



n-Si/SWCNT ve n-Si/MWCNT ince filmlerinin üretilmesi ve karşılaştırılması Fabrication and comparison of n-Si/SWCNT and n-Si/MWCNT thin films

Tuğba Bayazıt ^{1,*} 

¹ Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi, 53100, Rize Türkiye

Öz

Bu çalışmada, n-tipi silikon (n-Si) altlık üzerinde tek katmanlı (SWCNT) ve çok katmanlı karbon nanotüp (MWCNT) ince filmleri üretilmiş ve yapısal özellikleri karşılaştırmalı olarak incelendi. Karbon nanotüp filmler farklı damlatma miktarlarıyla silikon yüzeye kaplandı ve elde edilen yapıların yüzey bileşimi ile kristal özellikleri sırasıyla Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS) ve X-ışını Kırınımı (XRD) analizleriyle değerlendirildi. EDS sonuçları, kaplama miktarının artmasıyla yüzeyde karbon oranının yükseldiğini ve altlıktan gelen sinyalin azaldığını gösterdi. XRD analizleri ise kaplama işleminin silikon altlığın kristal yapısını bozmadığını ortaya koyuldu. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) fotoğraflarından, SWCNT ve MWCNT kaplamalar arasında yüzey örtücülüğü ve film oluşumu bakımından belirli farklılıklar olmadığı gözlemlendi. Elde edilen bulgular, CNT tabanlı yapıların düşük güç tüketimli elektronik ve çevresel algılama uygulamalarında kullanılabilecek enerji verimli elektronik bileşenlerin geliştirilmesi açısından potansiyel sunduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: n-Si/SWCNT, n-Si/MWCNT, İnce film

1 Giriş

Karbon nanotüpler (Carbon Nanotubes, CNT), keşfedilmelerinden bu yana sahip oldukları üstün elektriksel [1], mekanik [2] ve optik [3] özellikler nedeniyle nanoelektronik ve optoelektronik aygıt teknolojilerinde yoğun ilgi görmektedir [4]. Bu özelliklerin yanı sıra geniş yüzey alanı ve kimyasal kararlılık [5] gibi karakteristikleri sayesinde CNT yapılar, özellikle geleneksel silikon teknolojisi ile birleştirildiğinde yeni nesil yarıiletken aygıtların geliştirilmesinde önemli fırsatlar sunmaktadır.

Silikon halen mikroelettronik endüstrisinin temel yapıtaşı olmakla birlikte [6] yüzey ve arayüz özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çeşitli nanomalzeme kaplamaları üzerine yoğun araştırmalar yürütülmektedir [7]. Bu bağlamda CNT kaplamaları, silikon yüzeylerle oluşturdukları heteroeklemler sayesinde aygıt performansını iyileştirebilecek önemli aday malzemeler arasında yer almaktadır [8]. Literatürde CNT-silikon heteroeklemlerinin doğrultucu özellik gösterdiği ve bu yapıların diyot, fotodedektör ve sensör uygulamalarında kullanılabileceği gösterilmiştir [9]. Karbon nanotüp filmleri silikon yüzey üzerine kaplandığında arayüzdeki yük transfer

Abstract

In this study, single-layer (SWCNT) and multilayer carbon nanotube (MWCNT) thin films were fabricated on an n-type silicon (n-Si) substrate, and their structural properties were comparatively investigated. Carbon nanotube films were coated onto the silicon surface with different dropping amounts, and the surface composition and crystalline properties of the resulting structures were evaluated using Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) and X-ray Diffraction (XRD) analyses, respectively. EDS results showed that increasing the coating amount increased the carbon content on the surface and reduced the signal from the substrate. XRD analyses revealed that the coating process did not disrupt the crystalline structure of the silicon substrate. Scanning Electron Microscope (SEM) images showed no significant differences in surface coverage and film formation between SWCNT and MWCNT coatings. The findings indicate that CNT-based structures offer potential for developing energy-efficient electronic components that can be used in low-power electronics and environmental sensing applications.

Keywords: n-Si/SWCNT, n-Si/MWCNT, Thin film

mekanizmaları değişmekte ve yük taşıyıcıların geçişi kolaylaşarak diyot karakteristiği sergileyen heteroeklem yapıları oluşabilmektedir [10, 11].

