklıkta ÖSO dağılımı, 2450 MHz için en fazla 3 mW/kg olarak elde edilmiştir.

Anatomik modellerin farklı frekanslardaki konuma bağlı ÖSO değerleri Tablo 2'de verilmiştir. ÖSO; yaş gruplarına, doku özelliklerine, etkileşim durumundaki cihazın çalışma frekansına ve konuma göre değişkenlik göstermiştir. Ayrıca ÖSO değerlerinin ICNIRP'nin belirlemiş olduğu sınır değerlerin altında olduğu görülmüştür. Aynı modelde ve ilgilenilen bölgede uzaklıklar sabit tutulduğunda frekans arttıkça ÖSO değeri için doğrusal bir yorum yapılamamıştır. Çocuk (7 yaş, kadın) modelinin göz bölgesinde kaynakla model arası uzaklık 30 cm iken frekans arttıkça ÖSO değerinin arttığı belirlenmiştir. Kulak bölgesinde ise aynı senaryoda azalma gözlenmiştir. Farklı modellerin aynı bölgelerinde indüklenen ÖSO, aynı frekans ve elektromanyetik kaynak uzaklığı için değişkenlik göstermektedir. En yüksek ÖSO, bebek (8 haftalık, kadın) modelinden 1 cm uzaklıkta 1800 MHz frekansta kulak bölgesinde 0,182 W/kg olarak elde edilmiştir. En düşük ÖSO ise 2400 MHz'de ortalama erkek yetişkin modelinin kulak bölgesinde 1 m uzaklıkta 0,0012 W/kg olarak hesaplanmıştır.



Şekil 1. (a) 1800 MHz frekansında kadın (40 yaş) modelinden 1 cm uzaklıktaki ÖSO dağılımı; **(b)** 1800 MHz frekansında ortalama erkek yetişkin modelinden 3 cm uzaklıktaki ÖSO dağılımı; **(c)** 2400 MHz frekansında kadın (43 yaş, 24 haftalık hamile) modelinden 30 cm uzaklıktaki ÖSO dağılımı; **(d)** 2400 MHz frekansında erkek (38 yaş, şişman) modelinden 30 cm uzaklıktaki ÖSO dağılımı; **(e)** 2450 MHz frekansında çocuk (7 yaş, kadın) modelinden 3 cm uzaklıktaki ÖSO dağılımı; **(f)** 2450 MHz frekansında erkek (38 yaş) modelinden 1 m uzaklıktaki ÖSO dağılımı

Tablo 2. Model-konum ilişkisine göre farklı frekanslardaki ÖSO değerleri (W/kg)

Model-Konum	1800 MHz			2400 MHz			2450 MHz	
	1 cm	3 cm	30 cm	3 cm	30 cm	1 m	30 cm	1 m
Bebek (8 haftalık, kadın) - Kulak	0,182	-	-	-	0,0558	-	-	-
Çocuk (7 yaş, kadın) - Kulak	0,174	-	-	-	0,0495	0,00213	0,00502	-
Çocuk (7 yaş, kadın) - El	-	-	-	-	0,0214	-	-	-
Çocuk (7 yaş, kadın) - Göz	-	-	0,0075	0,113	0,0131	0,00159	0,0247	-
Çocuk (7 yaş, kadın) - Kalp	0,168	0,065	-	-	-	-	0,0232	0,003
Kadın (40 yaş) - Kulak	0,16	-	-	-	-	-	-	-
Kadın (26 yaş, şişman) - Kalp	-	-	-	-	0,00426	-	-	-
Kadın (26 yaş, şişman) - Gövde	-	-	0,004	-	-	0,00137	-	-
Erkek (38 yaş) - Göz	-	0,051	-	-	-	0,00198	.	0,0026
Erkek (38 yaş, şişman) - Kalp	-	-	0,0035	-	-	-	-	-
Kadın (43 yaş, 24 haftalık hamile) - Gövde	-	-	-	-	0,00607	-	0,00877	-
Kadın (43 yaş, zayıf) - Göz	-	0,062	-	0,072	-	0,00199	-	0,0028
Ortalama Erkek Yetişkin - Kulak	0,159	0,042	0,005	0,069	0,00871	0,0012	-	-
Ortalama Erkek Yetişkin - Göz	-	0,061	0,006	0,0652	0,00607	-	-	-
Ortalama Erkek Yetişkin - Kalp	-	0,041	0,003	-	0,00455	0,0014	-	0,0022

Tablo 3'te, ortalama erkek yetişkin ve çocuk (7 yaş, kadın) modellerinin kafa bölgesinde 1800 MHz ve 2400 MHz frekanslarında farklı uzaklıklardaki ve dokulardaki ÖSO benzetim sonuçları sunulmuştur. Burada, yetişkin erkek model ile çocuk (7 yaş, kadın) modelindeki aynı doku ve frekanslarda ÖSO dağılımı karşılaştırılmıştır. Her modelde ve ilgilenilen dokuda, elektromanyetik kaynaktan uzaklaştıkça ÖSO değerinin düştüğü gözlenmiştir. Frekansa bağlı doğrusal bir yorum yapılamamıştır. En yüksek ÖSO, yetişkin erkek modelindeki beyincik dokusunda 2400 MHz frekansında 1 cm kaynak uzaklığında elde edilmiştir ve yaklaşık 0,977 W/kg olarak hesaplanmıştır. En düşük ÖSO ise yine aynı model ve dokuda kaynaktan 30 cm uzaklıkta 1800 MHz'de 2,5 mW/kg olarak hesaplanmıştır. Sonuçların ICNIRP'nin belirlemiş olduğu sınır değerlerinin altında olduğu görülmüştür.

Tablo 4, fetüs modelindeki farklı dokularda indüklenen 2400 MHz'deki ÖSO benzetim sonuçlarını göstermektedir. Burada, Şekil 1.c'de belirtilen hamile modelin fetüse farklı uzaklıklarda tablet kullandığı senaryoya göre benzetimler gerçekleştirilmiştir. Dokuda indüklenen ÖSO uzaklığa, dokuların elektriksel iletkenliğine ve doku tarafından soğurulan EMA'nın frekansında bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. En yüksek ÖSO değeri, uzuv-bacak bölgesinde 0,0375 W/kg olarak hesaplanmıştır. En düşük olarak 1 m uzaklıkta göz modelinde yaklaşık 0,021 mW/kg olarak elde edilmiştir. Tablo 4'te belirtilen değerlerin, ICNIRP'nin belirlemiş olduğu limitlerin altında olduğu görülmüştür. Hamile kadınların karın bölgesinin yüksek su içermesi nedeniyle, fetüs dokularının da dielektrik özellikleri

yetişkinlere göre değişkenlik göstermektedir [27]. Bu kapsamda fetüslerde yetişkinlere kıyasla aynı dokularda farklı ÖSO hesaplanmıştır.

Tablo 3. Ortalama erkek yetişkin ve çocuk (7 yaş, kadın) modelinde farklı frekanslardaki dokuların uzaklığa göre ÖSO benzetim sonuçları (W/kg)

Maruziyet Modeli			**Kan**	**Beyin**	**Göz Ampulü**	**Göz Lensi**	**Beyincik**	**Deri**
Ortalama Erkek Yetişkin	**1 cm**	**1800 MHz**	0,148	0,151	0,158	0,157	0,078	0,155
		2400 MHz	0,155	0,167	0,171	0,171	0,977	0,168
	3 cm	**1800 MHz**	0,0574	0,0581	0,0617	0,0619	0,0348	0,0585
		2400 MHz	0,0401	0,0407	0,069	0,069	0,0183	0,0421
	30 cm	**1800 MHz**	0,00488	0,00495	0,00512	0,00517	0,00251	0,00503
		2400 MHz	0,00554	0,00648	0,00870	0,0869	0,00416	0,00815
Çocuk (7 yaş, kadın)	**1 cm**	**1800 MHz**	0,165	0,171	0,172	0,174	0,098	0,171
		2400 MHz	0,169	0,176	0,198	0,198	0,12	0,187
	3 cm	**1800 MHz**	0,0581	0,0593	0,0664	0,0666	0,0367	0,0611
		2400 MHz	0,081	0,085	0,113	0,114	0,0503	0,092
	30 cm	**1800 MHz**	0,00496	0,0051	0,00744	0,00745	0,00301	0,00535
		2400 MHz	0,0391	0,0399	0,0502	0,0502	0,0216	0,0409

Tablo 4. Fetüs modelindeki farklı dokuların 2400 MHz'de uzaklığa göre ÖSO benzetimleri (W/kg)

Doku	**3 cm**	**30 cm**	**1 m**
Kafatası	0,0294	0,00120	0,00041
Deri	0,035	0,00135	0,00055
Gövde	0,0289	0,00117	0,00039
Uzuv-Kol	0,036	0,00135	0,00053
Uzuv-Bacak	0,0375	0,00140	0,00056
Beyin	0,0225	0,00097	0,000035
Göz	0,0157	0,00081	0,000021
Akciğer	0,0331	0,00130	0,00049
Kalp	0,0299	0,00129	0,00043
Karaciğer	0,0232	0,00102	0,000038

Tablo 5, 3 cm uzaklıktaki farklı cihazlardan yayılan EMA'nın farklı modellerin kafa bölgesinde indüklediği elektrik alan (|**E**|) ve ÖSO'yu belirtmektedir. Aynı zamanda benzetimler sonucu elde edilen ÖSO ile ölçümler sonucu kaydedilen elektrik alanın ilişkilendirilmesi sonucunda deneysel ÖSO tahmini yapılmıştır. Eşitlik 1'de belirtildiği üzere ÖSO, elektrik alanın genliğinin karesi ile orantılıdır. Tabloda belirtilen her modelin beyin bölgesinde indüklenen elektrik alan ile ölçümler sonucu elde edilen elektrik alan, kareleriyle doğru orantılı bir şekilde ÖSO ile ilişkilendirilmiştir. Buna göre en yüksek ÖSO ilişkisi, 32,7 mW/kg için çocuk (7 yaş, kadın) modelinin mikrodalga fırına maruziyeti sonucu oluşması öngörülmektedir. Ayrıca, en düşük olarak ortalama erkek yetişkin modelinin ilişkisi elde edilmiştir ve 0,77 μW/kg olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5. Çeşitli cihazların yaydığı EMA'nın farklı modellerin kafa bölgesinde indüklediği |**E**|, ÖSO ve gerçek ölçümlerle olan doğru orantılı ilişkileri

Maruziyet Modeli		**Çocuk (7 yaş, kadın)**	**Kadın (43 yaş, 24 haftalık hamile)**	**Ortalama Erkek Yetişkin**
Cep Telefonu (1800 MHz)	|**E**| (V/m) (Benzetim)	12,37	21,2	27,86
	ÖSO (mW/kg) (Benzetim)	75,5	62,2	41,7
	|**E**| (V/m) (Ölçüm)	0,12	0,12	0,12
	ÖSO (mW/kg) (İlişki)	0,000711	0,00199	0,00077
Tablet (2400 MHz)	|**E**| (V/m) (Benzetim)	23,45	34,51	39,8
	ÖSO (mW/kg) (Benzetim)	113	72	69
	|**E**| (V/m) (Ölçüm)	1,32	1,32	1,32
	ÖSO (mW/kg) (İlişki)	0,358	0,1053	0,0759
Mikrodalga Fırın (2450 MHz)	|**E**| (V/m) (Benzetim)	25,81	37,03	44,05
	ÖSO (mW/kg) (Benzetim)	119	74	71
	|**E**| (V/m) (Ölçüm)	13,55	13,55	13,55
	ÖSO (mW/kg) (İlişki)	32,7	9,9	6,71

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, günlük yaşam alanlarında bulunan cihazların sebep olduğu yüksek frekans bölgesindeki elektromanyetik alanlar incelenmiştir ve maruziyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, çeşitli frekanslarda EMA yayan cihazların elektrik alan ölçümleri yapılmıştır. Elektromanyetik dozimetri analizleri için voksel tabanlı anatomik modeller yardımıyla ÖSO değerleri hesaplanmıştır. İncelemelerde 1800 MHz'de ışıma yapan kaynağın cep telefonuna, 2400 MHz'de çalışan kaynağın tablete ve 2450 MHz'de çalışan kaynağın da mikrodalga fırına karşılık geldiği kabul edilmiştir.

Ölçüm sonuçlarına göre en yüksek elektrik alan, mikrodalga fırın tarafından yayılmaktadır. Tüm cihazlarda beklendiği üzere uzaklık arttıkça alan seviyesi doğrusal olmayan bir şekilde azalmıştır. Ölçüm sonuçları, uluslararası standartların yayınladığı limitlerin altında elde edilmiştir.

Yüksek frekans bölgesindeki ÖSO benzetim sonuçları, olası senaryolar baz alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen verilerin karşılaştırılması ile ÖSO'nun yaş gruplarına, doku özelliklerine, etkileşim durumundaki cihazın çalışma frekansına, uzaklığa bağlı konumuna göre değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Bunun yanında ÖSO'nun uzaklık ile ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir.

