

## POLİMERLERİN ELEKTRİK İLETKENLİĞİ

*Kübra KARABACAK\** 

*İbrahim Berk ÇAVUŞ\** 

*Onur KIYILI\** 

Alınma: 02.06.2022 ; düzeltme: 05.11.2022 ; kabul: 15.11.2022

**Öz:** İletken polimerler ve karışımları, diğer iletken malzemelerle kıyaslandığında, düşük yoğunluğa sahip, korozyon direnci yüksek işlenmesi kolay, düşük maliyetli ve kullanılan katkılarla birlikte metal ile kıyaslanabilir özellikte iletkenlik değerine sahip olmaktadır. Son yıllarda, metal – plastik değişimi üzerine birçok Ar-Ge çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalarda, havacılık, uzay ve savunma sanayi, otomotiv ve otomotiv yan sanayinde kullanılmak üzere önemli polimer ve karışımları geliştirilmiştir. Metallerin en önemli özelliklerinden elektrik iletkenliği, elektromanyetik kalkanlama ve radyasyon emme, geliştirilen polimer ve karışımları ile sağlanabilmektedir. Polimer malzemelerin diğer avantajları ile, gelecekte bu sektörlerde daha fazla metalin yerini alacaktır. Bu çalışmada, polimerler ve karışımlarının elektriksel özellikleri ile ilgili özellikle son yıllarda yapılan ulusal ve uluslararası araştırma makaleleri derlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İletken Polimerler, Kompozit, Elektriksel İletkenlik, Elektromanyetik Kalkanlama

### Electrical Conductivity of The Polymers

**Abstract:** Conductive polymers and their blends are compared to other conductive materials, they significantly lighter, good corrosion resistance, easy processability, cost effective and they are comparable with metals. Recent years, lots of R&D works have been conducting for the metal - plastic replacement. These developed materials will be used for aviation, space and defence industry, automotive and automotive subsidiary industry. The most important aspects of the metals are electrical conductivity, electromagnetic interference and radiation shielding are provided with using improved polymers and their blends. Polymers along with their other advantages will replace the metal in the future. In this study, national and international research articles have been compiled on the electrical properties of polymers and their blends, especially in recent years.

**Keywords:** Conductive Plastics, Composite, Electrical Conductivity, Electromagnetic Interference

## 1. GİRİŞ

2000 yılların başlarında keşfedilen iletken polimer teknolojileri günümüzde elektronikten, enerjiye, savunmadan otomotive birçok sektörde kullanım alanı bulmuştur. Çeşitli modifikasyonlarla iletken polimerlerin, iletkenlik özelliklerinin bazı metal tiplerine yakınlaştırılabilmiş olmasıyla birlikte korozyona karşı dayanım, hafiflik, üretilebilirlik başta

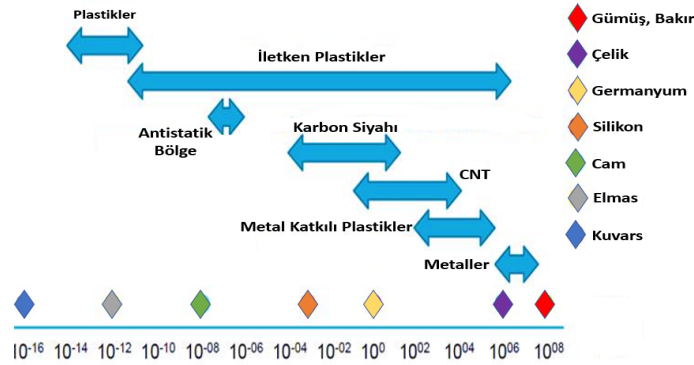
\*16245 Epsan Plastik, Ali Osman Sönmez Cd. No:16  
İletişim Yazarı: Onur KIYILI (onurkiyili@gmail.com)

olmak üzere metal alternatiflere kıyasla pek çok avantaj sunması bu konudaki akademik ve endüstriyel çalışmalara da hız kazandırmıştır. İletken polimerler aşağıdaki gibi farklı gruplar üzerinden incelenebilmektedir.

- İletken dolgulu polimer
- İyonik olarak iletken polimer
- Yük transfer polimeri
- Konjüge iletken polimer

Sıfır emisyon hedefine en önemli katkıyı sağlayacak olan elektrikli otomobiller için hafiflik kriteri neticesinde metal- plastik değişimi ön plana çıkmıştır. Ancak bu değişim polimerlerin elektrik ve ısı iletme özelliğine sahip olmamasından dolayı polimerlerin kullanım alanını kısıtlamaktadır. Elektrik iletkenliğinin gerekçesi ise EMI (Elektromanyetik Parazit) önlenmesinde en önemli faktörü olmasıdır.

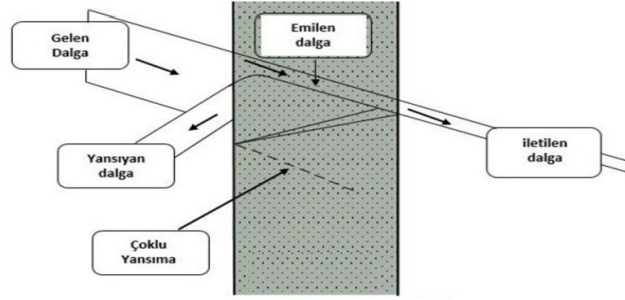
Metallerin yüksek mukavemet, sertlik, aşınma dayanımı vb. özelliklerinin yanısıra otomotiv ve diğer sektörlerde kullanılmasının en önemli nedenlerinden biri de çok iyi elektrik iletim katsayısına sahip olmalarıdır. Ancak ağırlık faktörü, çok iyi elektrik iletken olmalarına rağmen metallerin kullanılmasını sınırlamaktadır. Metallerin elektrik iletkenlikleri  $10^6$ - $10^8$  S/m arasında değişmektedir. Polimerlere elektrik iletkenliğinin kazandırılmasında kullanılan CNT (Karbon Nanotüp) elektrik iletkenliği ise  $1$ - $10^4$  S/m aralığındadır. Polimerlerin elektrik iletkenliği  $10^{-16}$ - $10^{-14}$  S/m aralığında değişmektedir. Elektrik iletkenliği ve elektrik direnci birbirlerinin zıttı olan tanımlardır ve ters orantılıdır.  $10^{14}$   $\Omega$  üzerindeki elektrik direncine sahip olan malzemeler yalıtkan malzemelerdir.  $10^4$ - $10^6$   $\Omega$  aralığı yarı iletken olarak sınıflandırılmakta ve  $10^4$   $\Omega$  değerinden düşük dirençler ise iletken malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır.



**Şekil 1:**  
*Metal ve Metal Olmayan Malzemelerin Elektrik İletkenliği*

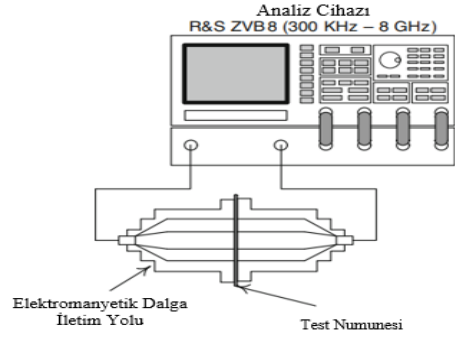
Elektrikli araçlarda EMI, V2V (Araçların Birbirleriyle Entegrasyonu) sistemine zarar vermektedir. EMI, elektrik ile çalışan iki cihazın birbirlerinin yaymış olduğu elektromanyetik parazitlerden etkilenerek, işlevini yerine getirememeye, işlevini eksik yerine getirebilme gibi sorunlara yol açmaktadır. Uçakların kalkış ve iniş anında tüm elektrikli cihazların kapatılması talebi bu sebeptendir. Geçmişte bu faktörlerden, en iyi elektrik iletkeni, metaller ile korunulurken, günümüzde hafifliğin ön planda olduğu tasarımlarda yönelim olmuştur. Bu yönelimi gerçekleştirebilmek için birçok Ar-Ge çalışması yapılmış ve polimerlere elektrik iletkenliği özelliği kazandırılmaya çalışılmıştır.