Çoğu CNT filmi atmosferik koşullar altında oksijen adsorpsiyonu nedeniyle doğal olarak p-tipi davranış gösterebilmektedir [12,13]. Bu durum, n-tipi silikon altlık üzerinde p-n heteroeklem oluşumuna olanak sağlayarak doğrultucu özellik gösteren diyot yapıların elde edilmesini mümkün kılmaktadır [14,15]. CNT-Si heteroeklemlerinde elde edilen performansın, arayüz kalitesi, temas direnci ve CNT filminin yüzey homojenliği ile yakından ilişkili olduğu bildirilmektedir [16]. Aurang ve arkadaşları, CNT/silikon heteroeklemlerinde doğrultma oranının CNT film kalitesi ve arayüz temas özellikleri ile doğrudan bağlantılı olduğunu rapor etmiştir [17]. Benzer şekilde Tonkikh ve çalışma arkadaşları, CNT filmlerinin silikon yüzeyde yük enjeksiyonunu kolaylaştırarak diyot davranışını iyileştirdiğini göstermiştir [18].

Karbon nanotüpler temel olarak tek katmanlı karbon nanotüpler (SWCNT) ve çok katmanlı karbon nanotüpler (MWCNT) olmak üzere iki ana sınıfta incelenmektedir [19]. SWCNT yapıları tek katmanlı olmaları nedeniyle yüksek

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tugba.bayazit@erdogan.edu.tr (T. Bayazıt)

Geliş / Received: 09.02.2026 Kabul / Accepted: 25.02.2026 Yayınlanma / Published: 16.03.2026

doi: 10.28948/ngumuh.1884938

yük taşıyıcı hareketliliği ve daha iyi elektriksel iletim özellikleri sunarken, MWCNT yapıları çok katmanlı yapıları sayesinde daha yüksek mekanik kararlılık ve yüzey kaplama avantajı sağlayabilmektedir [20]. Bu nedenle literatürde her iki nanotüp türünün silikon yüzeylerle entegrasyonu üzerine çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, aynı üretim koşulları altında doğrudan karşılaştırmalı çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir [21].

CNT kaplama işlemleri genellikle döndürmeli kaplama (spin coating), damlatmalı kaplama (drop coating) veya püskürtme kaplama gibi çözelti temelli yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler düşük maliyetli olmaları ve geniş alanlara uygulanabilirlikleri nedeniyle yaygın şekilde tercih edilmektedir. Kaplama sonrası yüzey morfolojisi, nanotüp ağ yapısı ve film homojenliği, elde edilen heteroeklem yapının elektriksel ve optik performansını doğrudan etkileyen parametreler arasında yer almaktadır [22].

Yapısal ve yüzey karakterizasyonu açısından X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi, silikon altlığın kristal yapısının ve CNT kaplamasının oluşturduğu yapısal değişimlerin incelenmesinde önemli bir araçtır. Yüzey morfolojisi ve kaplama homojenliği ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile değerlendirilmektedir. Buna ek olarak Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS) analizleri, kaplama sonrası yüzeydeki element dağılımının doğrulanmasında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bunun yanında CNT kaplamalarının silikon yüzeylerin optik özelliklerini değiştirebildiği, özellikle yüzey yansıtıcılığını azaltarak ışık soğurma performansını artırabildiği rapor edilmiştir [23]. CNT filmleri yüzeyde mikro ve nano ölçekte pürüzlülük oluşturarak ışık tuzaklama etkisi meydana getirmekte ve bu durum fotovoltaiik ve optoelektronik uygulamalar açısından avantaj sağlamaktadır [24].

SWCNT ve MWCNT yapılarının karşılaştırıldığı çalışmalarda, SWCNT kaplamalarının genellikle daha iyi elektriksel iletim ve daha etkin arayüz teması sağladığı, buna karşın MWCNT kaplamalarının daha homojen ve mekanik olarak daha kararlı yüzey filmleri oluşturabildiği bildirilmektedir [25]. Bununla birlikte, iki farklı nanotüp türünün aynı silikon altyapı üzerinde karşılaştırmalı olarak incelendiği yapısal, morfolojik ve optik özelliklerin birlikte değerlendirildiği çalışmalar halen sınırlı sayıdadır [26].

Bu çalışmanın literatüre özgün katkısı, n-Si üzerinde SWCNT ve MWCNT kaplamalar aynı kaplama protokolü ile üretilerek doğrudan karşılaştırılmasıdır. Elde edilen sonuçların CNT tabanlı silikon heteroeklemlerin performansının anlaşılmasına katkı sağlaması ve gelecekte geliştirilecek CNT-Si tabanlı aygıt tasarımlarına yol gösterecek olması çalışmanın yeniliğini vurgulamaktadır.