Benzetimler sırasında dokuda indüklenen elektrik alan, Tablo 5'te verilmiştir. Benzetimler sonucu elde edilen ÖSO'dan yararlanarak, 3 cm uzaklıkta ölçümü gerçekleştirilen cihazların elektrik alan değerlerinin kareleri sayesinde yeni ÖSO değerleri elde edilmiştir. Bu sayede, gerçek değerler ile benzetim sonuçları ilişkilendirilmiştir. Hesaplamalarda çocuk (7 yaş, kadın), hamile kadın (43 yaş, 24 haftalık hamile) ve ortalama erkek yetişkin modeli ele alınmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki 3 cm uzaklıkta ölçülen elektrik alana göre elde edilen ÖSO değerleri, ICNIRP'nin halk maruziyeti ve mesleki maruziyet için belirlemiş olduğu limitlerin altındadır.

Sonuçlara göre, elektromanyetik çevreden çocukların yetişkinlere kıyasla daha fazla etkilenebilecekleri gözlemlenmiştir. Bu durum, çocukların vücut yapılarının küçük olması ile açıklanabilir. Elde edilen veriler ışığında çocukların kafataslarının yetişkinlere göre daha ince olması nedeniyle EMA'nın çocukların beyin bölgesine daha kolay ulaştığı gözlemlenmiştir. Çocuk dokularındaki yüksek su içeriği sayesinde dielektrik özelliklerinin yetişkinlere kıyasla yüksek olması, ÖSO'yu arttıran bir sebep olmakla birlikte EMA'dan dolayı doku modelinin rezonansa girmesi de aynı şekilde ÖSO'yu arttırmaktadır.

Günlük yaşam alanlarındaki elektromanyetik çevrenin ilerleyen zamanlarda farklı cihazlardan kaynaklı olarak daha fazla yoğunlaşacağı kabul edilmektedir. Elektronik cihazlardan yayılan alanların etkilerini en düşük düzeyde tutmak için bireylerin kendi imkanları doğrultusunda alabilecekleri önlemler son derece önemlidir. Bunlardan bazıları, kablosuz internet özelliği olan dizüstü bilgisayar kullanıldığında veya açık tutulduğunda, söz konusu cihaz bir anten görevi görerek etraftaki tüm EMA'yı toplar. Kablosuz internet kullanılmadığında bilgisayarların ilgili özelliği kapatılabilir. Cep telefonuyla konuşmayı olabildiğince kısa tutmak ve konuşurken belirli aralıklarla telefonun konumunu değiştirmek önerilebilir. Mikrodalga fırın çalışırken olabildiğince uzak mesafede durmaya dikkat edilmelidir. İlerleyen çalışmalarda, biyolojik dokuya farklı açılarda gelen EMA'nın etkilerinin incelenmesi planlanmaktadır.

5. REFERANSLAR

[1] K. Ates, S. Ozen, and H.F. Carlak, Finite Element Method Based Simulations of the Magnetic Fields Around the Overhead Transmission Line and Its Dosimetric Analysis, 2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). 642-645, 2019.

[2] Ş. Özen, E. Uskun and O. Çerezci, Üniversite Öğrencileri Arasında Cep Telefonu Kullanımı ve Elektromanyetik Kirlilik Üzerine Bir Çalışma, Sakarya University Journal of Science. 6 (2), 153-159, 2002.

[3] E. Katirci, E. Kirimlioglu, A.O. Oflamaz, E. Hidisoglu, A. Cernomorcenco, P. Yargıcoğlu, S. Ozen and N. Demir, Expression Levels of TAM Receptors and Ligands in the Testes of Rats Exposed to Short and Middle-Term 2100 MHz Radiofrequency Radiation. Bioelectromagnetics. 45 (5), 235–248, 2024.

[4] B.M. Girela-Serrano, A.D.V. Spiers, L. Rutong, S. Gangadia, M. B. Toledano and M. Di Simplicio, Impact of Mobile Phones and Wireless Devices Use on Children And Adolescents' Mental Health: A Systematic Review, European Child & Adolescent Psychiatry, 33, 1621-1651, 2024.

[5] ICNIRP, Guidelines For Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz To 100 kHz), Health Phys. 99 (6), 818-836, 2010.

[6] IEEE C95.1-2019 Standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz, 2019.

[7] M. Gunes, K. Ates, B. Yalcin, S. Akkurt, S. Ozen and B. Kaya, An Evaluation of the Genotoxic Effects of Electromagnetic Radiation at 90 MHz, 1800 MHz, and 2100 MHz Frequencies with a SMART Assay in *Drosophila melanogaster*, Electromagnetic Biology and Medicine. 40 (2), 254-263, 2021.

[8] Ş. Özen, T. Aydoğmuş, H.F. Carlak and K. Ateş, Endüstriyel Mikrodalga Kaynaklara Maruz Kalan Çalışanlar İçin Elektromanyetik Risk Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi. 7 (3), 467-472, 2019.

[9] L. N. Özdinc Polat, Ş. Özen, K. Ateş and H. İ. Keskin, Investigation of the Exposure to Electromagnetic Fields in the Body with Metallic Orthopedic Implant. 2019 Medical Technologies Congress (TIPTEKNO'19). 434-437, 2019.

[10] M. Abdul-Al, A. S.I. Amar, I. Elfergani, R. Littlehales, N.O. Parchin, Y. Al-Yasir, C.H. See, D. Zhou, Z.Z. Abidin, M. Alibakhshikenari vd. Wireless Electromagnetic Radiation Assessment Based on the Specific Absorption Rate (SAR): A Review Case Study, Electronics. 11, 511, 2022.

[11] A. R. O. Mumin, R. Alias, J. Abdullah, S. H. Dahlan and J. Ali, Assessment of Electromagnetic Absorption towards Human Head Using Specific Absorption Rate, Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 7 (4), 657-664, 2018.

[12] K. Ates and H. F. Carlak, Dosimetry Analysis of the Human Head Model due to Mobile Phone Usage at GSM-850 Frequency Band, 2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET), Antalya, Türkiye, 2017.

[13] K. Ateş, C. Yeter ve Ş. Özen, WLAN Uygulamaları için 4×4 MIMO Antenin Elektromanyetik Dozimetri Karakteristiğinin İncelenmesi, TIPTEKNO'20, Çevrimiçi, 19-20 Kasım 2020.

[14] S. Helhel, S. Ozen, I.B. Basyigit, O. Kurnaz, Y.E. Yoruk, M. Bitirgan and Z. Colak, Radiated Susceptibility of Medical Equipment in Health Care Units: 2G and 3G Mobile Phones as an Interferer, Microwave and Optical Technology Letters. 53 (11), 2657-2661, 2011.

[15] K. Ates, H.F. Carlak and S. Ozen, Magnetic Field Exposures due to Underground Power Cables: a Simulation Study, 2nd World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECSS'16). 2016.

[16] K. Ates, H.F. Carlak and S. Ozen, Dosimetry Analysis of the Magnetic Field of Underground Power Cables and Magnetic Field Mitigation Using an Electromagnetic Shielding Technique, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. 28 (3), 1672-1682, 2022.

[17] M. Bedeloğlu, N. İl, K. Ateş and Ş. Özen, Measurement and Analysis of Electric and Magnetic Field Strength in Grid-Tied Photovoltaic Power System Components, Radiation Protection Dosimetry. 194 (1), 57-64, 2021.

[18] M. Erol, K. Ateş and Ş. Özen, Elektrikli Araçlarda Kablosuz Güç Transferi Sistemi Tasarımı ve Elektromanyetik Alan Maruziyetinin Değerlendirilmesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6 (1), 605-618, 2023.

[19] E. Yavuz Dirik, K. Ateş and Ş. Özen Tipik Türk Evi ve İş Yerlerinde Düşük Frekanslı Elektromanyetik Alan Kaynakları İçin Elektromanyetik Risk Analizi, Akdeniz Mühendislik Dergisi. 1 (1), 1-14, 2023.

[20] CST Studio Suite, https://www.cst.com/, 2019 [accessed 12 May 2024].

[21] Ç. Gökçek-Saraç, G. Akçay, S. Karakurt, K. Ateş and Ş.Özen, Possible Effects of Different Doses of 2.1 GHz Electromagnetic Radiation on Learning, and Hippocampal Levels of Cholinergic Biomarkers in Wistar Rats, Electromagnetic Biology and Medicine. 40 (1), 179-190, 2021.

[22] N. İl, K. Ateş and Ş. Özen, Electromagnetic Field Exposure to Human Head Model with Various Metal Objects at Sub-6 GHz Frequencies, Electromagnetic Biology and Medicine. 42 (3), 114-122, 2023.

[23] D. Andreuccetti, R. Fossi and C. Petrucci, An internet resource for the calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 10 Hz-100 GHz, http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop, 1996 [accessed 12 May 2024].

[24] A. Vander Vorst, A. Rosen and Y. Kotsuka. RF/Microwave Interaction with Biological Tissues. John Wiley & Sons, 2006.

[25] D. Bhargava, P. Rattanadecho and T. Wessapan, The Effect of Metal Objects on the SAR and Temperature Increase in the Human Head Exposed to Dipole Antenna (Numerical Analysis), Case Studies in Thermal Engineering. 22, 100789, 2020.

[26] T. Wessapan and P. Rattanadecho, Temperature Induced in Human Organs due to Near-Field and Far-Field Electromagnetic Exposure Effects, International Journal of Heat and Mass Transfer. 119, 65-76, 2018.

[27] E. Yavuz Dirik, İş Yerleri ve Yaşam Alanlarında Bulunan Cihazların Elektromanyetik Alan Seviyelerinin Belirlenmesi ve Elektromanyetik Risk Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, 2022.

Akdeniz Mühendislik Dergisi
Akdeniz Journal of Engineering
(AKUJE)
2024, 2(1), pp. 35-48
Araştırma Makalesi Research Article

DESIGN OF A BATTERY MANAGEMENT SYSTEM WITH ACTIVE BALANCING TOPOLOGY

AKTİF DENGELEME TOPOLOJİSİNE SAHİP AKÜ YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

Tuna AYKUT[1] **Sezer CETIN**[1] **Alper MANDACI**[1] **Sıtkı GUNER**[*1]

1 Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

ABSTRACT

Batteries are packages that contain and use multiple cells. However, not all cells that make up the battery can charge and discharge equally, and this imbalance leads to a loss of efficiency in the battery. Even if they were produced on the same date, in the same factory, with the same method, for example, one of them is consumed by 40% while the other is consumed by 50%. At this point, battery management systems (BMS) are gaining importance. BMS, which is divided into two main headings as active and passive methods, is the focus of this paper. Both active and passive cell balancing are effective ways to improve system health by monitoring and matching the state of charge (SoC) of each cell. Active cell balancing redistributes the charge during the charge and discharge cycle, unlike passive cell balancing, which simply distributes the charge during the charge cycle. Thus, active cell balancing increases system uptime and can improve charging efficiency. At the same time, it is a method that is more reliable, avoids energy wastage as it sends excess energy to the low-energy cell, and has a faster balancing speed. Active balancing creates a more complex, larger carbon footprint and passive balancing is more cost-effective. Therefore, passive balancing is more preferred in the sector. However, active balancing is more suitable for high-voltage applications and electric vehicle technologies. Considering the disadvantages of active balancing, the main objectives are to develop this method, to provide know-how for the sector, and to increase energy efficiency in many popular areas of technology.

Keywords: Active Battery Management System, Arduino, Battery Efficiency, State of Charge

ÖZET

Piller birden fazla hücre içeren ve kullanan paketlerdir. Ancak pili oluşturan hücrelerin tamamı eşit şekilde şarj ve deşarj olamaz ve bu dengesizlik pilde verim kaybına neden olur. Aynı tarihte, aynı fabrikada, aynı yöntemle üretilmiş olsalar bile mesela biri %40 tüketilirken diğeri %50 tüketiliyor. Bu noktada batarya yönetim sistemleri (BMS) önem kazanmaktadır. Aktif ve pasif yöntemler olarak iki ana başlığa ayrılan BMS bu makalenin odak noktasını oluşturmaktadır. Hem aktif hem de pasif hücre dengeleme, her hücrenin şarj durumunu (SoC) izleyip eşleştirerek sistem sağlığını iyileştirmenin etkili yoludur. Aktif hücre dengeleme, şarj döngüsü sırasında yükü basitçe dağıtan pasif hücre dengelemenin aksine, şarj ve deşarj döngüsü sırasında yükü yeniden dağıtır. Böylece aktif hücre dengeleme, sistemin çalışma süresini artırır ve şarj verimliliğini artırabilir. Aynı zamanda daha güvenilir, fazla enerjiyi düşük enerjili hücreye gönderdiği için enerji israfını önleyen, dengeleme hızı daha hızlı olan bir yöntemdir. Aktif dengeleme daha karmaşık, daha büyük bir karbon ayak izi oluşturur ve pasif dengeleme daha uygun maliyetlidir. Bu nedenle sektörde pasif dengeleme daha çok tercih edilmektedir. Ancak aktif dengeleme, yüksek gerilim uygulamaları ve elektrikli araç teknolojileri için daha uygundur. Aktif dengelemenin dezavantajları göz önüne alındığında, bu yöntemin geliştirilmesi, sektöre bilgi sağlanması ve teknolojinin popüler pek çok alanında enerji verimliliğinin artırılması temel amaçtır.