EMI kalkanlama, malzeme üzerinde üç şekilde gerçekleşmektedir. EMI kalkanlama esasında, elektromanyetik dalgalar malzeme üzerinden yansyarak, emilerek ve ikincil (iç) yansımalara uğrayarak azaltılabilirler. Bu faktörlerin toplamı SE (kalkanlama etkinliği) değerini belirler ve birimi desibeldir (dB).

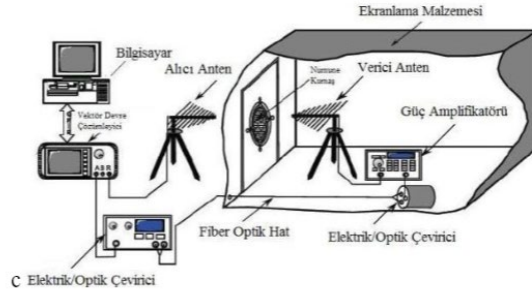


**Şekil 2:**  
*EMI Kalkanlama Teorik Şeması (Altun,2017)*

SE değerinin ölçülmesi için belirlenen standartlardan bazıları ASTM D4935 ve MIL-STD-285'dir. ASTM D4935 30 MHz ve 1,5 GHz frekans aralığı içerisindeki kalkanlama değeri, MIL-STD-285 ise 10 KHz ile 10 GHz arasındaki frekansların kalkanlama değeri ölçülebilmektedir. İki standartta birbirine benzer şekilde ölçüm gerçekleştirilmektedir. İzole edilmiş bir alan içerisinde, dışarıya doğru gönderilen elektromanyetik dalgaların ne kadarının parça üzerinden dışarıya geçtiği prensibine dayanır.



**Şekil 3:**  
*ASTM D4935 Görsel Anlatım (Zhang,2013)*



**Şekil 4:**  
*MIL-STD-285 Görsel Anlatım (Więckowski, 2006)*

Bu derleme çalışmasında polimerlere farklı yöntemler ile elektrik iletken özellik kazandırılmasıyla ilgili çalışmalar ele alınmıştır.

## 2. TERMOPLASTİKLERİN ELEKTRİK İLETKENLİĞİ

Gao ve diğ. (2015) yaptığı bir çalışmada, düşük maliyetli bir kompozit jel-polimer/cam-fiber elektrolitin, cam elyaf kâğıt ile güçlendirilmesi ve mekanik ve yüzey özellikleri için polidopamin kaplama ile modifiye edilmesi ile poli-(viniliden florür-ko -heksafl uoropropilen) (PVDF-HFP)'nin sodyum iyon bataryaya uygulanabileceği gösterilmiştir. Kompozit polimer matrisi, 200 °C'ye kadar mükemmel mekanik mukavemet ve ısı kararlılık sergilemiştir. Sıvı bir elektrolit ile doyurulduktan sonra, kompozit jel-polimer/cam elyaf elektrolit için geniş bir elektrokimyasal pencere ve yüksek iyonik iletkenlik elde edilmiştir. Katot olarak  $\text{Na}_2\text{MnFe}(\text{CN})_6$  kullanılarak bir sodyum (Na) iyon pilde test edildiğinde, hız kapasitesi, döngü performansı ve kulombik verimlilik önemli ölçüde geliştirilmiştir. Sonuçlar, kompozit polimer elektrolitin, güvenlik ve maliyetin ana endişeler olduğu büyük ölçekli bir pil sistemi için çok çekici bir ayırıcı olduğunu göstermektedir.

Cam elyaf (GF) kâğıt ilk olarak plastik bir plaka üzerine sabitlenmiş ve aseton içinde çözülmüş bir PVDF-HFP çözeltisi ile kaplanmış. Kurutulduktan sonra, GF kâğıdın diğer tarafı da aynı işlemle GF/PVDF-HFP membranının oluşturulması için kaplanmış (kalınlık: 0,2 mm, ağırlık: 42,6 mg). Polidopamin kaplama, GF/PVDF-HFP'nin altı saat boyunca bir dopamin çözeltisine (2 mg  $\text{mL}^{-1}$ ) daldırılmasıyla elde edilmiş; çözeltinin pH'ı, bir Tris-HCl tamponu ile yaklaşık 8,5'e ayarlanmış. GF/PVDF-HFP/PDA daha sonra su ve etanol ile birkaç kez durulanmıştır. Vakum altında 80 °C'de 24 saat kurutulduktan sonra, GF/PVDF-HFP ve GF/PVDF-HFP/PDA (kalınlık: 0,2 mm, ağırlık: 43,2 mg), daha ileri ölçümler için jel-polimer/cam-fiber elektrolitleri elde etmek için bir eldiven kutusunda 12 saatten fazla propilen karbonat içindeki  $\text{NaClO}_4$  (1.0 M) elektrolitine batırılmıştır. Cam elyaf kâğıt, PVDF-HFP ve polidopamin kaplamanın rasyonel bir kombinasyonu ile bileşik bir jel polimer elektrolit geliştirilmesine yönelik bütünleşmiş bir strateji geliştirilmiş ve düşük maliyetli bir Na-iyon pilin gerçekleştirilmesi için bir yaklaşım sunulmuştur. GF kâğıdın dahil edilmesi, iyi mekanik mukavemete ve mükemmel ısı kararlılığına sahip kompozit jel-polimer elektrolitler sağlanmış. Polidopamin kaplama ile çeşitli elektrot yapılarıyla çalışmaya uygun geniş bir elektrokimyasal pencere sağlanmış ve sıvı elektrolitlerinkine yaklaşan jel-polimer elektrolitlerin iyonik iletkenliğini geliştirmek için de etki göstermiştir. Jel-polimer elektrolitlerin kullanılması, katot olarak  $\text{Na}_2\text{MnFe}(\text{CN})$  ile sodyum iyon yarı hücrelerinin elektrokimyasal performansını önemli ölçüde artırmıştır.

