**SÜPERKAPASİTÖRLER**

**Süperkapasitörler**

Süperkapasitörler, enerji depolama sistemleri arasında yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj-deşarj özellikleri ve uzun çevrim ömrü gibi avantajları sayesinde kritik bir konuma sahiptirler. Geleneksel kapasitörler ile bataryalar arasında bir yerde konumlanan bu cihazlar, ani enerji taleplerini karşılayabilme yetenekleri sayesinde birçok endüstriyel ve taşınabilir uygulama için ideal çözümler sunmaktadır (Şekil 1). Özellikle elektrikli taşıtlar, yenilenebilir enerji sistemleri ve giyilebilir teknolojiler gibi alanlarda süperkapasitörlerin rolü gün geçtikçe artmaktadır.

metin, ekran görüntüsü, diyagram, çizgi içeren bir resim

Açıklama otomatik olarak oluşturuldu

**Şekil 1.** Kapasitör, süperkapasitör ve bataryaların özelliklerinin karşılaştırılması.

**Süperkapasitör Çeşitleri**

Süperkapasitörler başlıca üç sınıfa ayrılırlar:

* Elektrik Çift Katmanlı Kapasitörler (EDLC’ler): Karbon bazlı elektrotlarla çalışır ve enerji depolama fiziksel adsorpsiyon yoluyla gerçekleşir. Faradayik olmayan bu sistemler yüksek çevrim ömrüne sahiptir.
* Psödokapasitörler: Metal oksitler, iletken polimerler ve sülfür bazlı elektrotlar içerir. Redoks reaksiyonlarına dayalı faradayik süreçlerle çalışır. Spesifik kapasitansları yüksektir ancak döngü kararlılıkları EDLC'lere göre sınırlıdır.
* Hibrit Süperkapasitörler: EDLC ve psödokapasitörlerin avantajlarını birleştirmeyi hedefleyen sistemlerdir. Asimetrik tasarımları ile geniş potansiyel penceresi ve yüksek enerji yoğunluğu sunarlar.

Tablo 1'de süperkapasitörlerin çeşitlerine göre karşılaştırılmaları verilmektedir.

**Tablo 1.** Süperkapasitör Çeşitlerinin Karşılaştırılması.

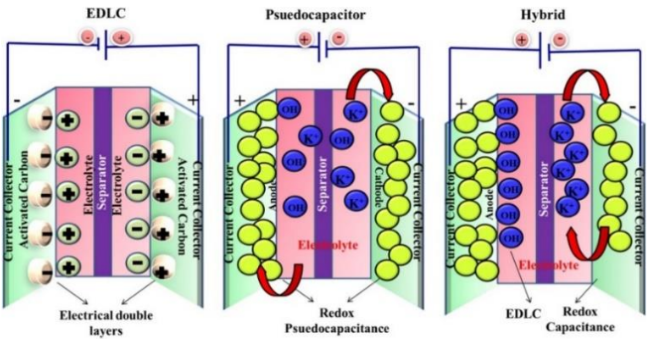
| **Süperkapasitör Tipi** | **Elektrot Malzemesi** | **Şarj Depolama Mekanizması** | **Avantajlar/**  **Eksiklikler** |
| --- | --- | --- | --- |
| EDLC | Karbon Materyaller | Elektrik çift katmanlı (EDL),  Faradayik olmayan süreç | *Düşük spesifik kapasitans Yüksek güç yoğunluğu*  *Yüksek döngü kararlılığı* |
| Psödokapasitör | Metal Oksit/Hidroksit/Sülfür, İletken Polimerler | Redoks reaksiyonu,  Faradayik süreç | *Yüksek spesifik kapasitans*  *Orta güç yoğunluğu*  *Düşük döngü kararlılığı* |
| Hibrit kapasitör | Metal Oksit/Hidroksit/Sülfür, İletken Polimerler/Karbon Materyaller | Asimetrik Hibrit:  Anot: Redoks reaksiyonu, Katot: EDL  Simetrik kompozit hibrit:  Redoks reaksiyonu ve EDL  Batarya Benzeri Hibrit:  Anot: Litiasyon/Delitiasyon, Katot: EDL | *Yüksek spesifik kapasitans*  *Yüksek güç yoğunluğu*  *Orta döngü kararlılığı*  *Yüksek spesifik kapasitans*  *Orta güç yoğunluğu*  *Yüksek döngü kararlılığı*  *Yüksek spesifik kapasitans*  *Orta döngü kararlılığı*  *Yüksek maliyet* |