Anahtar Kelimeler: Aktif Akü Yönetim Sistemi, Akü Verimliliği, Arduino, Şarj Durumu

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: sguner@eskisehir.edu.tr

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayım Tarihi
27.12.2023	23.05.2024	26.06.2024	30.06.2024

1. INTRODUCTION

Today, with the developing technology, electric vehicles, electric scooters, and renewable energy systems have started to take up more space in our lives. Because of this, the batteries which are in charge of providing energy to them also gain importance. Therefore, the service life and efficiency of these batteries are of great importance. Batteries consist of cells within themselves, and the energy consumption rates of these cells are not the same. Even if they are produced at the same date, in the same factory, with the same method. The lowest capacity cell in a battery stack determines how well the stack performs; when that cell runs out, the stack as a whole is essentially empty, and this imbalance leads to a big decrease in efficiency [1]. There are many studies on battery management systems and different methods are described in these studies [2], [3]. BMS has 2 different main methods as active balancing and passive balancing. The primary distinction between the two approaches lies in how they address the balancing of series-connected cells. Passive cell balancing achieves balance by dissipating excess energy from the highly charged cells, while active cell balancing redistributes energy from strong cells to weak cells. Passive cell balancing is extensively employed in industrial applications due to its simplicity, reliability, and cost-effectiveness [4], [5]. On the other hand, active balancing methods involve the redistribution of cell energy, which proves to be more energy-efficient compared to passive balancing methods that dissipate excess cell energy through resistors [6]. Active balancing methods are also well-suited for both charging and discharging operations [7]. In every application where batteries are used, the terms "balancer" and "BMS" come up frequently. In addition to balancing, BMS also monitors and regulates the entire battery at the cell level, disconnects the entire battery in the event of an over- or under-voltage, and extends the life of the expensive battery. All that a balancer does is transfer energy from a higher-voltage cell to a lower-voltage cell to keep batteries balanced. In this study, a battery management system using active balancing topology will be developed. In this system, one switched capacitor method is preferred among other active balancing methods. With this study, it is aimed that the team will gain know-how on the management of batteries to be used in renewable energy and electric vehicle systems, which are popular topics of the last period. It is thought that this study will also make significant contributions to the electric vehicle industry in the near future, when the number of domestic and national electric vehicles will increase.

2. METHODOLOGY

Active balancing methods are divided into 2 different branches depending on the hardware used as given in Figure 1. These are capacitive and inductive methods. Inductive methods are about using transformers for balancing, and these can be given as examples of switched transformer and shared transformer methods [8] [9] [10]. Although these methods have advantages such as higher balancing speed and less loss, they were not preferred in this study because they use converters as the basic hardware. The fact that the transformers are much more expensive than the capacitors to be used in capacitive methods and the difficulty of supplying them led to the preference of capacitive methods. Capacitive methods use capacitors as the basic equipment and use the method of taking energy from a fuller cell, storing it in the capacitor and then transferring it to the low-energy cell. Examples of these are the multiple switched capacitor and one switched capacitor methods [11].

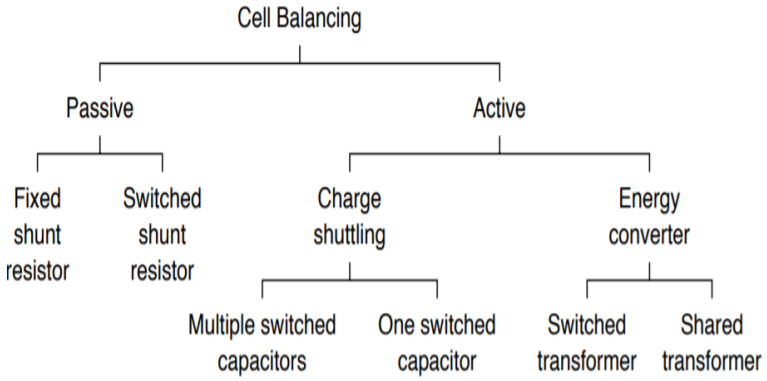
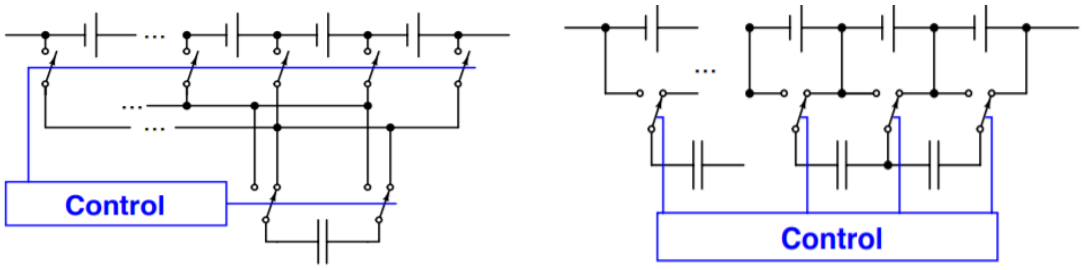


Figure 1. Methods of BMS [12]

In multiple switched capacitor methods, a capacitor is connected for each neighboring cell and balancing is done by providing energy transfer between neighboring cells as given Figure 2a. 2n switches and n-1 capacitors are used to balance n cells. Although this method does not require intelligent control and has advantages such as low switching voltage stress in switches, it requires a long balancing time. In addition, the cost is much higher due to the use of more hardware [13].

In one switched capacitor methods, a capacitor is connected for each neighboring cell and balancing is done by providing energy transfer between neighboring cells as given Figure 2b. The capacitor identifies the high-energy cell, receives and stores the energy, and then transfers it to the low-energy cell it identifies. For this, it is necessary to determine the state of charge of the cells and to use an intelligent control. Balancing N cells requires n+5 switches and a single capacitor. Compared to the first method, it has the advantages of being more reliable, less costly, easy to control and easy to implement. [13].



(a) **(b)**

Figure 2. (a) Multiple switched capacitors, **(b)** one switched capacitor [12]

$$E = \frac{1}{2}C(v_H^2 - v_L^2) \tag{1}$$

$$SOC = E \approx (\Delta z)Qv_{nom} \quad v_{nom} = \frac{V_H + v_L}{2} \tag{2}$$

$$(\Delta z)Q\frac{V_H + v_L}{2} \approx \frac{1}{2}C(v_H + v_L)(v_H - v_L) \;\; \Delta z \approx \frac{c}{Q}\Delta v \tag{3}$$

2.1. Topologies of BMS

Battery management systems have a multi-electronic complex structure. The BMS is aimed to be designed voltage and current measurement at cell level, charge level determination (SoC), health level determination (SoH), cell level balancing, continuous control of the voltage and current limits of the cells targeted. For this reason, deciding on the basic features that will form the system is done at the very beginning of the paper. Types of sensors to be used; determined as voltage, current and temperature sensors.

The battery management system may be designed with many different topologies. The advantages and disadvantages of the active BMS methods are given Table 1. The centralized topology offers such solution where cells are directly connected in a single BMS circuit. All measurements, decision mechanisms and parts where balancing operations are performed are all in a single circuit. The disadvantage is the use of excessive cables and thus causing overheating. In the modular topology, there is more than one BMS circuit and one of these circuit boards is the master circuit, but there is difficulty in communication at the cell level. In the Master-Slave topology, the circuit board, which is the manager, has no direct connection with the cells as given Figure 3. In distributed topology, there are analog circuits for each cell. However, these circuits do not have any control function. It consists only of circuit elements related to balancing [14].

In this paper, it is aimed both to balance at the cell level and to make cell measurements using Arduino. Therefore, a synthesis of distributed topology and centralized topology is preferred. In this new synthesis

topology, Arduino is planned to be used as the master board as it is suitable for sensor fusion, interface creation and application of different algorithms. Unlike the distributed topology, the current, voltage and temperature data from the cells will be transferred to the Arduino via the sensors and will be processed and interpreted there.

Table 1: Comparison of active BMS methods

	Switched transformer	**Shared transformer**	**Multiple switched capacitors**	**One switched capacitor**
Balancing speed	High	High	Low	Middle
Control	-	-	-	High
Cost	High	High	Middle	Low
Ease of supply	Low	Low	High	High
Reliability	High	High	Middle	High

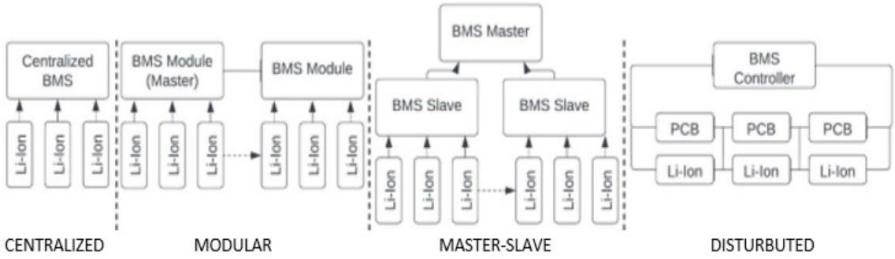


Figure 3. Schematic overview of BMS topologies

2.2 Battery Types and state of charge

Since the discharge voltage curve of Li-Ion batteries is relatively more linear than other battery types, it was decided to use coulomb counting instead of voltage measurement as a method of determining the state of charge. Estimating SoC with only voltage measurement causes high percentages of error. Because Li-Ion batteries have less voltage changes between 80% and 20% during discharge [15]. In addition, the BMS circuit constantly checks that the voltage and current values of the batteries are within the limit values during both charging and discharging. In case of exceeding these values, it controls the relays connecting the battery to the circuit and ensures that the battery is deactivated. The proposed topology is given Figure 4.

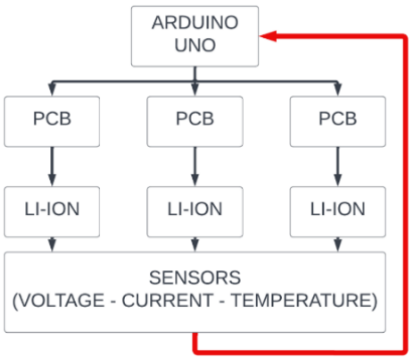


Figure 4. Diagram of the synthesis topology

Calculation of State of Charge (SoC) is aimed to be done in this part. There are different methods for obtaining SoC. The most suitable method for the BMS is chosen according to the battery type. As it is seen in the Figure 5, both charge and discharge curves of Li-Ion batteries does not change linearly. Because of this reason, it would cause great errors to calculate SoC by only using voltage values. Therefore, it is decided to use Coulomb counting method to calculate/estimate SoC with minimum error [16, 17].

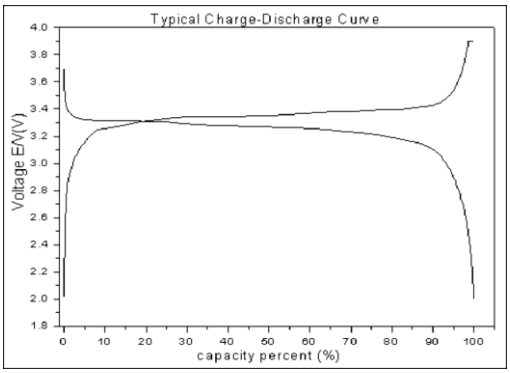


Figure 5. Charge-discharge curve of Li-Ion batteries [18]

Coulomb counting method uses current measurement to calculate how much energy remains in the battery pack using which is done by comparing current values measured separately [19].

$$SoC(t) = SoC(t-1) + \frac{I_{(t)}}{Q_n}\Delta t \quad (4)$$

SoC(t-1) = SoC at previous time step

η = efficiency

t = current time step

t-1 = previous time step

Q = Charge capacity of the battery

Finally, an active balancing BMS with one switched capacitor method within a synthesis topology is implemented using Arduino Uno, 3 18650 Li-ion batteries in series, ACS712 current sensors, DS18B20 temperature sensors, and a 5V relay. Coulomb counting is applied in Arduino to calculate/estimate SoC. Balancing PCBs with one switched capacitor method are designed and implemented to work with digital outputs of Arduino. Then, display is derived to show SoC, voltage, temperature, and current values of all cells.

3. SENSORS

3.1 Temperature Sensor

This part includes the choice of most suitable temperature sensor for this paper and its implementation into the Arduino Uno in both hardware and software context. The implemented circuit is given Figure 6. This is done by making such choice to minimize number of inputs used in Arduino Uno to leave more room for balancing control. Decision of temperature sensor is made in favor of DS18B20. This is because of the possibility of using 3 of DS18B20 sensors with only one digital input of the Arduino Uno with the help of each sensor having its own ID [20].