Hwang (2016)'ın yaptığı çalışmada karbon elyaf (CF) yüklemesinin, katı ve köpüklü polibütilen tereftalat (PBT)/CF kompozitlerinin elektriksel iletkenliği, EMI, ekranlama etkinliği (SE) ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırılmıştır. Kompozitler, ağırlıkça %13 CF takviyesi ile çift vidalı ekstrüzyon ile hazırlanmıştır. Ağırlıkça %1, %3, %5, %8 ve %13 CF içeren kompozit numuneler, katı ve köpüklü enjeksiyon kalıplama işlemi ile üretilmiştir. CF yüklemesi arttıkça, çekme mukavemeti ve elektriksel iletkenlik değerlerinin de arttığı görülmüştür. Yüzeyde ve yüzeyin 0,3 ve 1,5 mm altında olmak üzere iletkenlik testleri üç farklı noktada gerçekleştirilmiştir. İncelemelere göre yüzeyin altında iletkenliğin arttığı gözlemlenmiştir. SEM mikrografları, PBT matrisi incelendiğinde yüzeyden daha uzak noktalarda daha fazla elyaf biriktiği belirlenmiştir. PBT/CF kompozitleri, CF'nin çift vidalı bir ekstrüder kullanılarak PBT reçinesi ile harmanlanması yoluyla hazırlanmıştır. 60 L/D (Aspect Ratio) oranına sahip CF, iletkenlik ve mekanik özellikler için ağırlıkça %1, %3, %5, %8 ve %13 eklenmiş ve EMI özelliği için 460 L/D ile CF için ağırlıkça %20, %25 ve %30 yüklenmiştir. Daha sonra mikro kompozitler, geleneksel ve Mucell® enjeksiyon kalıplama işlemleri

kullanılarak ayrı ayrı kalıplanmıştır. Şişirme ajanı olarak azot kullanılarak 100 tonluk bir enjeksiyon makinesi kullanılmıştır.

Elyaf içeriği arttıkça kompozitlerin çekme mukavemeti değerlerinin arttığı, kopma uzama değerleri düştüğü gözlemlenmiştir. Köpüklü PBT/CF kompozitlerine ait kırılma yüzeyleri SEM (Taramalı Elektron Mikroskopi) ile incelenmiştir. Görüntüler incelendiğinde CF içeriği arttığında, hücre boyutu azalmış ve hücre yoğunluğu artmıştır. Hücre boyutunun küçülmesi ayrıca gerilme mukavemetini de etkilemiş ve köpüklü PBT/CF kompozitlerinin lif içeriği arttıkça hücre boyutu azalmış ve gerilme mukavemeti artmıştır. CF partiküllerinin köpürtme işlemi sırasında heterojen çekirdeklenme yerleri olarak hizmet ettiğini gösterilmiştir. CF içeriği %8'den büyük olduğunda hücre boyutu dengelenmiştir. Bu da malzemenin maksimum gerilme kuvveti sergilemesine sebep olmuştur.

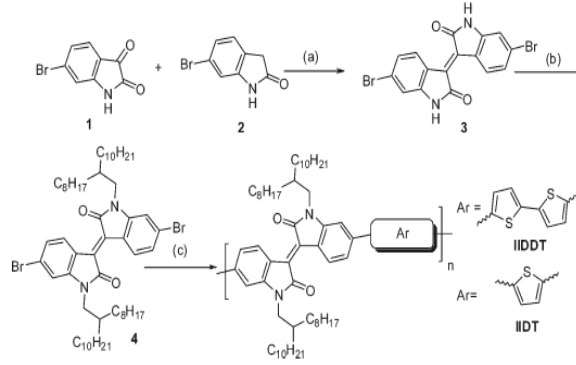
X-bandı frekans aralığındaki (30-1500 MHz) EMI SE, bir koaksiyel kurulum kullanılarak ölçülmüş ve tüm ölçümler, oda sıcaklığında havaya maruz bırakılan numunelerle gerçekleştirilmiştir. CF yüklemesi ağırlıkça %13'ten az olduğunda, SE değeri 0'a yakın ölçülmüş, bu da EMI koruması olmadığı anlamına gelmektedir. Bu nedenle, kalkanlama elde etmek için CF yüklemesi artırılmalıdır. CF yükü ağırlıkça %30'a çıkarıldığında, EMI SE değeri 10 dB'ye olarak tespit edilmiş. Köpüklü PBT/CF kompozitleri için, köpürme işlemi, köpüklenmemiş örneklerle kıyasla CF yönelimini daha rastgele hale getirmiş, dolayısıyla EMI SE değerlerinde iyileşme görülmüştür.

Ighalo ve diğ. (2020) yaptığı bir çalışmada, yalıtkan olan polimer matris içerisine iletken bir malzeme ekleyerek elektriksel iletkenlik özelliği artırılmış yeni bir kompozit malzeme elde edildiği görülmüştür. Öncelikle alüminyum (Al) tozu hazırlanarak eklenecek iletken malzeme hazırlanmıştır. Bunun için, atık Al, 50 °C sıcaklıktaki fırınlarda 24 saat boyunca tutularak içerisinde bulunan atık su uzaklaştırılmıştır. Kurutulan numuneden 150 µm boyutlarında toz elde edilmiş ve baz polimer olarak atık polistiren (PS) kullanılmıştır. Atık PS'den solvoliz kimyasal geri dönüşüm yöntemi ile PS reçine elde edilmiştir. Karışımda Al katkı oranı %10, %20, %30 ve %40 şeklinde değiştirilerek kullanılmıştır. Karıştırma işlemi basit bir mekanik karıştırıcı ile sağlanmıştır. Daha sonrasında karışımda oluşabilecek herhangi bir boşluğu önlemek ve 3 mm'lik homojen bir kalınlık elde etmek için metal silindir üzerinde tek silindirli makinede preslenmiştir. 0.85 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahip PS'e alüminyum toz eklendikçe ve eklenen Al oranı arttıkça oluşan yeni malzemenin de yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Bunun sebebi kullanılan alüminyumun yoğunluğunun 2.7 g/cm<sup>3</sup> olmasıdır.

**Tablo 1. Katkı Oranının İletkenliğe Etkisi (Ighalo, 2020)**

<b>Katkı Oranı (%)</b>	<b>Elektriksel Direnç (Ω.cm)</b>
<b>10</b>	7,583x10 <sup>-8</sup>
<b>20</b>	5,4037x10 <sup>-7</sup>
<b>30</b>	5,4913x10 <sup>-7</sup>
<b>40</b>	7,2682x10 <sup>-7</sup>

Lei ve diğ. (2011) yaptığı bir çalışmada, organik alan etkili aktarıcılar için bir izoindigo çekirdeğine dayalı iki konjuge polimer, iki adet isoindigo bazlı polimer (IIDDT ve IIDT) geliştirilmiştir. Şekil 5'te bu polimerlerin sentezi verilmiştir. Alan etkisi performanslarının incelenmesi, IIDDT'nin, polimer alan etkili transistör (FET) malzemeleri arasında oldukça yüksek olan  $0.79 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 'e kadar havada stabilite hareketliliği sergilediğini göstermiştir. Bu tür polimerlerin kolay hazırlanması ve yüksek mobilitesi, izoindigo bazlı polimerleri optoelektronik cihazlar için çözelti ile işlenebilir organik yarı iletkenler olarak uygulama açısından çok umut verici kılmaktadır.  $0,79 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  değerine kadar hareketlilik ( $\mu$ ) ile çok iyi alan etkisi performansı elde edilmiştir.