2 Materyal ve metot

2.1 CNT Dispersiyonunun hazırlanması ve kaplama çözeltisinin elde edilmesi

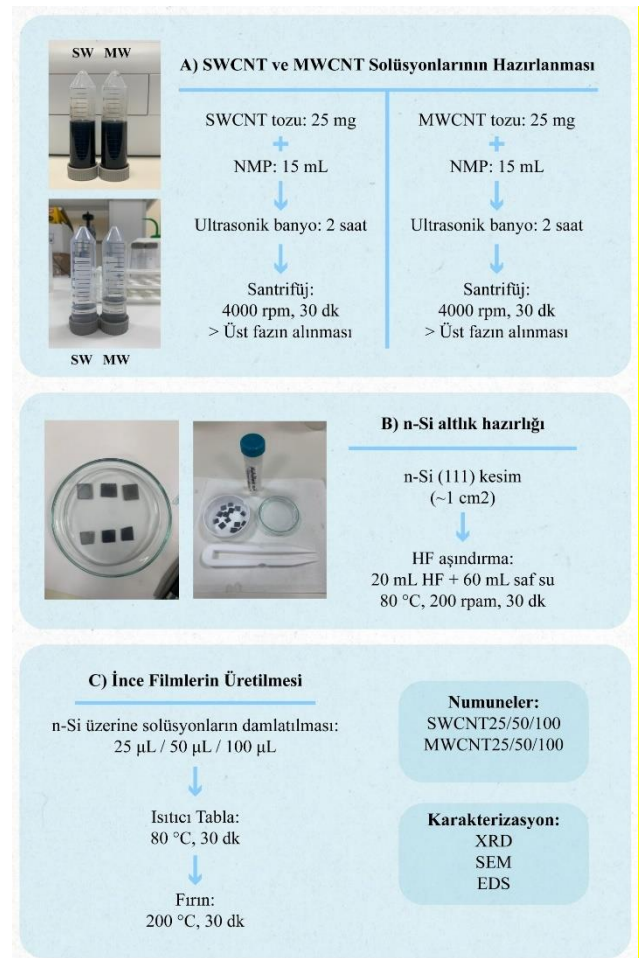
Kaplama işlemlerinde ticari tek katmanlı karbon nanotüp (SWCNT) (Sigma-Aldrich, %90) ve ticari çok katmanlı karbon nanotüp (MWCNT) (Sigma-Aldrich, %98) tozları kullanıldı. Bu çalışmada SWCNT ve MWCNT ince filmleri aynı üretim koşullarında üretilerek karşılaştırma yapıldı.

Ön karışımı elde edebilmek için iki ayrı deney tüpünün birine 25 mg SWCNT tozu diğerine ise 25 mg MWCNT tozu hassas terazide tartılarak koyuldu. Her bir deney tüpüne ayrı ayrı 15 mL N-metil-2-pirolidon (NMP) (Merck, %99.5) solüsyonu eklenerek ön karışım hazırlandı [27, 28].

CNT tozları kümelenmeye yatkın bir yapıya sahip olduğu için oluşan topaklanmalarının ayrılması ve homojen bir süspansiyon elde edilmesi amacıyla karışımlar 2 saat ultrasonik banyo işlemine tabi tutuldu.

Ultrasonik işlem sonrasında hazırlanan süspansiyonlar, büyük ve çökmeye eğilimli partiküllerin uzaklaştırılması amacıyla 4000 rpm hızda 30 dakika süreyle santrifüj edildi. Santrifüj işlemi sonucunda tüplerin alt kısmında biriken çökelti uzaklaştırıldı ve üstte kalan berrak sıvılar faz kaplama işlemlerinde kullanılacak CNT dispersiyon çözeltisi olarak ayrı ayrı temiz tüplere aktarıldı.

SWCNT ve MWCNT ince filmlerinin üretimini adım adım gösteren ait şema Şekil 1’de verildi.



Şekil 1. SWCNT ve MWCNT ince filmlerinin üretim şeması

2.2 Si altlıkların aşındırılması ve temizlenmesi

Altlık malzemesi olarak (111) yönelimli n-tipi Si (nanografi, 1-10 ohm·cm; $N_c=1.5 \times 10^{16}$ elektron/cm³; Coating-Crystal technology, Inc.) tercih edildi. n-Si altlıklar yaklaşık 1×1 cm² boyutlarında kesildi. Solüsyonların yüzeye tutunmasını sağlayabilmek ve yüzeylerde olabilecek

kirliliklerin ve oksit tabakasının uzaklaştırılması için aşındırma işlemi yapıldı.