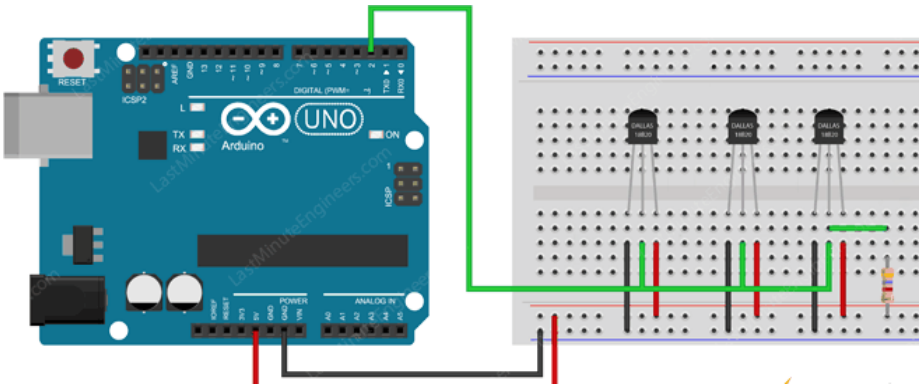


Figure 6. Wiring temperature sensor to Arduino [21]

In addition, DS18BS comes in two variations. There is only one difference between those two which is the casing of sensor. The one with the metal casing is chosen because of the fact that heat transfer is faster compared to the other one with epoxy casing. Number of inputs and connections are the same. Implementation of the DS18B20 temperature sensor is completed. The sensor with minimum number of inputs is obtained, implemented, and integrated into the BMS with required connections along with suitable code.

3.2 Voltage and Current Sensors with Relay

This part includes the choice of most suitable voltage and current sensor along with relay and their implementation into the BMS. Voltage of each Li-Ion cell is going to be measured separately and maximum voltage value of a Li-Ion cell is 4.2 Volts. Arduino Uno can measure voltage values up to 5 Volts. For this reason, it is possible to use Arduino Uno itself along with a passive circuitry for voltage measurement. This process is basically using two resistors as voltage dividers, reading the divided voltage value from an analog input pin, and later scaling this value to obtain measured voltage in the very beginning of the process. For the sake of accuracy, resistor values are measured with a multimeter and included in the code with their measured values. For example, a 10k ohm resistor is measured as 9800 ohm and 100k one is also measured as 97800 ohm and the code is written accordingly to eliminate errors. The voltage measurement circuit generated in this study is given Figure 7.

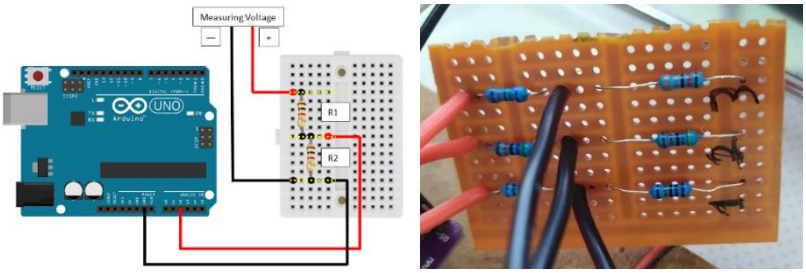


Figure 7. Voltage measurement with Arduino [22]

While adjusting the algorithm for more accurate measurement, such method in the Figure 8 used by measuring the voltage value with a multimeter, a cell meter, and an Arduino Uno. Even though cells are connected in series in designed BMS, current values of each sensor are done separately to track the process in a better manner during balancing. Therefore, it is needed to obtain and implement 3 current sensors. Current sensors that were analyzed for decision are MAX4080, INA169, INA219, INA3221, ACS712, ACS758, and WCS1800. After a long consideration in a wide range of current sensors according to the cost, sensitivity, and range parameters, it is decided to use ACS712. It is currently one of the most reachable current sensor in the market and its specifications are suitable for such BMS. However, some modifications are done to implement ACS712 into the BMS [23, 24]. ACS712 has 3 variations such as ± 5A, ± 20A, and ± 30A. Among other versions, ±5A is chosen due to the reason that it is more sensitive which helps doing more accurate measurements.

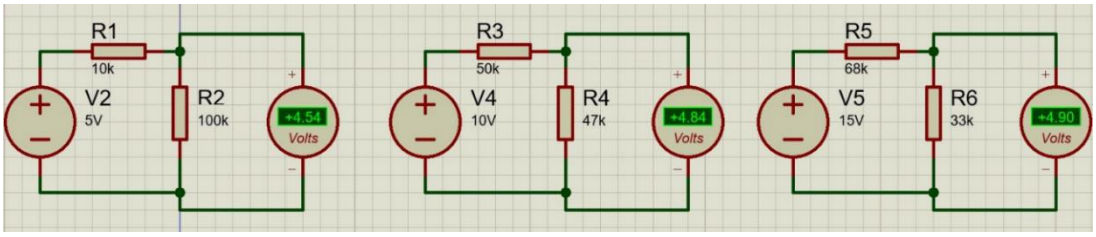


Figure 8. Voltage divider circuit design

The sensor is working with a principle of dividing 5 Volts given into its VCC and GND terminals into 2.5 Volts which is also the output of the sensor in VIOUT terminal connected to an analog input pin of Arduino Uno. However, this 2.5 Volts changes according to measured current value. Such change is calculated by the Arduino Uno with a specific code to obtain current values in Amperes. There are 2 capacitors connected to the sensor. C_{BYP} exists to remove ripples of 5 Volts. C_F stands for filtering and affects both measurement period and accuracy as given Figure 9 [25].

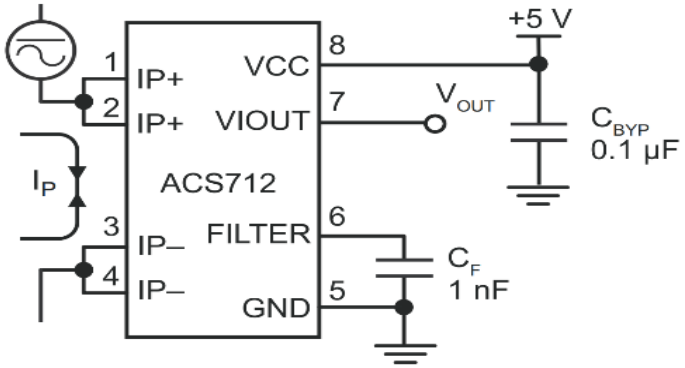
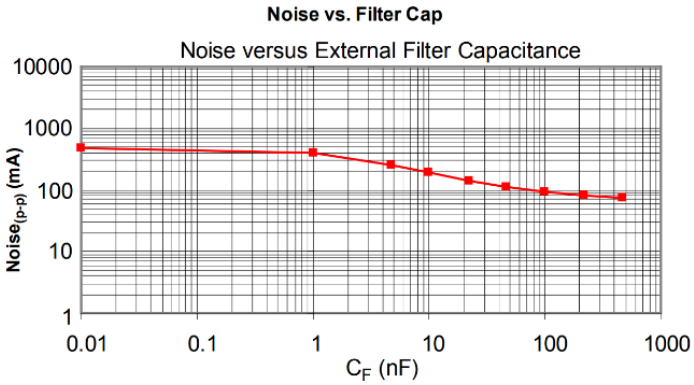


Figure 9. Diagram of ACS712 [24]

However, ±5A version of ACS712 has 300mA noise because of two reasons. The first one is 0.1 µF capacitor is insufficient to remove ripples in 5 Volts DC output of Arduino Uno. Due to the working principle of the current sensor that is explained earlier in this report, each ripple in 5 Volts cause incalculable changes in measurements. To prevent this, a 220 µF capacitor is connected in parallel to the output of Arduino Uno. The second one is 1 nF capacitor. Because it offers 7.7 µs of rise time with 300mA noise. However, 1120 µs of rise time along with 30mA is a lot more suitable in this BMS. In Figure 10, noise graph and table are given from datasheet of ACS712.



C_F (nF)	t_r (µs)
0	6.6
1	7.7
4.7	17.4
10	32.1
22	68.2
47	88.2
100	291.3
220	623.0
470	1120.0

Figure 10. Noise graph and table of ACS712 [24]

470 nF capacitor is soldered in parallel to 1nF filter capacitor and noise is successfully reduced down to 30mA which decrease the amount of error down to %1 from %10 in a case where 3A is measured during charging process while being able to take samples every 1.12 ms. The connection of the soldered capacitor is given Figure 11.

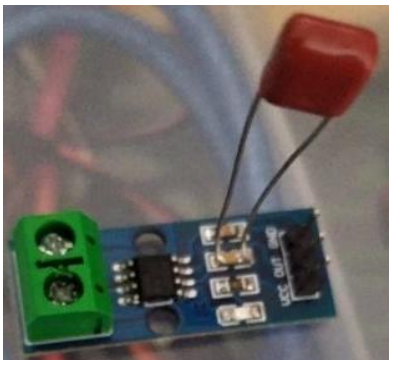


Figure 11. Soldered capacitor that used in the design.

After improvements on accuracy are completed in hardware, some software solutions are derived such as digital filtering. Arduino Uno reads 10 values and takes their average to remove the effects of unexpected peaks from measurements. Then, average values are converted into current values. After all those modifications, noise of the current sensor is successfully reduced to 30mA.

Three types of relays are used in the BMS. A 5V, mechanical and normally closed relay is used to open and close the contact of battery with the system during balancing and in case of an emergency. Such emergency would be batteries overheating, current values increasing more than expected due to a short circuit and measuring unexpected high voltage values in Li-Ion cells during charging or discharging processes. If Arduino Uno detects such emergencies, it sends out a signal from one of its digital output pins to the relay [26].

Other than that, six 5V SPDT relays are used in the balancing part where it is indicated which cells are going to be balanced among three 18650s as given Figure 12. For the last, there are four AQZ205 solid state relays. They form 2 SPDT relays for switching the one switched capacitor between two cells that are chosen to be balanced. Solid state relays are used since they provide significantly high switching speed.

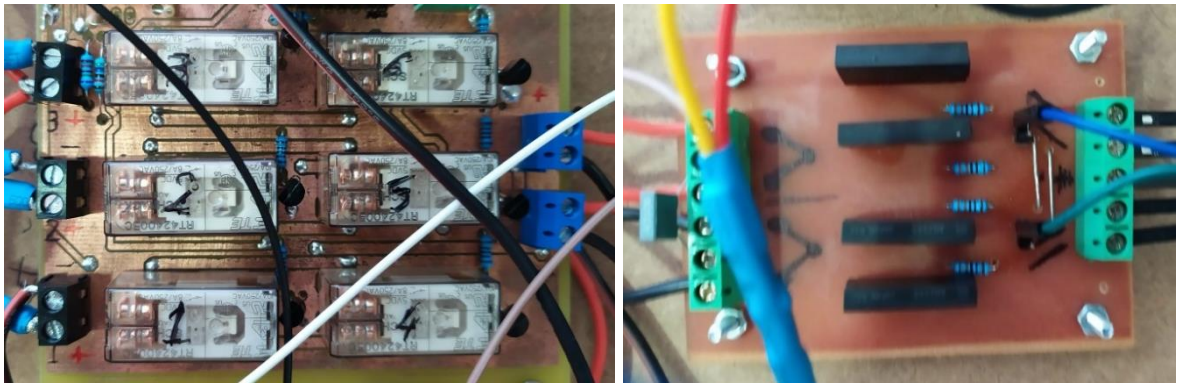


Figure 12. 5V mechanical SPDT Relays 4 solid state SPST relays that are forming two SPDT relays

Since there are many relays used in both balancing and other parts of the circuit, relay driver circuits consist of 2N2222 bipolar junction transistors that are equipped with 1N4002 flyback diodes are implemented as Figure 13. 5V is obtained from the voltage regulator that is connected to plug so that Arduino only provides signal output for all relays.

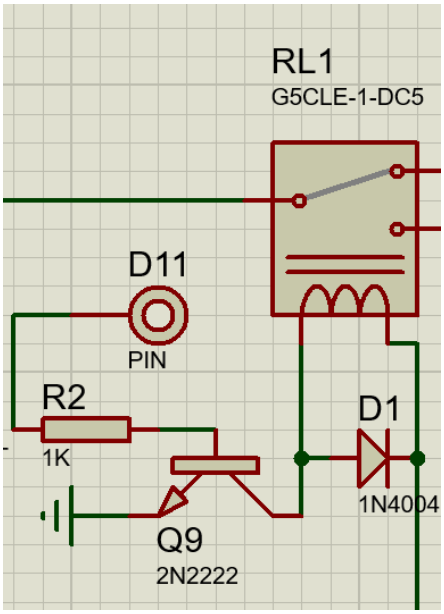


Figure 13. Relay driver circuit

This part of the study is completed by deciding, obtaining, and implementing current, and voltage measurement methods along with the relay. However, digital filtering part is always open for improvement during tests. Because it is quite easy and a lot less concerning to implement changes in the code, it is accepted as finished. After the second part is completed, all codes are put together to form the main loop and overall circuit is configured in Figure 14.