**Şekil 5:**  
IIDDT Sentezi (Lei,2011)

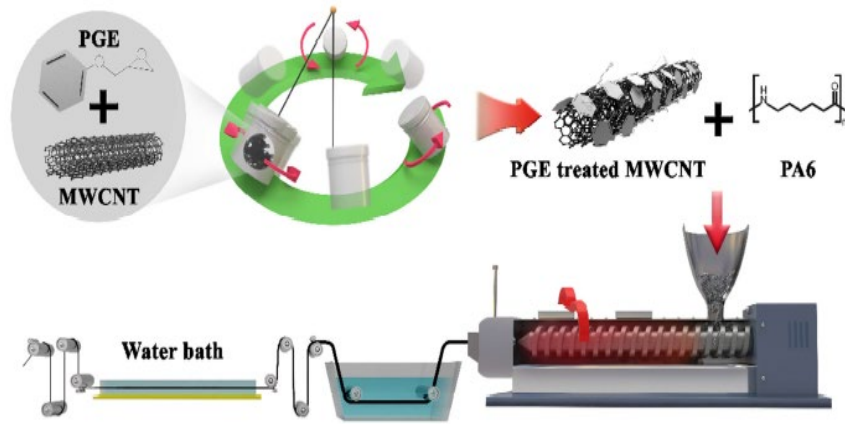
Bu çalışmada, iki izoindigo bazlı polimerin kolay bir sentezini ve bunların doğrudan çözelti işleme yoluyla organik alan etkili transistör (OFET) cihazlarını üretmek için aktif katmanlar olarak kullanımları incelenmiştir. OFET'ler için tüm organik yarı iletkenler arasında, polimerler, çözelti işlenebilirliği, iyi mekanik özellikler ve ısıl kararlılık avantajları sayesinde birçok araştırmaya konu olmuşlardır. Her iki polimerin moleküler ağırlıkları jel geçirgenlik kromatografisi (GPC) ile ölçülmüştür. IIDT, yaklaşık  $19,8 \text{ kg/mol}$ 'lük bir ortalama sayıca molekül kütlesi (MN) gösterirken, IIDDT  $87,9 \text{ kg/mol}$ 'e kadar çok yüksek bir MN gösterir. Bunun sebebi polimerizasyon reaksiyonunun farklı sterik engeller ile karşılaşması olabilir. Ayrıca polimerlerin termal özellikleri de ölçülmüştür. Her iki polimer de azot atmosferi altında  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den yüksek bozunma sıcaklıkları göstermiş ve bu sıcaklıktan önce hiçbir faz geçişi gözlenmemiştir.

Li ve diğ. (2017), EMI SE üzerine çalışma yapılmıştır. CNT/konjuge polimer (CP) kompozitleri, benzersiz yapıları ve yüksek elektrik iletkenlikleri nedeniyle EMI koruma uygulamaları için büyük ilgi çekmiştir. Konjuge polimerler arasında polianilin (PANI), kolay sentezi, çevresel kararlılığı ve doping sonrası yüksek iletkenliği nedeniyle en umut verici adaylardır. Yapılan çalışmada modifiye edilmemiş karbon nanotüp (U-CNT)/PANI ve amin ile işlevselleştirilmiş CNT/PANI kompozitleri hazırlanmıştır. Ağırlıkça %70 CNT miktarına kadar CNT'nin artırılması ile iletkenlik artmıştır. U-CNT film ve PANI  $551$  ve  $231 \text{ S.cm}^{-1}$  iletkenlik gösterirken, iletkenlik değerinin Al kompozit için ağırlıkça %70 U-CNT ile  $2602 \text{ S.cm}^{-1}$ 'e yükseldiği gözlemlenmiştir. A-CNT filmin iletkenliği U-CNT filminden daha düşük olmasına rağmen, iletkenliğin ağırlıkça %70 A-CNT yüklemesi ile  $3009 \text{ S.cm}^{-1}$ 'e yükseldiği

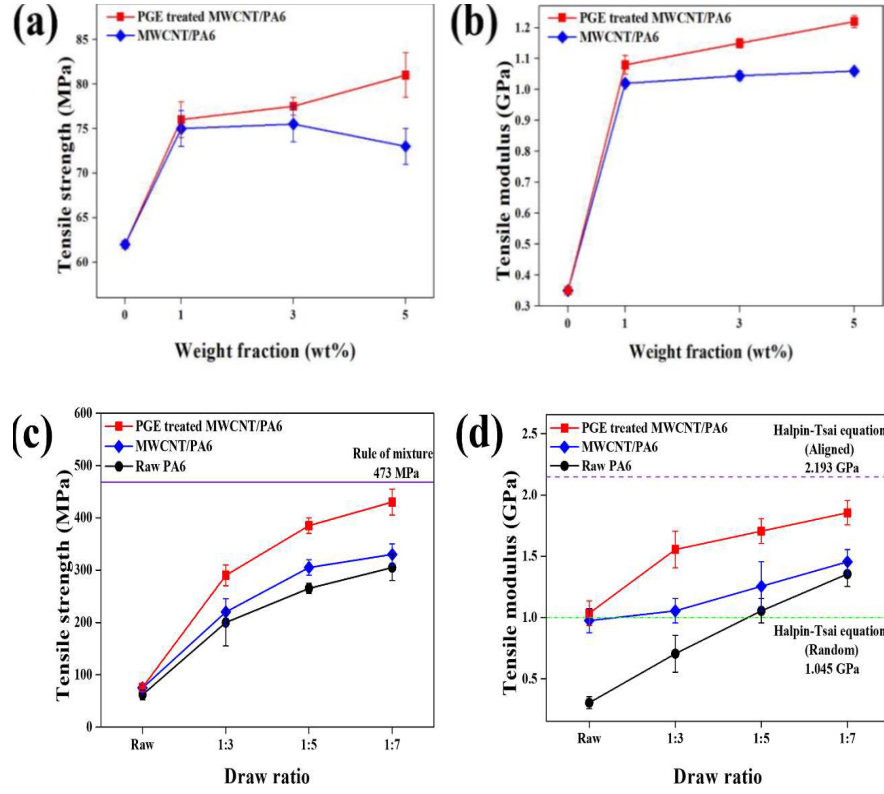
belirlenmiştir. A-CNT filmin iletkenliğinin, amin işlevinden kaynaklanan kusurlar nedeniyle U-CNT' den daha düşük olduğu ( $\sim 426 \text{ S.cm}^{-1}$ ) görülmüştür. Ancak A-CNT /PANI kompozitinin iletkenliği hala benzer CNT yüklemelerine sahip U-CNT/PANI kompozitinden daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum, A-CNT'de yük taşınmasının daha verimli olduğunu göstermektedir.

Osman ve diğ. (2010) çalışmasında, sodyum iyonunun hareketliliğinin lityum iyonundan daha iyi olduğuna değinilmiştir ve bu hareketlilik zincirler arası etkileşimi arttıracığından iletkenlik özelliğini de pozitif etkilemiştir. Yapılan çalışmada baz polimer olarak poliakrilonitril (PAN), tuz olarak lityum triflat ( $\text{LiCF}_3\text{SO}_3$ ) ve sodyum triflat ( $\text{NaCF}_3\text{SO}_3$ ) kullanılmıştır. Polimer dimetilformamid içinde çözdürüldükten sonra içine ayrı ayrı olmak üzere tuzlar eklendikten sonra petri kaplara dökülerek filmler elde edilmiştir. Filmler  $80^\circ\text{C}$ 'de 24 saat kurutulmuş ve çözücü uzaklaştırılmıştır. Filmlerin en iyi iletkenlik değerleri PAN +  $\text{LiCF}_3\text{SO}_3$  için  $3,04 \times 10^{-4} \text{ S.cm}^{-1}$ , PAN +  $\text{NaCF}_3\text{SO}_3$  için  $7,13 \times 10^{-4} \text{ S.cm}^{-1}$  olarak bulunmuştur.