Aşındırma işlemi için kullanılan hidroflorik asit (HF), cam yüzeylerde tahribata sebep olduğundan, deneylerde teflon kap tercih edildi. Teflon kaba 20 mL HF asit ve 60 mL ultra saf su eklendi, homojen karışımın sağlanması amacıyla kap içerisine manyetik karıştırıcı balık yerleştirildi. Teflon kap, ısıtıcı manyetik karıştırıcının üzerine konuldu. Karıştırıcı yüzey sıcaklığının kontrol edilebilmesi için üzerine içi su dolu bir beher yerleştirildi ve beher içerisine sıcaklık ölçümü yapabilen bir sıcaklık ölçer daldırıldı. Sistem sıcaklığı 80 °C'ye, manyetik karıştırma hızı ise 200 rpm'e ayarlandı. Sıcaklık 80 °C'ye ulaştıktan sonra n-Si altlıklar 30 dakika süreyle aşındırma işlemine tabi tutuldu. HF asidin zararlı buharlarına maruziyeti önlemek amacıyla tüm aşındırma işlemleri çeker ocak içerisinde gerçekleştirildi. Aşındırma işleminin ardından n-Si altlıklar saf su içerisinde atıldı. Son olarak alkol ile temizlenen n-Si altlıklar öncül katmanın kaplanması için hazır hale getirildi.

2.3 Si/SWCNT ve Si/MWCNT yapılarının oluşturulması

25 mg SWCNT ve 25 mg MWCNT tozları ile 15 mL NMP solüsyonu karıştırılarak elde edilen SWCNT ve MWCNT kaplama çözeltileri kullanılarak n-tipi silikon altlıklar üzerine kaplama işlemleri damlatma (drop coating) yöntemi ile gerçekleştirildi. Bu çalışma SWCNT ve MWCNT filmlerinin kaplama miktarına bağlı olarak homojenliğinin optimize edilmesi amacıyla gerçekleştirilmesi sebebiyle, 3 farklı damlatma miktarı (25 µL, 50 µL, 100 µL) belirlendi. Hazırlanan SWCNT ve MWCNT solüsyonları mikropipet ile belirlenen miktarlarda Si altlıklar üzerine damlatıldı.

Kaplama işlemini takiben numuneler üzerinde bulunan çözücünün uzaklaştırılması ve film oluşumunun iyileştirilmesi amacıyla ön ısıtım işlemi uygulandı ve numuneler 80 °C sıcaklıktaki ısıtıcı tabla (hot plate) üzerinde 30 dakika süreyle bekletildi. Daha sonra filmlerin yapısal kararlılığının artırılması amacıyla 200 °C sıcaklığa ayarlanmış fırında 30 dakika süreyle son ısıtım işlemi gerçekleştirildi. 25 µL, 50 µL, 100 µL damlatma miktarı ile üretilen SWCNT filmlerini sırasıyla SWCNT25, SWCNT50 SWCNT100 olarak isimlendirildi. MWCNT filmleri de benzer şekilde damlatma miktarına bağlı, MWCNT25, MWCNT50 MWCNT100 şeklinde isimlendirildi.

2.4 Si/SWCNT ve Si/MWCNT yapılarının karakterizasyonu

Farklı miktarlarda damlatma yöntemi ile üretilen CNT numunelerinin yapısal özellikleri, 40 kV ve 30 mA'da çalışan Cu-K α radyasyonu ($\lambda = 1.5408 \text{ \AA}$) ile bir Rigaku SmartLab X-ışını difraktometresi (XRD) kullanılarak incelenmiştir. Ölçümler, 3° geliş açısında (incident angle) paralel ışın geometrisinde (PB) gerçekleştirildi.

Yüzey morfolojisi, 15 kV'da çalışan JEOL JSM-6610 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gözlemlendi. Ayrıca numunelerin kimyasal bileşimi, SEM cihazına bağlı enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS, Oxford Instruments Inca X-act) ile incelendi. SEM/EDS analizleri sırasında yüzey yüklenmesini önlemek ve görüntü kalitesini sağlamak için numuneler altın kaplandı (Coater,

Quorum) ve gümüş pasta kullanılarak elektriksel olarak topraklandı [29].

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi analizi (EDX)

EDS analiz sonuçları ile Si altlık üzerinde büyütülen SWCNT ve MWCNT ince filmlerinin yüzey bileşimi ve üretim parametrelerine bağlı olarak oluşan kimyasal değişimleri değerlendirildi. Tablo 1 farklı damlatma miktarları ile üretilen numunelerin atomik yüzde oranlarını vermektedir. Tablo incelendiğinde verilen atomik yüzdelere ve C/O atomik oranları birlikte incelendiğinde hem nanotüp türüne hem de damlatma miktarına bağlı olarak belirgin eğilimler gözlenmektedir.