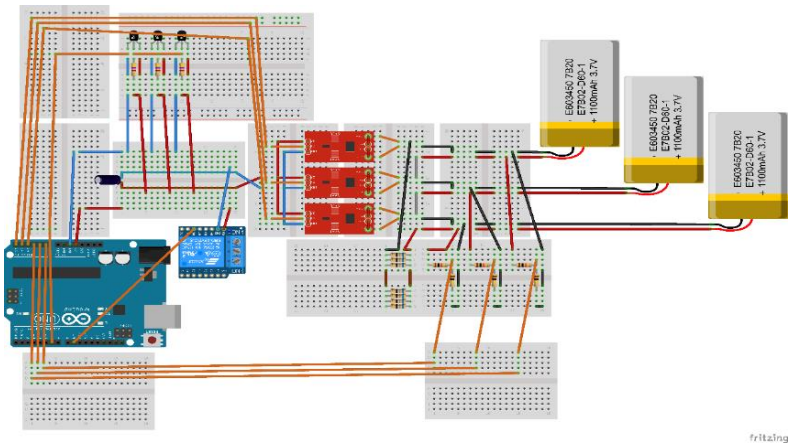


Figure 14. Circuit diagram after the second part is completed

4. BALANCING PCB

In Figure 15, charge and discharge graph of the balancing capacitor is given. By evaluating the voltage and current formulas of a capacitor, required values are determined.

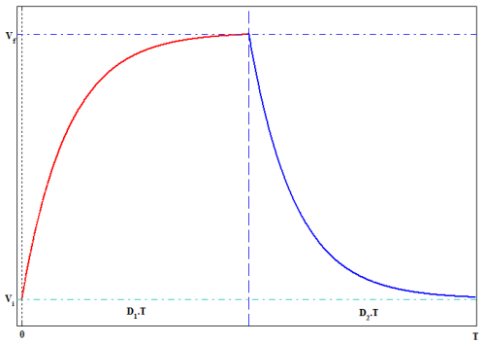


Figure 15. Charge and discharge graph of the balancing capacitor [27].

$$V_{c_{charging}} = (V_f - V_i)\left(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}\right) + V_i = V_{diff}\left(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}\right) + V_i \quad (5)$$

$$i_c = C\frac{dVc}{dt} = C\frac{1}{\tau}.Vd_{iff}.e^{\frac{-t}{\tau}} = \frac{V\,diff}{Rs}.e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (6)$$

$$\text{Energy charging } = C.V_{diff}\left\{\frac{V_{diff}}{2}.e^{\frac{2D}{\tau.F}} - V_f.e^{\frac{-D}{\tau.F}} - \frac{V_{diff}}{2} + V_f\right\} * F \ \ (Wh/h) \quad (7)$$

$$\text{Energy discharging } = C.V_{diff}\left\{\frac{V_{diff}}{2}.e^{\frac{-2D}{\tau.F}} - V_i.e^{\frac{-D}{\tau.F}} - \frac{V_{diff}}{2} - V_i\right\} * F \ \ (Wh/h) \quad (8)$$

Figure 15 and 16 shows the amount of energy capacitor can be charged and discharged on various values of duty cycle. The duty cycle refers to the amount of time a signal is on during a given period. Therefore, decision of providing 0.9 of the periods for the charging process will result leaving only 0.1 for the discharging process which will cause capacitor to not fully discharge its energy into the low voltage cell during balancing. Because of that, even though energy transferred seem to increase with the duty cycle, due to the fundamentals of the term of duty cycle, 0.5 gives the best results for energy transfer during balancing.

Figure 16 also states that increasing switching frequency over 500 Hz does not provide a significant difference in terms of the amount of energy transferred between cells and the capacitor. Therefore, switching frequency is chosen to be 500 Hz.

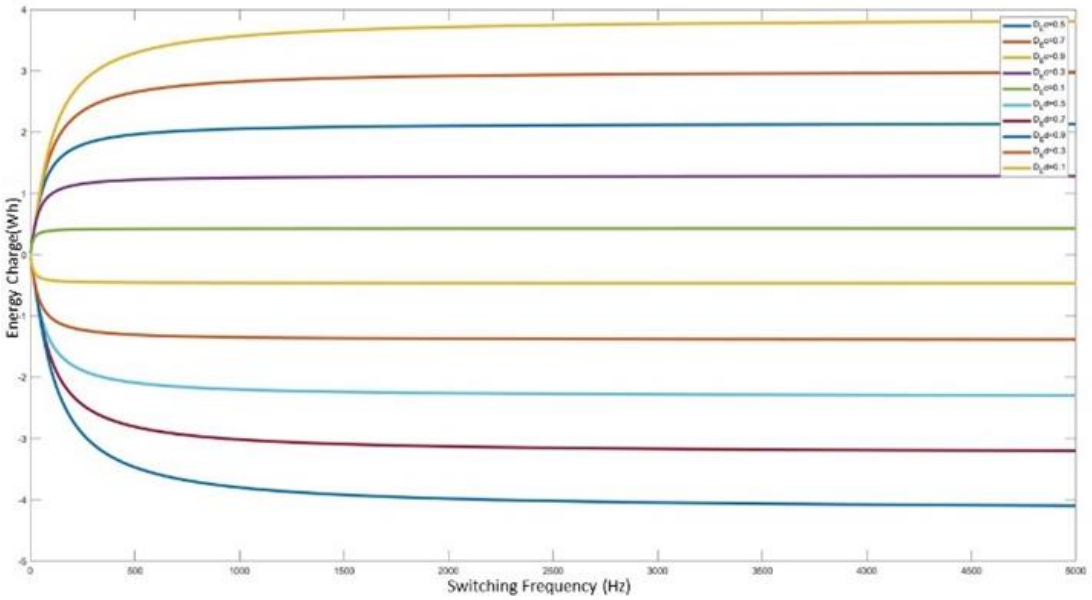


Figure 16. Energy Charge & Discharge Graph Depends on Duty Cycle

Based on the capacitor values already existing on the market, such graphs are drawn by only changing the capacitor value as shown in the Figure 17. Since the duty cycle is determined as 0.5 and switching frequency is 500 Hz, those graphs are obtained to determine the best capacitor value capacitor value as 4.7 μF for the most amount of energy transfer.

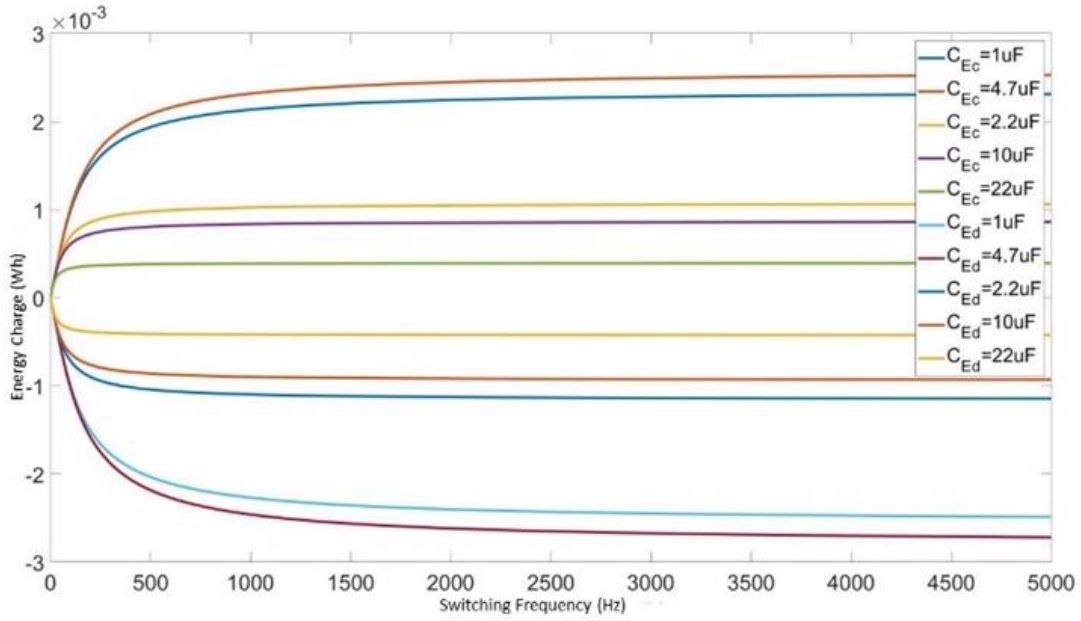


Figure 17. Capacitor Comparison

In Figure 18, charging part of the BMS is shown. This part of the PCB design enables to turn AC input into DC for the charging part of the BMS. It consists of a transformer, a full bridge rectifier, and a capacitor. Transformer decreases voltage while increasing current value of the AC. Full bridge rectifier performs such operation to turn negative half waves into positive. Capacitor enables rectified waves to transform into a DC form. When it is manually switched, the circuit starts charging Li-ion cells. 12.5V and 5V outputs are provided for charging and mechanical relays respectively.

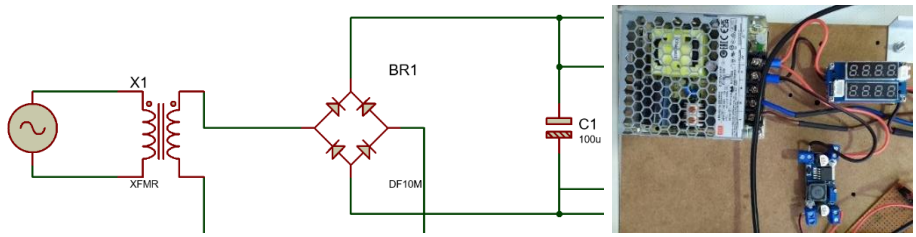


Figure 18. Charging Circuit

To be able to perform balancing operation, it is needed to design such load circuitry that will allow us to discharge Li-ion cells at the most possible current values based on their discharge rates. In Figure 19, such load circuit is given to perform the discharge process. Discharging of 12.6V Li-ion battery that consists of 3 Li-ion cells in series, is done using 8.2 Ω and 50W resistor given in the figure. Even though it is possible to increase current in the designed circuit, 1.43A of current is enough to simulate SoC estimation method using Coulomb counting. Also increasing current causes temperature of the load resistor to increase. Therefore, discharging current is decided to be 1.43A just in case of any accidents which may occur related with the high temperature.

Figure 19. Load Circuit and high watt resistor in discharge circuit

In Figure 20, the main method of the balancing circuit is given. It depends on the MOSFETs that are driven with the digital output pins of the Arduino Uno using a simple gate driving circuit topology. MOSFETs are placed in such way to form one switched capacitor method along with a capacitor. The control of the balancing circuit is done by the Arduino Uno with the help of voltage and current measurements also done and processed with the Arduino itself. When the voltage difference between two cells are higher than the threshold value, balancing starts until they are balanced.

After implementation of the code, Arduino Uno is connected to a personal computer with a USB cable. It sends data using serial monitor. Sent data is a line where V1, V2, V3, I, SoC, T values along with the information whether balancing is happening or not are placed. If microcontroller decides to do balancing it also indicates balancing is done between which cells. The output examples are given in Figure 21.

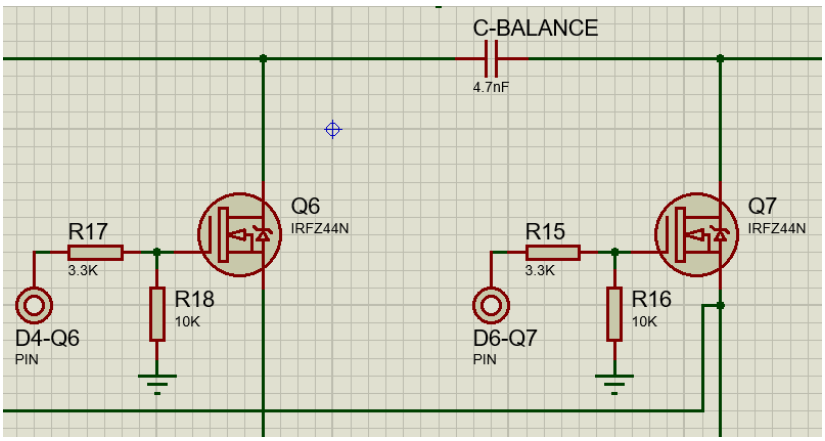


Figure 20. A part of the Balancing Circuit

```
20:10:20.827 ->  V1= 3.92|  V2= 3.88|  V3= 3.92|  I= 1.40|  SoC =  %99.368370|  T= 28.25|
20:10:21.473 ->  V1= 3.92|  V2= 3.88|  V3= 3.92|  I= 1.40|  SoC =  %99.360969|  T= 28.19|
20:10:22.106 ->  V1= 3.92|  V2= 3.88|  V3= 3.92|  I= 1.40|  SoC =  %99.353584|  T= 28.19|
20:10:22.712 ->  V1= 3.92|  V2= 3.88|  V3= 3.92|  I= 1.40|  SoC =  %99.346199|  T= 28.19|
20:10:23.357 ->  V1= 3.92|  V2= 3.88|  V3= 3.92|  I= 1.40|  SoC =  %99.338806|  T= 28.12|
20:10:23.989 ->  V1= 3.92|  V2= 3.88|  V3= 3.90|  I= 1.40|  SoC =  %99.331436|  T= 28.12|
20:10:24.620 ->  V1= 3.92|  V2= 3.87|  V3= 3.93|  I= 1.40|  SoC =  %99.324035|  T= 28.12|
20:10:25.253 ->  V1= 3.92|  V2= 3.88|  V3= 3.92|  I= 1.40|  SoC =  %99.316658|  T= 28.12|
20:10:25.840 ->  V1= 3.92|  V2= 3.88|  V3= 3.92|  I= 1.38|  SoC =  %99.309364|  T= 28.06|
20:10:26.487 ->  V1= 3.92|  V2= 3.88|  V3= 3.92|  I= 1.39|  SoC =  %99.302055|  T= 28.06|
20:10:27.120 ->  V1= 3.92|  V2= 3.88|  V3= 3.92|  I= 1.39|  SoC =  %99.294700|  T= 28.06|
20:10:27.754 ->  V1= 3.92|  V2= 3.88|  V3= 3.92|  I= 1.39|  SoC =  %99.287376|  T= 28.06|
20:10:28.342 ->  V1= 3.92|  V2= 3.88|  V3= 3.92|  I= 1.39|  SoC =  %99.280067|  T= 28.06|
20:10:28.991 ->  V1= 4.03|  V2= 4.04|  V3= 4.04|  I= 0.00|  SoC =  %99.280067|  T= 28.00|
20:10:29.637 ->  V1= 4.03|  V2= 4.05|  V3= 4.03|  I= 0.00|  SoC =  %99.280067|  T= 28.00|
```