**Süperkapasitörlerin Çalışma Prensibi**

Süperkapasitörlerin çeşitlerine bağlı olarak enerji depolama mekanizmaları belirgin şekilde farklılık göstermektedir (Şekil 2). Elektrik çift katmanlı kapasitörlerde (EDLC), enerji depolama süreci elektrot-elektrolit arayüzeyinde gerçekleşen iyonik yük birikimine dayanır. Dış elektrik alan etkisiyle elektrolit içerisindeki katyon ve anyonlar, elektrot yüzeyine elektrostatik kuvvetlerle yönelerek çift katman oluşturur. Bu süreç yalnızca fiziksel adsorpsiyonla sınırlı olduğundan elektrot yapısında kimyasal bir değişim meydana gelmez. Bu sayede EDLC’ler yüksek döngü ömrü ve uzun kullanım süresi sunar. Ancak, enerji depolama yalnızca yüzey etkileşimleri ile gerçekleştiği için kapasiteleri görece düşüktür.

Buna karşın, psödokapasitörler enerji depolamayı elektrot yüzeyinde gerçekleşen tersinir redoks reaksiyonları ve iyon adsorpsiyon/desorpsiyon süreçleri aracılığıyla gerçekleştirir. Bu mekanizma sayesinde daha yüksek spesifik kapasiteler elde edilebilir. Geçiş metal oksitleri, hidroksitler ve sülfürler gibi aktif malzemeler bu tür kapasitörlerde yaygın olarak kullanılır. Ancak redoks reaksiyonlarına eşlik eden iyon giriş/çıkışı, elektrot malzemelerinde hacimsel genleşme ve yapısal bozulmalara yol açabilir. Bu da zamanla kapasite kaybına ve döngü kararlılığının azalmasına neden olur.

Hibrit süperkapasitörler ise EDLC ve psödokapasitif yapıların avantajlarını bir araya getirerek hem yüksek enerji yoğunluğu hem de uzun döngü ömrü sunmayı hedefler. Bu yapılarda genellikle bir elektrot hızlı ve kararlı fiziksel süreçlerden (EDLC), diğer elektrot ise yüksek kapasiteli kimyasal süreçlerden (psödokapasitör) sorumludur. Böylece, cihazın çalışma gerilim aralığı genişletilerek enerji yoğunluğu artırılır. Ancak iki farklı elektrot malzemesinin reaksiyon kinetikleri ve iyon taşınım hızlarının uyumsuz olması durumunda, cihazın genel performansı sınırlı kalabilmektedir.

****

Şekil 2. Farklı tipteki süperkapasitörlerin enerji depolama mekanizmaları.

**Süperkapasitörlerin Kullanım Alanları**

Günümüzde artan enerji ihtiyacı ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımı ve bu enerjinin verimli bir şekilde depolanması büyük önem taşımaktadır. Rüzgâr, güneş, hidroelektrik, okyanus, biyokütle ve jeotermal gibi çevre dostu enerji kaynakları ile entegre çalışabilen süperkapasitörler, yüksek güç yoğunluğu ve uzun çevrim ömürleri sayesinde enerji depolama alanında öne çıkan teknolojilerden biridir. Süperkapasitörler yalnızca yenilenebilir enerji sistemlerinin desteklenmesinde değil; mobil elektronik cihazlar, robotik sistemler, hızlı şarj edilebilen elektrikli araçlar, giyilebilir biyosensörler ve binalarda güç kaynağı uygulamaları gibi birçok farklı kullanım alanında kendine yer bulmaktadır (Şekil 3).

Teknolojinin hızla ilerlemesi ve küresel ekonomik gelişmelerle birlikte, birçok sektörde yapay zekâ destekli ekipmanlara olan talep giderek artmaktadır. Bu alanlara örnek olarak akıllı robotlar, akıllı sensörler ve yenilikçi enerji depolama sistemleri verilebilir. Örneğin, robotlar tıp, sanayi, askeriye ve uzay araştırmaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu nedenle, robotların çeşitli iş yüklerini uzun süre boyunca verimli ve güvenilir şekilde karşılayabilecek akıllı bir güç kontrol sisteminin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Şekil 4’te süperkapasitörlerin farklı cihazlardaki uygulamaları ile bir süperkapasitörle çalışan protez elli akıllı robot örneği gösterilmektedir.