Tablo 1. Farklı damlatma miktarlarında üretilen CNT yapılarına ait EDX ölçümleri

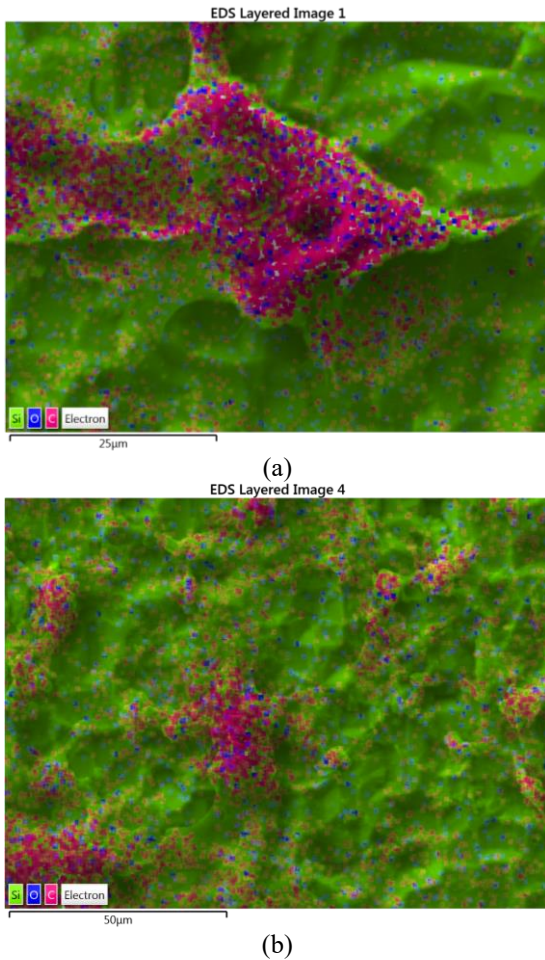
Numune	Atomik Yüzde (%)			Atomik Oran
	Si	C	O	C/O
SWCNT25	60.50	30.70	8.70	3.52
SWCNT50	58.80	32.50	9.42	3.45
SWCNT100	55.60	33.90	10.50	3.22
MWCNT25	55.20	34.20	10.65	3.21
MWCNT50	55.05	34.65	10.30	3.36
MWCNT100	53.25	36.30	10.45	3.47

Öncelikle tüm numunelerde Si altlığın sinyalinin baskın olması beklenen bir durumdur. Çünkü kaplama Si altlık üzerinde gerçekleştirilmiş ve EDS analizinde elektron demeti altlığa kadar nüfuz edebilmektedir. CNT film kalınlığı arttıkça yüzeyden algılanan Si oranının azalması beklenir [30]. Gerçekten de hem SWCNT hem de MWCNT serilerinde damlatma miktarı arttıkça Si yüzdesinin azaldığı görülmektedir. Örneğin SWCNT numune serisinde Si oranı %60.5'ten %55.6'ya düşerken, MWCNT serisinde %55.2'den %53.25'e gerilemektedir. Bu durum, artan damlatma miktarıyla CNT tabakasının yüzeyi daha iyi kapladığını ve altlığın EDS sinyaline katkısının azaldığını göstermektedir. Dolayısıyla film yoğunluğu ve yüzey kaplama kalitesinin damlatma miktarıyla arttığı söylenebilir.

Karbon yüzdesi incelendiğinde ise beklenen eğilim daha net görülmektedir. SWCNT numunelerinde C oranı %30.7'den %33.9'a yükselirken, MWCNT serisinde %34.2'den %36.3'e çıkmaktadır. Bu artış, kaplanan CNT miktarının arttığını ve yüzeyde karbon zenginliğinin yükseldiğini göstermektedir. Ayrıca aynı üretim koşullarında MWCNT filmlerinin karbon yüzdesinin SWCNT filmlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeni, MWCNT yapılarının daha kalın ve daha yoğun ağ oluşturabilmeleri ve yüzeyi daha etkin biçimde kaplayabilmeleridir. Nitekim 100 µL miktarında damlatılarak üretilen SW (Şekil 2a) ve MW (Şekil 2b) CNT yapılarına ait elementel haritalandırmaları incelendiğinde (Şekil 2) karbonun MWCNT yapılarında daha homojen dağıldığı tespit edildi. Literatürde de MWCNT filmlerinin genellikle daha yüksek yüzey kaplama oranı ve daha yoğun ağı yapı oluşturduğu bildirilmektedir [31, 32].

Oksijen içeriği tüm numunelerde yaklaşık %8-11 aralığında değişmektedir. CNT yapılarında oksijen sinyali genellikle üç ana kaynaktan gelir: (i) yüzey oksidasyonu, (ii) sentez veya dispersiyon sırasında oluşan fonksiyonel gruplar ve (iii) ortamdan adsorbe edilen oksijenli türler. Damlatma miktarı arttıkça oksijen oranında hafif bir artış eğilimi gözlenmektedir. Bunun nedeni, yüzey alanı artışıyla birlikte daha fazla oksijenli grubun yüzeyde tutulması olabilir. Özellikle MWCNT örneklerinde oksijen oranı daha stabil seyretmektedir; bu da çok katmanlı yapıların yüzey oksidasyonuna karşı nispeten daha kararlı olabileceğini düşündürmektedir [33].