Park ve diğ. (2019) yaptığı bir çalışmada, poliamid 6 (PA6) ile phenyl glycidyl ether (PGE) ile işlevselleştirilmiş çok katmanlı karbon nanotüp (MWCNT) karışımı ve işlem görmemiş MWCNT/PA6 karışımının elektrik, termal ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmasını incelenmiştir. Üç farklı oranda (kütlece %1, %3 ve %5) PGE/MWCNT ve MWCNT içeren PA6 dry-mixer ile karıştırılmıştır. Çift vidalı ekstrüzyon işlemine tabi tutulan karışımlar, giriş ve çıkış merdanelerinin dönüş hızları 1:3, 1:5 ve 1:7 çekme oranıyla  $90^\circ\text{C}$  de sarım işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 6'da PGE ile işlevselleştirilmiş MWCNT/PA6 üretim şeması görülmektedir. %5 PGE/MWCNT içeren PA6 kompozitlerinde en yüksek modül ve çekme dayanımı değeri elde edilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü üzere, çekme oranının, filament giriş ve çıkış merdanelerinin dönme hızı 1:7 oranında olması daha iyi mekanik özellik sağlamıştır.



**Şekil 6:**  
*PGE ile İşlevselleştirilmiş MWCNT/PA6 Üretim Şeması (Park,2019)*

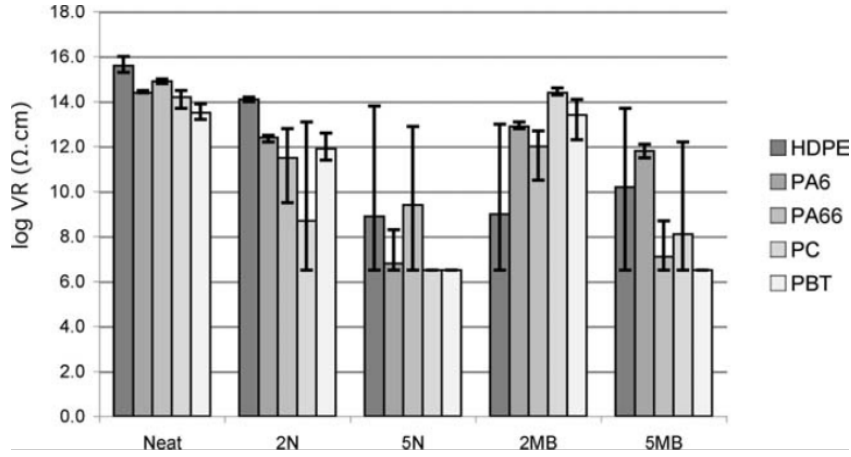


Şekil 7:

a) Saf ve PGE/MWCNT İçeren PA6 Çekme Mukavemeti, b) Saf ve PGE/MWCNT İçeren PA6 Çekme Modülü, c) Çekme Oranına Göre Saf ve PGE/MWCNT İçeren PA6 Mukavemeti, d) Çekme Oranına Göre Saf ve PGE/MWCNT İçeren PA6 Çekme Modülü (Park,2019)

Rios ve diğ. (2010) yaptığı bir çalışmada, beş farklı termoplastiğin, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), PA6, poliamid 66 (PA66), PBT ve polikarbonat (PC) saf haldeki CNT ve boya formundaki CNT ile karışımlarının mekanik, termal ve elektrik özelliklerinin değişimini incelemektedir. PBT ve PC termoplastiklerinin en iyi enjeksiyon parametrelerini bulabilmek için Minitab programı kullanılarak deney tasarımı yapılmıştır. Karışımlarda saf ve boya formundaki CNT oranı %2-5 olarak değiştirilmiştir. Elde edilen grafiklerde sadeliği sağlamak için saf karbon nanotüp “N” ve granül formundaki karbon nanotüp “MB” olarak ifade edilmiştir. Elastik modül, hacimsel direnç, ısı bozulma sıcaklığı, maksimum çekme mukavemeti ve kopma uzaması için sırasıyla “E”, “VR”, “HDT”, “UTS” ve “EB” simgeleri kullanılmıştır. Şekil 8’de görüldüğü üzere, HDPE için %5 granül formda CNT, PA66 için %5 granül formda CNT, PC için %5 saf CNT, PBT için %5 saf CNT, PA6 için %5 saf CNT karışımları en iyi iletkenlik sonucunu vermiştir.

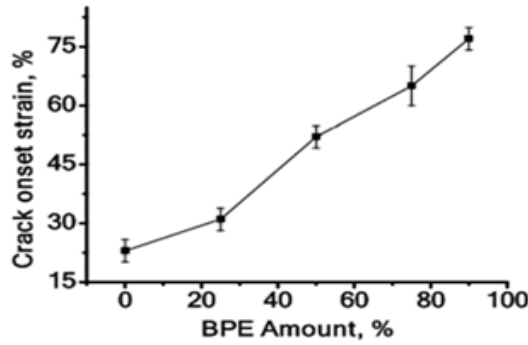




**Şekil 8:**

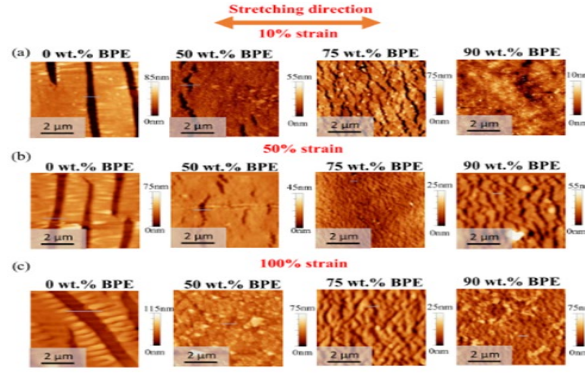
*Tüm termoplastikler %2 N ve %5 MB ile karıştırılmıştır. Logaritmik VR karışında termoplastiklerin saf halleri referans alınarak, VR özelliğinin değişimi (Rios,2010)*

Selivanova ve diğ. (2019) yaptığı bir çalışmada, konjuge polimerlerin iletkenlik mekanizması incelenmiştir. Konjuge polimerler elde etmek için yaygın bir yaklaşım, sert malzemelerin, elastomerik malzemelerle fiziksel olarak karıştırılmasıdır. Yapılan çalışmada %0, %25, %50, %75 ve %90 oranlarında dallanmış polietilen kullanılarak, konjuge polimerlerin mekanik özelliklerinin artırılması hedeflenmiştir. Çalışmada tavlama işlemi yapılmış olup hem tavlama işleminden önce hem de sonraki mekanik özellikler test edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda Şekil 9’da görüldüğü gibi, %90 dallanmış polietilen konsantrasyonunda %77 uzama sonucunda çatlaklar gözlemlenmiş olup, bu gözlem SEM analizi ile desteklenmiştir. %100 gerilme altında, %100 diketopirrolopirol polimeri 3100 nm çatlak boyutuna ulaşırken, %75 dallanmış polietilen kullanımı ile 300 nm çatlak boyutu elde edilmiştir. Şekil 9’da BPE miktarına bağlı çatlak uzunluğunun oranı ve Şekil 10’da ise tavlınmamış %0-90 BPE içeren karışımların atomik kuvvet mikroskopu görüntüsü gösterilmiştir.