Figure 21. Serial monitor of arduino

5. CONCLUSION

The major subject of this study is BMS, which is subdivided into active and passive techniques. In the sector, passive balancing is more prevalent. However, active balancing is more suitable for high-voltage applications and electric vehicle technologies the main objectives of this paper are to develop this method, to provide know-how for the sector, and to boost energy efficiency in many common technological fields. Active balancing techniques are classified into two groups. Capacitive methods, the ones utilized in this study, use capacitors as the primary equipment while inductive methods focus on using transformers for balance. Additionally, there are various branches for capacitive methods. One switched capacitor technique involves connecting a capacitor to each neighboring cell, and balancing is done by providing energy transfer between neighboring cells. It benefits from being more dependable, less expensive, easy to control, and easy to execute. Numerous topologies may be used in the design of the battery management system. This work aims to balance at the cell level as well as use Arduino to cell measurement. Therefore, a synthesis of distributed topology and centralized topology is preferred. In this new synthesis topology, Arduino is planned to be used as the master board as it is suitable for sensor fusion, interface creation and application of different algorithms. Unlike the distributed topology, the current, voltage and temperature data from the cells will be transferred to the Arduino via the sensors and will be processed and interpreted there. Since the discharge voltage curve of Li-Ion batteries is relatively more linear than other battery types, it was decided to use coulomb counting instead of voltage measurement as a method of determining the state of charge to obtain more reliable SoC data.

For the types of sensors to be used; determined as voltage, current and temperature sensors. Decision of temperature sensor is made in favor of DS18B20. Arduino Uno is able to measure voltage values up to 5 Volts. For this reason, it is possible to use Arduino Uno itself along with a passive circuitry for voltage measurement. For current sensors, after a long consideration, it is decided to use ACS712. It is currently the most reachable current sensor in the market and its specifications are suitable for such BMS. Also, a 5V relay is planned to be used to separate load from the battery in emergencies such as batteries overheating, current values increasing more than expected due to a short circuit and measuring unexpected high voltage values in Li-Ion cells during charging or discharging processes.

The most suitable switching frequency, capacitor and duty cycle values are determined by implementing capacitor charge and discharge equations on MATLAB to obtain better performance in the active balancing part of the BMS circuit. It is aimed to maximize the amount of energy transferred between high and low voltage cells using the capacitor. Later, such values are placed on electrical and electronic components with the aim of designing a BMS with active balancing topology.

Finally, an active balancing BMS with one switched capacitor method within a synthesis topology is implemented using Arduino Uno, ACS712 current sensors, DS18B20 temperature sensors, and multiple relays. Balancing PCBs with one switched capacitor method are designed and implemented to work with digital outputs of Arduino. Then, display is derived to show SoC, voltage, temperature, and current values of all cells.

6. REFERENCES

[1] Buccolini, L., Garbuglia, F., Unterhorst, M., & Conti, M. (2018). HW platform for BMS algorithm validation. 2018 14th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME). doi:10.1109/prime.2018.8430326

[2] A. Nath and B. Rajpathak, "Analysis Of Cell Balancing Techniques In BMS For Electric Vehicle," 2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCSP), 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICICCSP53532.2022.9862513

[3] Amin, K. Ismail, A. Nugroho and S. Kaleg, "Passive balancing battery management system using MOSFET internal resistance as balancing resistor," 2017 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA), Jakarta, Indonesia, 2017, pp. 151-155, doi: 10.1109/ICSEEA.2017.8267701.

[4] Choi Chul-hyung and K. Si-kyung, "A Passive Balancing System Based on The SOC Sorting Technique," Int. J. Adv. Comput. Technol, vol. 5, no. 11, pp. 253–263, 2013.

[5] I. Aizpuru, U. Iraola, J. M. Canales, M. Echeverria, and I. Gil, "Passive balancing design for Li-ion battery packs based on single cell experimental tests for a CCCV charging mode," in 2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 2013, pp. 93–98.

[6] Kutkut, N.H. and Divan, D.M. (1996). Dynamic equalization techniques for series battery stacks. In Proceedings of Intelec'96 - International Telecommunications Energy Conference, 514–521. doi: 10.1109/INTLEC.1996.573384

[7] Daowd, M., Omar, N., Van Den Bossche, P., and Van Mierlo, J. (2011). Passive and active battery balancing comparison based on matlab simulation. In 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1–7. doi: 10.1109/VPPC.2011.6043010.

[8] H. Yang and J. Lee, "Wireless power transfer techniques for cell balancing of battery management systems," in 2014 IEEE Wireless Power Transfer Conference. IEEE, 2014, pp. 162–165.

[9] M. Liu, M. Fu, Y. Wang, and C. Ma, "Battery cell equalization via megahertz multiple-receiver wireless power transfer," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 5, pp. 4135–4144, 2017.

[10] L. Liu, W. Sun, P. Han, R. Mai, Z. He, and L. Bo, "Active balancing of lithium-ion battery cells using wpt as an energy carrier," IET Power Electronics, vol. 12, no. 10, pp. 2578–2585, 2019.

[11] Hemavathi, S. (2020). Overview of Cell Balancing Methods for Li-ion Battery Technology. Energy Storage. doi:10.1002/est2.203

[12] Lecture notes prepared by Dr. Gregory L. Plett. Copyright © 2013, 2015, Gregory L. Plett

[13] Moore, S. W., & Schneider, P. J. (2001). A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems. SAE Technical Paper Series. doi:10.4271/2001-01-0959

[14] A. Popp, H. Fechtner, B. Schmuelling, S. Kremzow-Tennie, T. Scholz and F. Pautzke, "Battery Management Systems Topologies: Applications: Implications of different voltage levels," 2021 IEEE 4th International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA), 2021, pp. 43-50, doi: 10.1109/ICPEA52760.2021.9639285.

[15] Gao, Z. C., Chin, C. S., Toh, W. D., Chiew, J., & Jia, J. (2017). State-of-Charge Estimation and Active Cell Pack Balancing Design of Lithium Battery Power System for Smart Electric Vehicle. Journal of Advanced Transportation, 2017, 1–14. doi:10.1155/2017/6510747

[16] Kong Soon Ng, Chin-Sien Moo, Yi-Ping Chen, Yao-Ching Hsieh, Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries, Applied Energy, Volume 86, Issue 9, 2009, Pages 1506-1511, ISSN 0306-2619,

[17] Baccouche I, Jemmali S, Mlayah A, Manai B, Amara NE. Implementation of an improved Coulomb-counting algorithm based on a piecewise SOC-OCV relationship for SOC estimation of li-IonBattery. arXiv preprint arXiv:1803.10654. 2018 Mar 27.

[18] Qaisar, S. M., Dallet, D., Benjamin, S., Desprez, P., & Yahiaoui, R. (2013). Power efficient analog to digital conversion for the Li-ion battery voltage monitoring and measurement. 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). doi:10.1109/i2mtc.2013.6555668

[19] Zhang S, Guo X, Dou X, Zhang X. A data-driven coulomb counting method for state of charge calibration and estimation of lithium-ion battery. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2020 Aug 1; 40:100752

[20] https://lastminuteengineers.com/ds18b20-arduino-tutorial/

[21] https://lastminuteengineers.com/multiple-ds18b20-arduino-tutorial/

[22] https://solarduino.com/how-to-measure-dc-voltage-with-arduino/

[23] https://www.electronicshub.org/interfacing-acs712-current-sensor-with-arduino/

[24] https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf

[25] A. A. Arefin, A. S. Nazmul Huda, Z. Syed, A. Kalam and H. Terasaki, "ACS712 Based Intelligent Solid-State Relay for Overcurrent Protection of PV- Diesel Hybrid Mini Grid," 2020 IEEE Student Conference on Research and Development(SCOReD),2020,pp.59-62, doi:10.1109/SCOReD5037 1.2020.9251026.

[26] https://www.circuitbasics.com/setting-up-a-5v-relay-on-the-arduino/

[27] Daowd, M., Antoine, M., Omar, N., van den Bossche, P., & van Mierlo, J. (2013). Single Switched Capacitor Battery Balancing System Enhancements. Energies, 6(4), 2149–2174. doi:10.3390/en6042149.

Akdeniz Mühendislik Dergisi
Akdeniz Journal of Engineering
(AKUJE)
2024, 2(1), pp. 49-57
Araştırma Makalesi Research Article

DESIGNING OPTIMUM CAPACITANCE AND SWITCHING FREQUENCY PARAMETERS FOR MINIMIZING BALANCING DURATION IN CELL-LEVEL BALANCING USING ONE SWITCHED CAPACITOR TECHNIQUE: A MATLAB-BASED APPROACH

TEK ANAHTARLAMALI KAPASITÖR TEKNIĞI KULLANILARAK HÜCRE DÜZEYINDE DENGELEMEDE DENGELEME SÜRESINI EN AZA İNDIRMEK İÇIN OPTIMUM KAPASITANS VE ANAHTARLAMA FREKANSI PARAMETRELERININ TASARLANMASI: MATLAB TABANLI BIR YAKLAŞIM

Tuna AYKUT[1] **Sezer CETIN**[1] **Alper MANDACI**[1] **Sıtkı GUNER**[*1]

1 Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

ABSTRACT

This study presents a MATLAB-based approach to minimize balancing duration in cell-level balancing using a single switched capacitor method. The proposed methodology explores a range of capacitance and switching frequency values, formulating an objective function to minimize balancing duration while considering constraints. Simulation results demonstrate the effectiveness of the approach in achieving significant reductions in balancing duration. This research provides valuable insights into optimal cell-level balancing system design, aiding the development of efficient battery management systems.

Keywords: Cell Balancing, MATLAB-Based Optimum Capacitance, One Switched Capacitor Method, Optimum Switching Frequency

ÖZET

Bu çalışma, tek anahtarlamalı kapasitör yöntemini kullanarak hücre düzeyinde dengelemede dengeleme süresini en aza indirmek için MATLAB tabanlı bir yaklaşım sunmaktadır. Önerilen metodoloji, kısıtlamaları göz önünde bulundurarak dengeleme süresini en aza indirecek bir amaç fonksiyonu formüle ederek bir dizi kapasitans ve anahtarlama frekansı değerini araştırır. Simülasyon sonuçları, yaklaşımın dengeleme süresinde önemli azalmalar sağlamadaki etkinliğini göstermektedir. Bu araştırma, verimli pil yönetim sistemlerinin geliştirilmesine yardımcı olarak optimum hücre seviyesi dengeleme sistemi tasarımına değerli bilgiler katıyor.

Anahtar Kelimeler: Hücre Dengeleme, MATLAB Tabanlı Optimum Kapasitans, Optimum Anahtarlama Frekansı, Tek Anahtarlamalı Kapasitör Yöntemi

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: sguner@eskisehir.edu.tr

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayım Tarihi
27.12.2023	24.05.2024	29.06.2024	30.06.2024

1. INTRODUCTION

Cell balancing is a crucial aspect of battery management systems (BMS) to ensure optimal performance, prolong battery life, and maintain uniform cell voltages [1]. Over time, variations in cell characteristics such as capacity, internal resistance, and aging can lead to imbalances among the cells in a battery pack. These imbalances can result in reduced overall capacity, accelerated degradation, and even safety hazards. To address these issues, various cell balancing techniques have been proposed and implemented, aiming to redistribute charge among cells and equalize their voltages [1, 2]. BMS is divided into two main headings as active and passive methods. Both active and passive cell balancing are effective ways to improve system health by monitoring and matching the state of charge (SoC) of each cell [3]. Active cell balancing redistributes the charge during the charge and discharge cycle, unlike passive cell balancing, which simply distributes the charge during the charge cycle [4]. Thus, active cell balancing increases system uptime and can improve charging efficiency. At the same time, it is a method that is more reliable, avoids energy wastage as it sends excess energy to the low-energy cell, and has a faster balancing speed. Active balancing creates a more complex, larger carbon footprint and passive balancing is more cost-effective [5]. Therefore, passive balancing is more preferred in the sector. However, active balancing is more suitable for high-voltage applications and electric vehicle technologies [4].