C/O oranı CNT kalitesini değerlendirmek açısından önemli bir parametredir. Yüksek C/O oranı genellikle daha saf ve daha az oksitlenmiş karbon yapısına işaret eder. SWCNT25 numunesinde C/O oranı 3.52 ile en yüksek değeri verirken, damlatma miktarı arttıkça oran hafifçe düşmektedir. Bu durum, daha kalın film oluşumu sırasında yüzeyde oksijenli grupların artabileceğini düşündürmektedir. MWCNT serisinde ise C/O oranının nispeten daha kararlı kaldığı ve yüksek damlatma miktarında tekrar arttığı görülmektedir. Bu durum, MWCNT ağlarının daha stabil karbon yapısı sunmasıyla ilişkilendirilebilir [34].

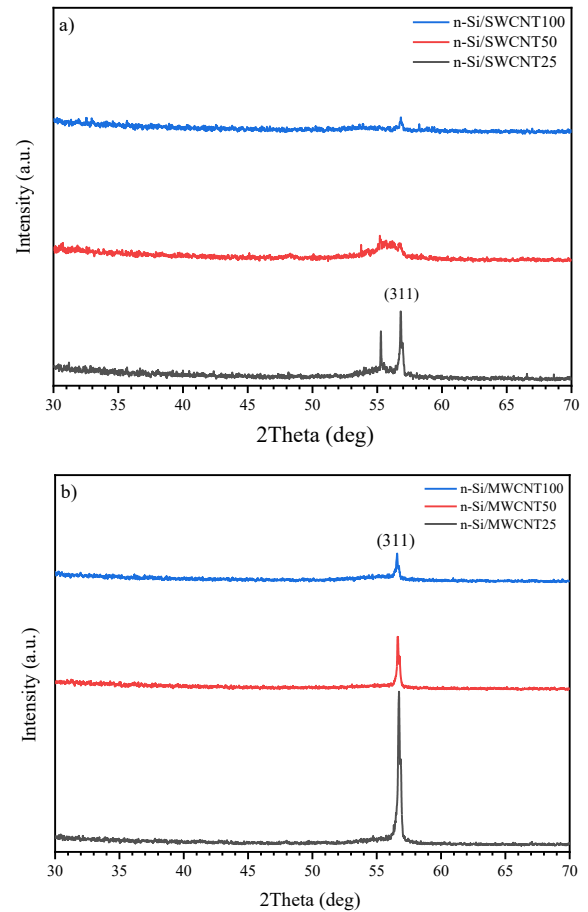


Şekil 2. 100 µL miktarında damlatılarak üretilen SWCNT (a) ve MWCNT (b) numunelerine ait EDS haritalandırmaları

3.2 X-Işını kırınım analizi (XRD)

Şekil 3’de n-Si altlık üzerinde oluşturulan SWCNT (Şekil 3a) ve MWCNT (Şekil 3b) kaplı numunelere ait X-ışını kırınım (XRD) desenleri sunulmaktadır. Bu analiz, gerçekleştirilen kaplama işleminin kristal yapı üzerindeki etkisini ve oluşan filmlerin yapısal bütünlüğünü değerlendirmek açısından önemli bilgiler sağlamaktadır. Elde edilen XRD desenleri incelendiğinde, tüm CNT kaplı numunelerde yaklaşık $2\theta \approx 56^\circ$ civarında belirgin bir kırınım piki gözlenmektedir. Bu pik, kristal silikon altlığın karakteristik (311) düzlemine karşılık gelmekte olup XRD cihazına ait PDXL programı ile tespit edilen standart Si kırınım verileri ile uyumludur (JCPDS 00-001-0787).

Bu yansımanın CNT kaplama sonrası da varlığını koruması, uygulanan film üretim sürecinin silikon altlığın kristal yapısını bozmadığını ve kaplama işlemi sırasında altlık üzerinde yapısal bir hasar oluşmadığını göstermektedir. Silikon altlığın kristal bütünlüğünün korunması, özellikle yarıiletken tabanlı diyot yapılarında cihaz performansını doğrudan etkileyen önemli bir parametredir [35].