**Şekil 9:**

*BPE miktarına bağlı çatlak uzunluğunun oranı (Selivanova,2019)*



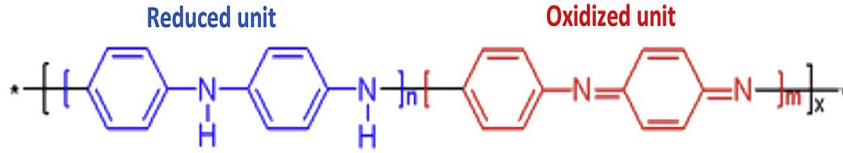
**Şekil 10:**

*Tavlanmamış %0-90 BPE İçeren Karışımların Atomik Kuvvet Mikroskopu Görüntüsü  
a) %10 gerilme b) %50 gerilme c) %100 gerilme (Selivanova,2019)*

Shakir ve diğ. (2020) yaptığı bir çalışmada, PS/PANI karışımı çözelti döküm yöntemi ile hazırlanıp yaklaşık 250  $\mu\text{m}$  kalınlığında ince filmler elde edilmiştir. XRD (X-Işını Kırınım yöntemi) testi uygulanarak PS ve PANI arasındaki etkileşime bakılmıştır. PANI  $19^\circ$  ve  $25^\circ$ ’lerde XRD’de iki adet pik vermiştir. Ataktik PS amorf olduğundan dolayı herhangi bir pik gözlemlenmemiştir. 80/20 PS/PANI ve 60/40 PS/PANI karışımlarında da  $19^\circ$  ve  $25^\circ$ ’de aynı pikler gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca SEM Analiz metodu kullanılarak karışımlardaki polianilin polimerinin homojen olarak dağıldığı ve ağ yapısı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak elektromanyetik dalgalar, malzeme tarafından yansıtılır, emilir ya da kırılarak geçiş sağlar. Bunun ölçümü IR (Kızılötesi) spektroskopisi kullanılarak yapılmıştır. %20 ve %40 PANI eklendiğinde PANI elektriksel olarak iletken olduğundan ve PS matrisinde çok sayıda arayüz oluşturan nanopartiküller şeklinde dağıldığından, her biri elektromanyetik dalgalarını yansıtmak için bir alan sağladığından dolayı elektromanyetik kalkanlama özelliği sağlanacağı bildirilmiştir. 80/20 ve 60/40 konsantrasyonlarındaki karışımın 20 dB değerinde %99 koruma sağladığı görülmüştür. Geleneksel olarak, yüksek ağırlık, korozyona duyarlılık, yüksek üretim maliyeti gibi dezavantajlara sahip metal yerine hafif, esnek, kolay üretim gibi avantajlara sahip polimerlerin kullanımı artmıştır.

Sun ve diğ. (2020) yaptığı bir çalışmada, elektromanyetik radyasyon üzerine iletken polimerlerin etkisi incelenmiştir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte elektronik cihaz kullanımı artmıştır. Fakat bu cihazlar elektromanyetik radyasyon yaymaktadır. Yapılan bilimsel araştırmalara göre, elektromanyetik radyasyonun insan vücuduna zarar verdiği ve hatta kansere neden olduğu bulunmuştur. Bu sebeple, mikrodalga emici malzemelerin, mikrodalgaları ve elektromanyetik enerjiyi emme özellikleri olduğundan kullanımları giderek yaygınlaşmaktadır. Bu makalede, bakır-kobalt-nikel ferrit/grafen oksit/polianilin tri kompoziti hazırlanmıştır. Daha sonra hazırlanan karışım, esnek ve emici bir kumaş hazırlamak için matris bağlayıcı olarak su bazlı poliüretan kullanılarak pamuklu kumaş üzerine kaplanmıştır. Oluşturulan trikompozit özelliklerini incelemek için Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), SEM ve X-Işın Kırınım testi gibi analiz yöntemleri kullanılmıştır. Daha sonrasında trikompozit ile kaplanmış pamuklu kumaşa mekanik testler uygulanmıştır. %40 trikompozit kaplanmış pamuk içeren kumaşa 47 dB kalkanlama etkinliği elde edilmiştir.

Yokozeki ve diğ. (2015) gerçekleştirdikleri bir çalışmada, CF takviyeli polimerik (CFRP) kompozitler, genellikle yüksek mekanik özellikleri, yorulma ve korozyon dayanımı sağladıkları için uçak yapılarında sıklıkla kullanılmaktadır. CFRP'lerin ayrıca yakıt verimliliğinin artmasına ve emisyonların azalmasına katkıda bulunduğu anlaşılmıştır. CFRP kompozitleri genellikle iletken karbon elyaf katkısından ve yalıtkan bir polimerden oluşur. Anizotropik ve homojen olmayan bir elektriksel iletkenlik özelliğine sahiptirler. Bu özellik özellikle yıldırım çarpması için gereklidir. Bu sebeple CFRP kompozitlerinin yıldırım koruma özelliğinin geliştirilmesi için yapıdaki iletken olmayan polimer matrisinin iletken olan bir polimer yapı ile değiştirilmesi gerekir. Bu değişim ile yapının elektriksel iletkenliği artırılabilir ve daha izotropik bir iletkenlik sağlanabilir. Yüksek iletkenlik özelliği, kolay sentezlenebilir olması, düşük maliyet, iyi çevresel kararlılık özelliklerinden dolayı PANI yaygın kullanılan bir iletken polimerdir. Elektriksel özelliklerini geliştirmek için PANI tabanlı elektriksel olarak iletken termoset matris kullanarak CFRP geliştirilmesi için çalışılmıştır. İletken ısıyla sertleşen reçine, dopant olarak dodesilbensülfonik asit (DBSA) ve p-toluensülfonik asit (PTSA) ve çapraz bağlama polimeri olarak divinilbenzen (DVB) kullanılmıştır. Bu polimer sistemi ile yüksek iletkenlik, üretim yöntemleri için uygun viskozite ve yeterli tokluk değerleri elde edilebilmektedir.

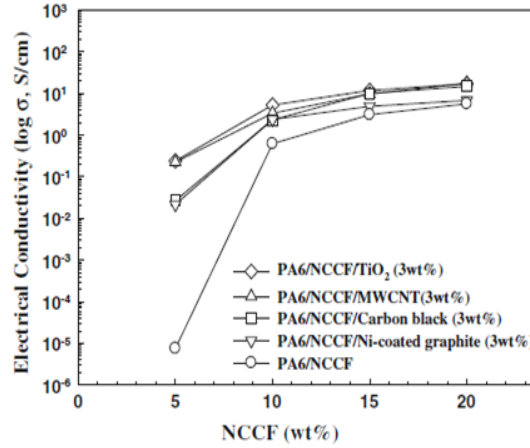


**Şekil 11:**

*PANI'nin temel yapısı; indirgenmiş birim (reduced unit) ve oksitlenmiş birim (oxidized unit) (Yokozeki,2015)*