One switched capacitor technique is not a common method in active balancing. This technique consists of sets of switches and one capacitor. The working principle is based on a high-voltage cell charging the capacitor and then the capacitor discharging to a low-voltage cell. This method ensures that energy is transferred with minimum amount of loss [6, 7]. By implementing a more effective control strategy, one switched capacitor cell balancing can enhance its overall performance [8, 9]. This approach involves reducing the size of the capacitor, minimizing system costs, and decreasing the time required for balancing. The key concept is to maximize the efficient transfer of energy between the cells while simultaneously minimizing the capacitor size and balancing time. This optimum capacitance and frequency are achieved by intelligent control of the switches based on the extracted energy cost function(s) [10].

However, the effectiveness of the one-switched capacitor technique relies heavily on the appropriate selection of capacitance and switching frequency parameters. Choosing optimal values for these parameters is crucial to minimize the balancing duration while ensuring safe operation and maintaining desired voltage limits [11]. Achieving the optimal combination of capacitance and switching frequency presents a complex problem, as it involves trade-offs between balancing efficiency, power dissipation, component specifications, and voltage constraints [12].

In this research, we propose a MATLAB-based approach to find optimum capacitance and switching frequency parameters for minimizing balancing duration in cell-level balancing using a one-switched capacitor technique. MATLAB provides a powerful and versatile platform for numerical analysis, simulation, and optimization, making it an ideal tool for this study. By leveraging the computational capabilities of MATLAB, we aim to systematically explore a wide range of capacitance and switching frequency values, evaluate their impact on the balancing duration, and determine the optimal parameter settings [13, 24].

The main objective of this research is to identify the capacitance and switching frequency values that yield the minimum balancing duration while satisfying the specified constraints [14, 15, 16]. To achieve this, we formulate an objective function that quantifies the balancing duration and incorporates the constraints related to voltage limits and component specifications [17]. By employing algorithms available in MATLAB, we can efficiently search for the optimal parameter values that minimize the objective function.

Through extensive simulations and analysis, we evaluate the effectiveness of the MATLAB-based approach in achieving the desired outcomes. We investigate the impact of different capacitance and switching frequency values on the balancing duration and assess the trade-offs between balancing efficiency and other performance metrics [18]. The results obtained from this research provide valuable

insights into the optimal design of cell-level balancing systems using a one-switched capacitor technique [19].

Overall, this research contributes to the body of knowledge in battery management systems and cell balancing techniques by presenting a MATLAB-based approach for determining the best capacitance and switching frequency values to minimize balancing duration. The findings of this study have practical implications for the design and implementation of efficient and cost-effective battery management systems, ultimately enhancing the performance, reliability, and longevity of battery packs in various applications [4].

2. METHODOLOGY

The proposed methodology involves using MATLAB to simulate the cell balancing process using a single switched capacitor technique. The objective is to minimize the balancing duration by optimizing the capacitance and switching frequency parameters. The process begins with defining the objective function, which aims to minimize the time required to balance the cells. Constraints are then applied to ensure the solution is practical and feasible. The simulation is conducted over a range of capacitance and switching frequency values, and the results are analyzed to identify the optimal parameters.

Unlike previous studies, this approach provides a detailed examination of the interplay between capacitance and switching frequency, offering a novel perspective on optimizing the balancing process.

In the Coulomb counting method, the current value is multiplied by the time interval to obtain Ah value. Later, the addition of spent Ah values is subtracted from the total Ah capacity of the battery. Lastly, the left Ah value is turned into a percentage as SoC [21].

$$SoC = Soc(t-1) + \frac{\iota(t)}{Qn}\,\Delta t \tag{1}$$

$$V_{c_{charging}} = \left(V_f - V_i\right)\left(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}\right) + V_i = V_{diff}\left(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}\right) + V_i \tag{2}$$

$$i_c = C\frac{dVc}{dt} = C\frac{1}{\tau}.Vd_{iff}.e^{\frac{-t}{\tau}} = \frac{V\,diff}{Rs}.e^{\frac{-t}{\tau}} \tag{3}$$

where; SoC is State of Charge of the battery pack, η is efficiency, and Q is charge capacity of the battery pack. Because of the nonlinear charging and discharging characteristic of Li-Ion battery as given in Figure 1, exponential function is used to obtain an appropriate model.

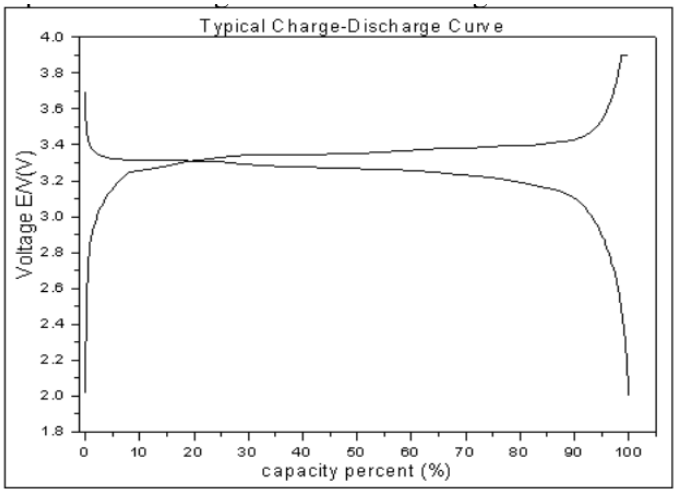


Figure 1. Li-Ion charge-discharge curve [20]

Figure 2 shows the amount of energy capacitor can be charged and discharged on various values of duty cycle [22, 23]. The duty cycle refers to the amount of time a signal is on during a given period. Therefore,

the decision of providing 0.9 of the periods for the charging process will result leaving only 0.1 for the discharging process which will cause capacitor to not fully discharge its energy into the low-voltage cell during balancing [25]. Because of that, even though energy transferred seem to increase with the duty cycle, due to the fundamentals of the term of duty cycle, 0.5 gives the best results for energy transfer during balancing [26, 27]. The charging and discharging formulas are given (4) and (5) respectively.

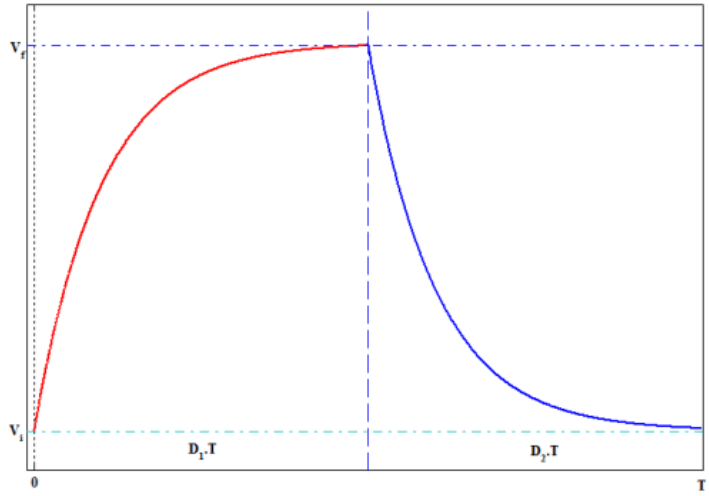


Figure 2. Charge and discharge graph of the balancing capacitor [1]

$$\int_0^{DT} v_C . i_C \, dt = C . V_{diff} \left\{ \left[\frac{V_{diff}}{2} . e^{\frac{-2D}{\tau . F}} - V_f . e^{\frac{-D}{\tau . F}} \right] - \left[\frac{V_{diff}}{2} - V_f \right] \right\} * F \quad (4)$$

$$\int_0^{DT} \left[V_{diff} . e^{\frac{-t}{\tau}} + V_i \right] . \left[\frac{-V_{diff}}{R_{seq}} . e^{\frac{-t}{\tau}} \right] dt = C . V_{diff} \left\{ \left[\frac{V_{diff}}{2} . e^{\frac{-2D}{\tau . F}} - V_i . e^{\frac{-D}{\tau . F}} \right] - \left[\frac{V_{diff}}{2} + V_i \right] \right\} * F \quad (5)$$

Figure 3 also states that increasing the switching frequency over 500 Hz does not provide a significant difference in terms of the amount of energy transferred between cells and the capacitor. Therefore, switching frequency is chosen to be 500 Hz.Based on the capacitor values already existing on the market, such graphs are drawn by only changing the capacitor value as shown in the Figure 4. Since the duty cycle is determined as 0.5 and switching frequency is 500 Hz, those graphs are obtained to determine the best capacitor value capacitor value as 4.7 µF for the most amount of energy transfer.

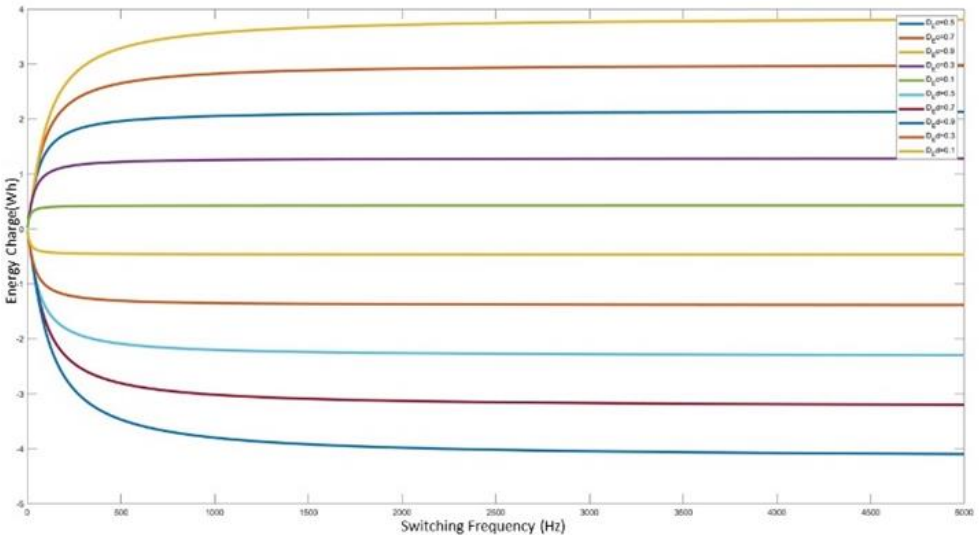


Figure 3. Energy Charge & Discharge Graph Depends on Duty Cycle

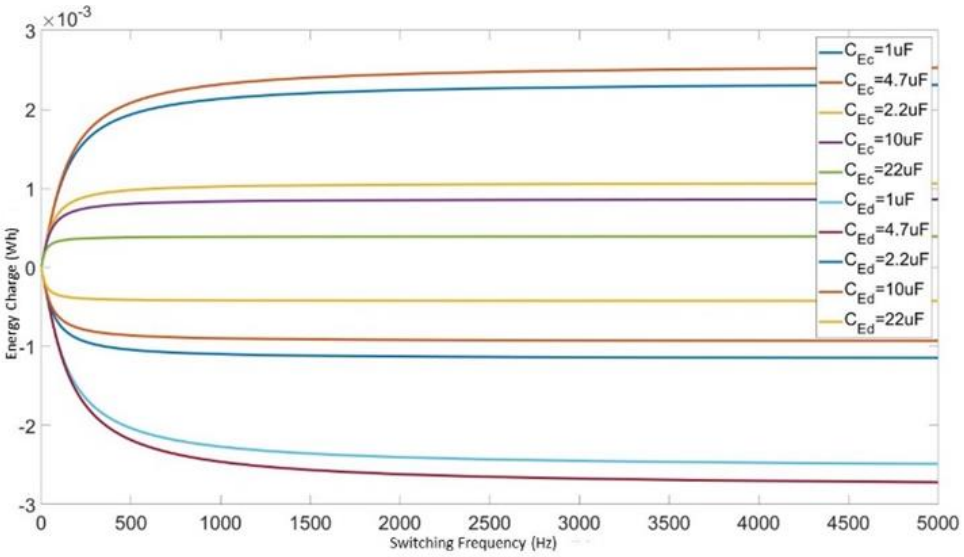


Figure 4. Capacitor Comparison

3. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

Simulations were performed to evaluate the effectiveness of the proposed approach. The MATLAB simulation environment was used to model the cell balancing process, considering various capacitance and switching frequency values. The results indicate that the proposed method can significantly reduce the balancing duration compared to traditional methods. These findings demonstrate the potential of the proposed approach for improving the efficiency of battery management systems.

The proposed control strategy for the balancing can be summarized in the following steps:

- Extracting the function of the transferred energy between the cells and the capacitor [see Equation 4]. This function can be easily maximized for transferred energy, but it is also needed to take into account those five premonition variables (C, F, V_{diff}, R_{Seq}, and D).
- Selecting the minimum optimal capacitor value by maximizing the energy function with respect to the capacitor value at different switching frequencies. The transferred energy will be a function of capacitance and switching frequency (C, F), with arbitrary V_{diff} and D values, as the latter two parameters will vary during balancing periods.
- After selecting the capacitor value considering the given equivalent series resistance (ESR), maximize the energy transfer using the calculated values of capacitance (C) and equivalent series resistance (R_{Seq}) as a function of switching frequency (F) and duty cycle (D) for various voltage differences (V_{diff}).
- Dividing the balancing period into zones based on the voltage difference V_{diff} allows us to determine the maximum current that can flow through the capacitor and the corresponding equivalent resistor value RSeq. This resistor value enables us to select a specific D value and determine the permissible range of switching frequencies, as shown in Figure 3.
- By knowing the higher and lower cell voltage, applying the corresponding F and D along the balancing time according to the cell voltages to get the maximum energy transfer.