Şekil 3. Farklı damlatma oranlarında üretilen SWCNT (a) ve MWCNT (b) numunelerine ait XRD Desenleri

SWCNT kaplı örneklerde damlatma miktarı arttıkça silikon piki şiddetinin nispeten azaldığı ve pik çevresinde hafif bir genişleme olduğu gözlenmektedir. Bu durum,

CNT film kalınlığının artmasıyla birlikte X-ışınlarının silikon altlığına ulaşmasının kısmen engellenmesi ve yüzeyde saçılma etkilerinin artması ile açıklanabilir. Ayrıca SWCNT filmlerinin yüzeyde nispeten daha ince ve homojen bir ağ yapısı oluşturması nedeniyle altlık katkısının ölçümlerde hâlen belirgin kaldığı değerlendirilmektedir. CNT ağ yapılarında film kalınlığı ve yüzey örtücülüğünün artmasıyla birlikte altlık katkısının azalabileceği ve kırınım pik şiddetlerinde değişimler görülebileceği literatürde farklı CNT ince film sistemleri için de rapor edilmiştir [35].

MWCNT kaplı numunelerde de (Şekil 3b) benzer bir eğilim gözlenmekle birlikte, artan damlatma miktarı ile silikon piki belirginliğini korurken şiddetinde kademeli bir azalma meydana gelmektedir. Bu durum, MWCNT kaplamalarının yüzeyde daha yoğun ve daha düzenli bir ağ yapısı oluşturduğunu düşündürmektedir. Çok katmanlı karbon nanotüplerin daha kalın ve mekanik olarak daha kararlı yapılar oluşturabilmesi, yüzeyde daha stabil ve sürekli film oluşumuna katkı sağlayabilmektedir.

Sonuç olarak XRD sonuçları hem SWCNT hem de MWCNT kaplamalarının silikon altlık üzerinde başarılı biçimde oluşturulduğunu ve üretim sürecinin altlık kristalizesini bozmadığını göstermektedir. Ayrıca damlatma miktarına bağlı olarak film kalınlığı ve yüzey kaplama özelliklerinde meydana gelen değişimlerin kırınım desenlerinde dolaylı olarak izlenebildiği anlaşılmaktadır. Bu durum, elde edilen yapıların elektronik ve sensör tabanlı uygulamalarda kullanılabilecek uygun yapısal bütünlüğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

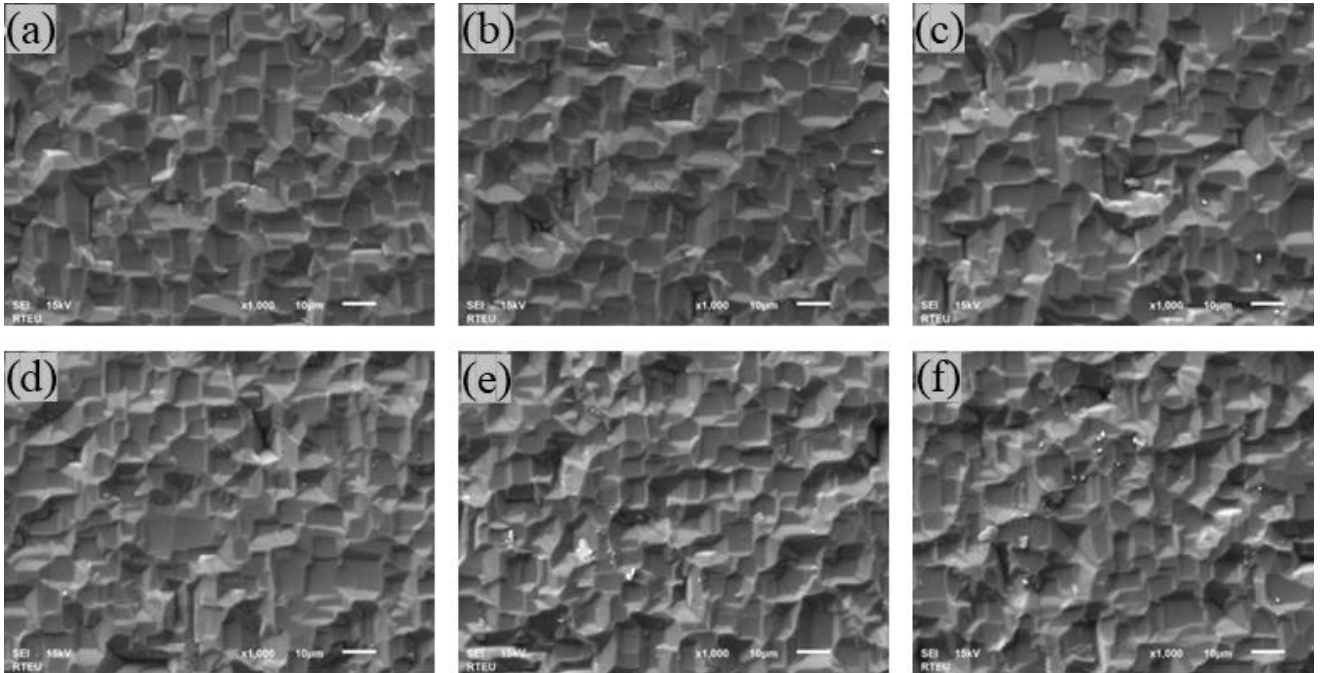
3.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi

Şekil 4, 25 μL , 50 μL , 100 μL oranlarında damlatma yöntemi ile Si altlık üzerinde üretilen SW (Şekil 4a, 4b, 4c) ve MW (Şekil 4d, 4e, 4f) CNT ince filmlerine ait SEM fotoğraflarını göstermektedir.