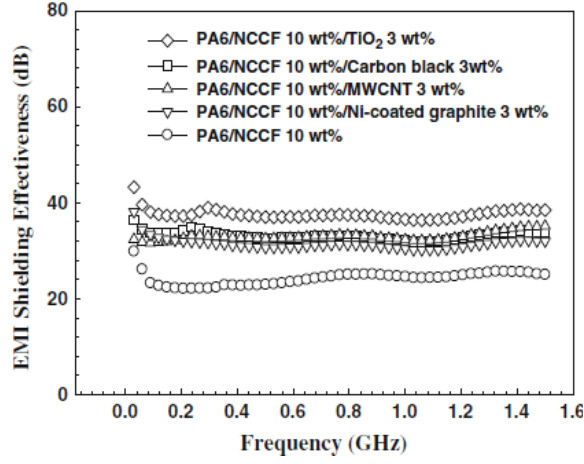
PANI, DBSA ve PTSA, ağırlıkça 30/62/8 oranında üç silindirik öğütme işlemi kullanılarak bir PANI/DBSA/PTSA karışımı oluşturmak için hazırlanmıştır. Bu harman, homojen bir süspansiyon oluşturmak için santrifüjlü bir karıştırıcı kullanılarak oda sıcaklığında DVB ile karıştırılmıştır. PANI/DBSA/PTSA:DVB oranı, ağırlıkça 50:50 olarak ayarlanmış ve ağırlık oranları 15/31/4/50 olan PANI/DBSA/PTSA/DVB karışımları ile sonuçlanmıştır. PANI/DBSA/PTSA/DVB karışımları, iki saat süreyle, 110 °C'de eş zamanlı olarak katkılanmış ve kürlenmiştir. Kürlenmiş PANI/DBSA/PTSA/DVB ve PANI/DBSA/DVB örneklerinin elektriksel iletkenliği, dört noktalı problu bir direnç ölçer kullanılarak ölçülmüştür. Elektriksel özellikler ısıtma süresinin bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. PANI bazlı iletken polimerler, nano katkılı polimerlerle karşılaştırıldığında oldukça yüksek bir iletkenliğe sahip olduğu görülmüştür (~ 1 S/cm). CFRP'nin üretimi için, iletken termoset reçine kullanılarak geleneksel bir prepreg tabanlı işlem uygulanmıştır. TR3110M CF düz dokuma kumaşlar, CF/PANI prepreglerini hazırlamak üzere PANI/DBSA/PTSA/DVB reçinesine yedirilmiştir. Pre-preg örnekler sekiz katlı olarak istiflenmiş ve lif yönü: 0/90 olarak ve sıcak pres kullanılarak iki saat 110 °C'de kürlenmiştir. PANI/CF kompoziti için düzlemsel iletkenlik değeri 148 S/cm olarak tespit edilirken, epoksi/CF kompozitlerinin iletkenlik değeri 25 S/cm olarak tespit edilmiştir. CF/PANI, özellikle kalınlık yönünde, CF/Epoxy ile karşılaştırıldığında yüksek elektriksel iletkenlik sergilediği gözlemlenmiştir. Kompozit yapı kalkanlama özelliğinde (40 dB'ye kadar) önemli gelişmeler göstermiştir.

Yoo ve diğ. (2014) yaptığı bir çalışmada, PA6 ve nikel kaplı karbon elyaf (NCCF) karışımına ikincil katkı olarak MWCNT, nikel kaplı grafit (Ni-coated graphite), CB ve titanyum di-oksit (TiO<sub>2</sub>) katkıları eklenerek polimerik kompozit malzemenin elektromanyetik kalkanlama özelliği incelenmiştir. İki elektronik cihazın birbirlerinin yaydığı elektromanyetik dalgalardan etkilenmemeleri için elektromanyetik kalkanlama özelliği önemli bir etmendir. Özellikle elektrikli araçlarda ve havacılıkta kullanılan elektronik malzemelerde fonksiyonel hataların görülmemesi için bu alanda kullanılan plastik kompozitlerin elektro manyetik kalkan özelliğini göstermesi gerekmektedir. Bu çalışmada, farklı oranlarda NCCF içeren karışımlara CB, MWCNT ve TiO<sub>2</sub> eklenerek kompozit malzemenin elektromanyetik kalkanlama özelliğinde gözlenen değişimler anlatılmıştır. Değişimin kullanılan ilave katkıya göre yorumlanabilmesi için her defasında NCCF ile kütlece %3 oranında bir katkı karıştırılmış ve kalkanlama özelliğine etkisi değerlendirilmiştir. Karışımlardaki NCCF oranı kütlece 5-10-15-20 olarak değiştirilmiştir. Şekil 8’de NCCF miktarı ve kullanılan ikincil katkı tipine göre malzemenin elektrik iletkenliği değişimi grafiksel olarak verilmiştir. Şekil 13 ve şekil 14’te ise uygulanan elektromanyetik frekansa göre %10 ve %15 NCCF içeren farklı karışımların gösterdiği elektromanyetik kalkanlama değeri etkinliği gösterilmektedir. Şekil 15’te PA6/NCCF karışımında kullanılan tüm ikincil katkıları içerisinde %3 TiO<sub>2</sub> kullanılmasının elektromanyetik kalkanlama özelliğinde en fazla artış sağlandığı görülmektedir.



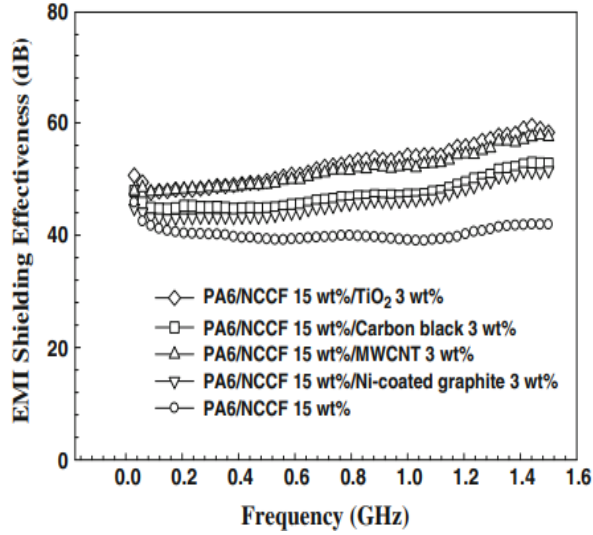
**Şekil 12:**

*NCCF miktarı ve kullanılan ikincil katkı tipine göre malzemenin elektrik iletkenliği (Yoo,2014)*



Şekil 13:

%10 NCCF İçeren Karışımların Gösterdiği Elektromanyetik Kalkanlama Değeri (Yoo,2014)



Şekil 14:

%15 NCCF İçeren Karışımların Gösterdiği Elektromanyetik Kalkanlama Değeri (Yoo,2014)

## 2. SONUÇ

İletken polimerler ve bunun haricinde farklı katkıları kullanılarak, matrisi mühendislik plastiği olan kompozit malzemelere iletkenlik özelliği kazandırılmıştır. Bu kapsamda farklı çalışmalar incelenmiştir. CF/PANI karışımı 40 dB'ye kadar elektromanyetik kalkanlama sağlamış, PS/PANI karışımı 60/40 oranında kullanıldığında 50 dB SE değeri elde edilmiştir ve en iyi kalkanlama da bu kompozitte elde edilmiştir. U-CNT/PANI ve A-CNT/PANI polimer kompozitlerinde en iyi kalkanlama özelliği görülmüş ve A-CNT filmin iletkenliği U-CNT filminden daha düşük olmasına rağmen, elektrik iletkenliğinin ağırlıkça %70 A-CNT yüklemesi ile 3009 S.cm<sup>-1</sup>'e yükseldiği belirlenmiştir. Al ve PS karışımında sızdırmazlık faktörü 40/60 oranında en düşük olarak bulunmuştur. %40 Al içeren karışımında en düşük elektriksel direnç 7,2682x10<sup>-7</sup> Ω.cm olarak elde edilmiştir. CF karışımlarında elektrik iletkenliği %30'dan fazla