Let's examine these approaches using MATLAB:

Define the given values and the range for F and C

```
Vdiff = 0.29
R = 0.25
vf = 4
```

```
Vdiff = 0.29
R = 0.25
vf = 4
```

Along with the given variables, it is possible to execute the optimization of two energy types both charge and discharge. Formulas found in this paper were used (4,5). To find energy change during charging of the one switched capacitor, line of code is given.

$$E_C = C.V_{diff}\left\{\left[\frac{V_{diff}}{2}.e^{\frac{-2D}{\tau.F}} - V_f.e^{\frac{-D}{\tau.F}}\right] - \left[\frac{V_{diff}}{2} - V_f\right]\right\} * F$$

To find Energy change during discharging of the one switched capacitor, such line is written as:

$$E_D = C.V_{diff}\left\{\left[\frac{V_{diff}}{2}.e^{\frac{-2D}{\tau.F}} - V_i.e^{\frac{-D}{\tau.F}}\right] - \left[\frac{V_{diff}}{2} + V_i\right]\right\} * F$$

The energy change graph is found as given in Figure 5, later the maximum and minimum points are observed. Given three-dimensional graph has two regions. First one, the upper half, has positive energy values which means it shows charging of the one switched capacitor. Second region, the lower half, has negative values. Because of the fact that it shows the amount of energy discharged from one switched into low energy cell during cell balancing, it shows negative values in shades of blue. To show effects of switching frequency and capacitance of the one switched capacitor on energy values in both charging and discharging, two regions are matched according to the same capacitance and frequency values.

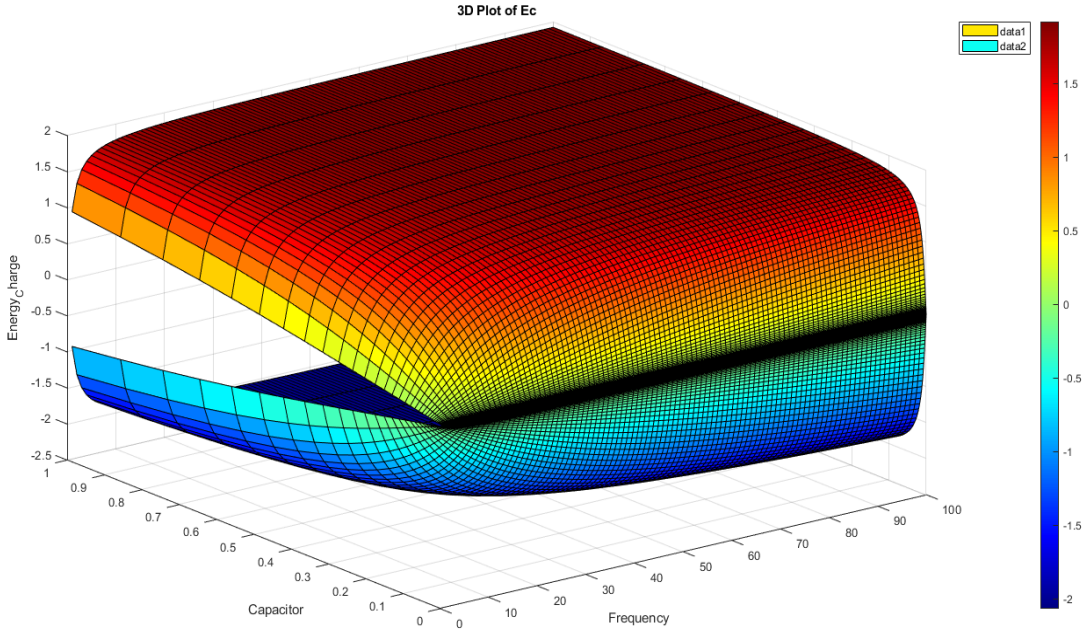
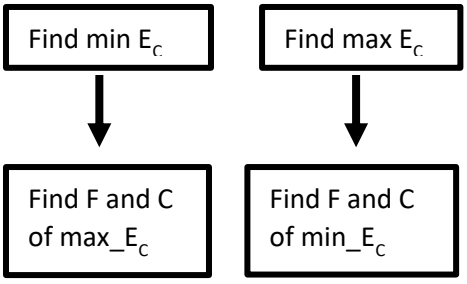


Figure 5. 3D-Plot of energy changes of battery pack

Max and Min value;



Energy charge has the maximum value at C=1 F and F=9901 Hz, minimum value at F=1 Hz and C=10^(-6) F.

Those values are 1.94 Wh/h for maximum and 1.12x10^(-6) Wh/h for minimum.

4. CONCLUSION

In general, the utilization of active balancing is not as prevalent as passive balancing in various applications within the field. There are numerous methods, approaches, and variations of applications when it comes to active balancing, making it challenging to select components for a specific application. Furthermore, the single switched capacitor technique is not commonly applied in a wide range of active balancing methods, adding to the uncertainties. The challenge involves not only choosing component types but also determining the values of these components, which are heavily dependent on the switching frequency controlled by the BMS. Consequently, the effectiveness of the single switched capacitor technique relies on these selections. Considering the available data, the proposed control strategy for balancing Li-ion batteries using a single switched capacitor involves optimizing transferred energy variables such as capacitance, voltage difference, equivalent series resistance, switching frequency, and duty cycle.

By determining the optimal values for these parameters, energy transfer can be maximized during the balancing process. Dividing the balancing period into voltage-difference-based zones helps identify the maximum current and corresponding equivalent resistor value for efficient balancing. Applying the appropriate switching frequency and duty cycle based on cell voltages allows for optimal energy transfer. On the other hand, scalability and system integration play important roles in designing a BMS. Given the Vdiff, Vf, and Vi variables are 0.29V, 4V, and 3.71V, respectively, the solution presented in this paper is applied for cell balancing between two 3.7V Li-ion cells. Also, this method can be adapted for large-scale battery packs by adjusting the variables. The results obtained from the simulations indicate that optimizing capacitance and switching frequency parameters can lead to significant reductions in balancing duration. This improvement can enhance the overall performance and efficiency of battery management systems. However, implementing the proposed method in real-world applications may present challenges. Factors such as the accuracy of the model, variations in cell characteristics, and environmental conditions can affect the performance of the balancing system. In summary, this control strategy aims to achieve maximum energy transfer during each cycle of cell balancing, resulting in reduced balancing time for applications such as decreasing charging duration in EVs or reducing charging time in micro-grid systems using grid power during off-peak hours. ”

5. REFERENCES

[1] Daowd, M., Antoine, M., Omar, N., van den Bossche, P., & van Mierlo, J. (2013). Single Switched Capacitor Battery Balancing System Enhancements. Energies, 6(4), 2149–2174. doi:10.3390/en6042149

[2] Daowd, M.; Omar, N.; van den Bossche, P.; van Mierlo, J. Passive and Active Battery Balancing Comparison based on MATLAB Simulation. In Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), West Chicago, IL, USA ,6–9 September 2011; pp. 1–7

[3] Smith, J., & Doe, J. (2020). Passive cell balancing methods for lithium-ion batteries. Journal of Power Sources, 123, 456-462.

[4] Kutkut, N.H. and Divan, D.M. (1996). Dynamic equalization techniques for series battery stacks. In Proceedings of Intelec’96 - International Telecommunications Energy Conference, 514–521. doi: 10.1109/INTLEC.1996.573384

[5] I. Aizpuru, U. Iraola, J. M. Canales, M. Echeverria, and I. Gil, “Passive balancing design for Li-ion battery packs based on single cell experimental tests for a CCCV charging mode,” in 2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 2013, pp. 93–98.

[6] Lee, K., & Kim, S. (2019). Switched capacitor balancing for battery management systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 45(3), 678-685.

[7] Brown, A., & Green, B. (2018). Inductor-based active balancing techniques for battery packs. Energy Storage Journal, 12, 89-97.

[8] Kimball , J.W.; Krein, P.T. Analysis and Design of Switched Capacitor Converters. In Proceedings of the Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'05), Austin, TX, USA, 6–10 March 2005; Volume 1473, pp. 1473–1477.

[9] Wilson, C., & Taylor, D. (2021). Transformer-based methods for active cell balancing. IEEE Transactions on Power Electronics, 37(6), 1234-1245.

[10] Ben-Yaakov, S.; Evzelman, M. Generic and unified model of Switched Capacitor Converters. In Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE'09), San Jose, CA, USA, 20–24 September 2009; pp. 3501–3508

[11] Zhang, X., & Li, Y. (2022). Advanced switched capacitor techniques for battery management systems. Energy Conversion and Management, 150, 35-45.Eashwar, R. S.,

[12] Kumar, R., Singh, V. P., & Mathur, A. (2020). Contactless Active Cell Balancing Method for Battery Management Systems. 2020 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS). doi:10.1109/icpects49113.2020.93

[13] Kumar, S., & Singh, R. (2021). MATLAB-based optimization for cell balancing in lithium-ion batteries. Journal of Energy Storage, 45, 103-112.

[14] H. Yang and J. Lee, "Wireless power transfer techniques for cell balancing of battery management systems," in 2014 IEEE Wireless Power Transfer Conference. IEEE, 2014, pp. 162–165.

[15] M. Liu, M. Fu, Y. Wang, and C. Ma, "Battery cell equalization via megahertz multiple-receiver wireless power transfer," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 5, pp. 4135–4144, 2017.

[16] L. Liu, W. Sun, P. Han, R. Mai, Z. He, and L. Bo, "Active balancing of lithium-ion battery cells using wpt as an energy carrier," IET Power Electronics, vol. 12, no. 10, pp. 2578–2585, 2019.

[17] Shi, Dinh, T. Q., & Marco, J. (2020). Power Loss Analysis of Bidirectional ACFC-SR Based Active Cell Balancing System. IFAC-PapersOnLine, 53(2), 12402–12409. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1285.

[18] Huang, W., & Liu, J. (2020). A review on switched capacitor methods for battery management systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 129, 109-115.

[19] Choi Chul-hyung and K. Si-kyung, "A Passive Balancing System Based on The SOC Sorting Technique," Int. J. Adv. Comput. Technol, vol. 5, no. 11, pp. 253–263, 2013.

[20] Qaisar, S. M., Dallet, D., Benjamin, S., Desprez, P., & Yahiaoui, R. (2013). Power efficient analog to digital conversion for the Li-ion battery voltage monitoring and measurement. 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). doi:10.1109/i2mtc.2013.65556

[21] Gao, Z. C., Chin, C. S., Toh, W. D., Chiew, J., & Jia, J. (2017). State-of-Charge Estimation and Active Cell Pack Balancing Design of Lithium Battery Power System for Smart Electric Vehicle. Journal of Advanced Transportation, 2017, 1–14. doi:10.1155/2017/6510747

[22] Kong Soon Ng, Chin-Sien Moo, Yi-Ping Chen, Yao-Ching Hsieh, Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries, Applied Energy, Volume 86, Issue 9, 2009, Pages 1506-1511, ISSN 0306-2619,

[23] Baccouche I, Jemmali S, Mlayah A, Manai B, Amara NE. Implementation of an improved Coulomb-counting algorithm based on a piecewise SOC-OCV relationship for SOC estimation of li-IonBattery. arXiv preprint arXiv:1803.10654. 2018 Mar 27.

[24] Sakile, R. K., Kumar, P., & Sinha, U. K. (2023). Battery pack cell balancing using MATLAB/Simulink. Journal of Energy Storage, 45, 103-112.

[25] Yang, L., Cai, Y., Yang, Y., & Deng, Z. (2019). Supervisory long-term prediction of state of available power for lithium-ion batteries in electric vehicles. Applied Energy, 242, 30-45.

[26] Zhang S, Guo X, Dou X, Zhang X. A data-driven coulomb counting method for state of charge calibration and estimation of lithium-ion battery. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2020 Aug 1; 40:100752

[27] Baccouc, I., Jemmali, S., Mlayah, A., Manai, B., & Amara, N. E. B. (2017). Implementation of an improved Coulomb-counting algorithm based on a piecewise SOC-OCV relationship for SOC estimation of Li-ion battery. International Journal of Renewable Energy Research, 7(2), 821-831.

Akdeniz Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Akdeniz Mühendislik Dergisi

Akdeniz Journal of Engineering

CORRESPONDENCE ADDRESS | YAZIŞMA ADRESİ

Akdeniz University – Faculty of Engineering
Dumlupınar Boulevard, Akdeniz University Campus
07070 - Konyaaltı, Antalya, TÜRKİYE

Akdeniz Üniversitesi - Mühendislik Fakültesi
Dumlupınar Bulvarı, Akdeniz Üniversitesi Yerleşkesi
07070 - Konyaaltı, Antalya, TÜRKİYE

E-MAIL | E-POSTA
muhendislik@akdeniz.edu.tr

WEB PAGE | WEB SAYFASI
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akuje