Bu çok yönlü kullanım kabiliyeti, süperkapasitörleri geleceğin enerji sistemlerinde kilit bir bileşen haline getirmektedir.

metin, tasarım içeren bir resim

Yapay zeka tarafından oluşturulmuş içerik yanlış olabilir.

Şekil 3. Yenilenebilir enerjiler ve süperkapasitör uygulamaları.

metin, müzik aleti, gitar, müzik içeren bir resim

Yapay zeka tarafından oluşturulmuş içerik yanlış olabilir.

Şekil 4. Farklı taşınabilir cihazlarda süperkapasitör uygulamaları.

**CÜNAM’ın Projeleri**

Süperkapasitör performansında elektrot malzemesinin rolü belirleyicidir. Yüksek yüzey alanına sahip, kimyasal olarak kararlı ve iletkenliği yüksek malzemeler tercih edilmektedir. Buna örnek olarak manganez dioksit (MnO₂), çevre dostu yapısı, düşük maliyeti ve yüksek teorik kapasitansı (~1370 F g⁻¹) sayesinde öne çıkan bir malzemedir.   
CÜNAM bünyesinde yürütülen “Mo ve V ile Katkılanmış MnO₂ Elektrotlar ile Yüksek Performanslı Asimetrik Süperkapasitör Geliştirilmesi” adlı TÜBİTAK 3501 destekli projede geliştirilecek olan süperkapasitörde; Molibden (Mo) katkısı, MnO₂'nin redoks kapasitesini artırarak pozitif elektrotun performansını güçlendirirken; vanadyum (V) katkısı ise iyon taşınımını hızlandırarak negatif elektrotun daha geniş potansiyel aralıklarında stabil çalışmasını sağlayacaktır.

**Üretim ve Karakterizasyon Yaklaşımı**

Merkezimizde bulunan NVTS-500 Sputter/Termal İnce Film Kaplama Sistemi ile süperkapasitör elektrotları reaktif RF/DC magnetron saçtırma yöntemiyle üretilebilmektedir. Bu yöntem, çözelti temelli yöntemlere kıyasla daha homojen, kontrollü ve tekrarlanabilir film büyütme süreçleri sunmaktadır.

Üretilen filmler XRD, AFM, Raman, SEM ve EDX gibi karakterizasyon teknikleri ile incelenmekte; elektrokimyasal performans analizleri ise CV, GCD ve EIS yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir.

**Gelecek Perspektifi ve Araştırma Alanlarımız**

Süperkapasitör teknolojileri üzerine yürütülen çalışmalar, malzeme mühendisliği, elektrokimya ve nanoteknoloji disiplinlerinin kesişiminde yer almakta ve merkezimizin disiplinlerarası araştırma kapasitesini güçlendirmektedir. Geliştirilen elektrotlar ve cihazlar sadece laboratuvar ölçeğinde değil, ileriye dönük ölçeklenebilir enerji depolama çözümleri olarak da değerlendirilmektedir.  
Merkezimizin süperkapasitör araştırmaları; yüksek enerji yoğunluğu, uzun döngü ömrü ve çevresel sürdürülebilirlik gibi kriterleri karşılayan yeni nesil enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesine katkı sunmayı hedeflemektedir.

**Kaynaklar**

1. Öztürk, O. Nikel Sülfür Tabanlı Hibrit Süperkapasitör Aygıt Geliştirilmesi, Doktora Tezi, 2024.

2. Conway, B. E. Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications. Springer, 1999.

3. Zhi, M., Xiang, C., Li, J., Li, M. ve Wu, N. Nanostructured carbon–metal oxide composite electrodes for supercapacitors: a review. Nanoscale, 5(1), 72-88, 2013.

4. Zhang, J., Gu, M., Chen, X. Supercapacitors for renewable energy applications: A review. Micro and Nano Engineering, 100229, 2023.

5. https://www.ntchip.com/electronics-news/what-is-a-supercapacitor