CF kullanıldığında iletkenlik özelliğini olumsuz etkilemiştir. Jel-polimer elektrolitlerin kullanılması, katot olarak Na<sub>2</sub>MnF ile sodyum iyon yarı hücrelerinin elektrokimyasal performansını önemli ölçüde artırmıştır. Sodyum triflatat içeren karışımın sodyum iyonunun daha hareketli olduğu ve zincirler arası etkileşimi arttırdığı doğrulanmıştır. IIDDT ve IIDT benzer foto-fiziksel ve elektrokimyasal özellikler göstermiş, ancak tamamen farklı OFET performansı sergiledikleri gözlemlenmiştir. Konjuge polimer karışımında bileşimde polietilen arttıkça mekanik özelliklerinin arttığı görülmüş ve yapılan testler ile kanıtlanmıştır. Kaplanmış kumaş ve normal kumaş karşılaştırıldığında, 47 dB değerindeki en iyi kalkanlama %40 bakır/kobalt/nikel ve ferrit-grafen oksit-polianilin trikompoziti kullanıldığında görülmüştür. PA6/NCCF karışımında kullanılan tüm ikincil katkıları içerisinde en çok MWCNT ve TiO<sub>2</sub> kullanılmasının elektromanyetik kalkanlama özelliğine olumlu etki sağlandığı görülmüştür ve kalkanlama değeri 60 dB olarak ölçülmüştür. İşlevselleştirilmiş MWCNT, saf haldeki MWCNT'ye karşı PA6 içerisinde daha homojen dağılmış ve bu dağılımın sonucunda daha iyi mekanik, termal ve elektrik iletkenliği özelliği göstermiştir ve elektrik iletkenliği 1 S/cm değerine ulaşmıştır. Beş farklı termoplastik için yapılan deney tasarımında enjeksiyon parametresinin elektrik iletkenliğine etkisinin en çok erime sıcaklığına bağlı olduğu ve enjeksiyon sıcaklığının termoplastığın erime sıcaklığından 30 °C fazla olması en iyi elektrik iletkenliği sonucunu vermiştir. Kullanılan MWCNT formunun termoplastığın türüne göre elektrik iletkenliği değerine etkisi incelenmiş ve her termoplastik için en iyi sonuç farklı türlerde elde edilmiştir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar(lar), bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkarlarının bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## YAZAR KATKISI

Kübra Karabacak, İbrahim Berk Çavuş ve Onur Kıyılı bu makalenin taslağının oluşturulması, fikirsel içeriğin eleştirel incelenmesi ve son onay yönünden makaleye katkı sağlamıştır.

## KAYNAKLAR

1. Altun, M., Karteri, İ., Güneş, M. ve Alma, M. H., Grafen Katkılı Odun-Plastik Nanokompozitlerinin Elektromanyetik Özellikleri ve Elektromanyetik Kalkanlama Etkinliği Karşılaştırmalı Çalışması, *KSU. Journal of Engineering Sciences*, 20(1), 38-47.
2. Gao, H., Guo, H., Song, J., Park, K ve Goodenoug, J.B. (2015) A Composite Gel Polymer Glass Fiber Electrolyte for Sodium Ion Batteries, *Advanced Energy Materials*, 1402235. doi:10.1002/aenm.201402235
3. Hwang, S (2016), Tensile, electrical conductivity and EMI shielding properties of solid and foamed PBT/carbon fiber composites, *Composites Part B:Engineering*, 1-8. doi: 10.1016/j.compositesb.2016.05.028
4. Ighalo, J.O ve Adeniyi, A.G., (2020) Utilization of Recycled Polystyrene and Aluminum Wastes in the Development of Conductive Plastic Composites: Evaluation of Electrical Properties, *Handbook of Enviromental Materials Management*, 1-9. doi:10.1007/978-3-319-58538-3\_228-1

5. Lei, T., Cao, Y., Fan, Y., Liu, C., Yuan, S. ve Pei, J. (2011) High-Performance Air-Stable Organic Field-Effect Transistors: Isoindigo-Based Conjugated Polymers, *Journal of the American Chemical Society*, 6099–6101. doi: 10.1021/ja111066r
6. Li, H., Lu, X., Yuan, D., Sun, J., Erden, F., Wang, F. ve He, C. (2017) Lightweight flexible carbon nanotube/polyaniline films with outstanding EMI shielding property, *Journal of Materials Chemistry C*, 8694-8698. doi: 10.1039/C7TC02394D
7. Osman, Z., Md Isa, K.B., Ahmad, A. (2010) A comparative study of lithium and sodium salts in PAN-based ion conducting polymer electrolytes. *Ionics* 16, 431–435. doi: 10.1007/s11581-009-0410-9
8. Park, M., Lee, H., Jang, J., Park, J.H., Kim, C.H., Kim, S.Y. ve Kim, J. (2019) Phenyl glycidyl ether as an effective noncovalent functionalization agent for multiwalled carbon nanotube reinforced polyamide 6 nanocomposite fibers, *Composites Science and Technology*, 96-102. doi: 10.1016/j.compscitech.2019.04.021
9. Rios, P.F., Ophir, A., Kenig, S., Efrati, R., Zonder, L. Ve Popovits-Biro, R. (2010) Impact of Injection-Molding Processing Parameters on the Electrical, Mechanical, and Thermal Properties of Thermoplastic/Carbon Nanotube Nanocomposites, *Journal of Applied Polymer Science*, 70-78. doi: 10.1002/app.32983
10. Slinova, M., Zhang, S., Bilet, B., Malik, A., Price, N., Landry, E., Gu, X., Xiang, P. Ve Rondeau- Gagné (2019) Branched Polyethylene as a Plasticizing Additive to Modulate the Mechanical Properties of  $\pi$ -Conjugated Polymers, *Macromolecules*, 7870–7877. doi: 10.1021/acs.macromol.9b01697
11. Shakir, M.F. Rashid, I.A., Tariq, A., Nawab, Y., Afzal, A., Nabeel, M., Naseem, A. ve Hamid, U. (2020) EMI Shielding Characteristics of Electrically Conductive Polymer Blends of PS/PANI in Microwave and IR Region, *Progress and Challenges in Developing Electromagnetic Interference Materials*, 1660–1665. doi: 10.1007/s11664-019-07631-7
12. Sun, J., Wang, L., Yang, Q., Shen, Y. ve Zhang, X. (2020) Preparation of copper-cobalt-nickel ferrite/graphene oxide/polyaniline composite and its applications in microwave absorption coating, *Progress in Organic Coatings*, 105552. doi: 0.1016/j.porgcoat.2020.105552
13. Yılmaz, R. (2014), *Elektromanyetik Kalkanlama Özelliği Olan Malzemeler*, Electronic Journal of Vocational Colleges.
14. Yokozeki, T., Goto, T., Takahashi, T., Qian, D., Itou, S. Hirano, Y., Ishida, Y., Ishibashi, M., Ishida, Y., Ishibashi, M. ve Ogasawara, T. (2015) Development And Characterization Of CFRP Using A Polyaniline-Based Conductive Thermoset Matrix, *Composites Science and Technology*, 277-281. doi: 10.1016/j.compscitech.2015.06.016
15. Yoo, T.W., Lee, Y.K., Lim, S.J., Yoon, H.G. ve Kim, W.N. (2014) Effects of hybrid fillers on the electromagnetic interference shielding effectiveness of polyamide 6/conductive filler composites, *Journal of Materials Science*, 1701–1708. doi: 10.1007/s10853-013-7855-y
16. Zhang, L., Wang, L. B. ve See, K. Y. (2013), Effect of Carbon Nanofiber Reinforcement on Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Syntactic Foam, *Journal of Materials Science*, 48, 7757-7763. doi: 10.1007/s10853-013-7597-x
17. Więckowski T.W., Janukiewicz J.M. (2006), Methods For Evaluating The Shielding Effectiveness of Textiles, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 14(5), 18-22.