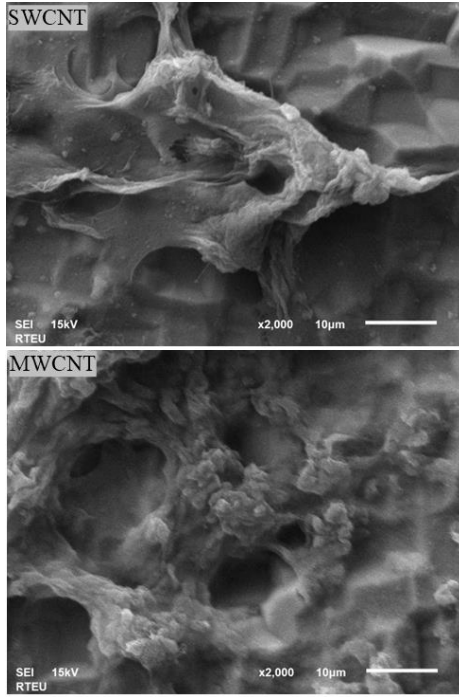
Numunelere ait SEM fotoğrafları incelendiğinde Si altlığın arka yüzeyinin boşluklu yapısının belirgin olduğu söylenebilir. CNP yapılarının şeffaf ve ince olduğu bilindiğinden bu beklenen bir durumdur. Damlatma miktarının 100 μL 'ye çıkmasıyla CNP ağı yapısının oluşmaya başladığı açıktır. Damlatma miktarının artmasıyla birlikte nanotüp yoğunluğunun artması, yüzey üzerinde daha fazla temas noktası oluşmasına sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak film sürekliliğinin iyileştiği ve yüzey örtücülüğünün arttığı değerlendirilmektedir. Bu gözlem, artan kaplama miktarıyla yüzeyde karbon oranının yükseldiğini gösteren EDS sonuçları ile de uyumludur.

Şekil 5 100 μL damlatma ile üretilen SW ve MW CNT yapılarının SEM fotoğraflarıdır. 2000 büyütme oranında yapılan bu ölçümlerde ağı ve gözenekli CNT yapıları açıkça seçilmektedir.

SWCNT ve MWCNT kaplamalar karşılaştırıldığında, MWCNT filmlerinde nanotüp demetlenmelerinin daha yoğun olduğu ve yüzey üzerinde daha kalın bir ağ yapısının oluştuğu görülmektedir. Buna karşılık SWCNT yapılarının daha ince ve daha yaygın bir ağ yapısı sergilediği değerlendirilmektedir. Artan nanotüp yoğunluğu ile yüzey üzerinde temas bölgelerinin arttığı ve film sürekliliğinin iyileştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4. SWCNT 25 μL (a), 50 μL (b), 100 μL (c) ve MWCNT 25 μL (d), 50 μL (e), 100 μL (f) SEM fotoğrafları



Şekil 5. SWCNT100 ve MWCNT100 SEM fotoğrafları

4 Sonuçlar

Bu çalışmada SWCNT ve MWCNT tozları kullanılarak hazırlanan solüsyon farklı miktarlarda Si altlık üzerinde damlatılarak ince filmler üretildi. Üretilen bu filmlerin yapısal özellikleri karşılaştırmalı olarak incelendi. Yapılan EDS ve XRD analizleri, kaplama işleminin silikon altlığı kristal yapısında belirgin bir bozulmaya yol açmadığını ve CNT filmlerinin yüzey üzerinde başarılı biçimde oluştuğunu göstermektedir. Damlatma miktarı arttıkça yüzeydeki karbon oranının yükseldiği ve film kaplamanın daha süreklilik kazandığı görülmüştür. Örneğin, damlatma miktarı 25 µL'den 100 µL'ye çıkarıldığında yüzeydeki C atomik yüzdesi SWCNT serisinde %30.7'den %33.9'a; MWCNT serisinde ise %34.2'den %36.3'e yükselmiştir. Özellikle SEM fotoğraflarına dayanarak söylenebilir ki en yüksek damlatma miktarında (100 µL) elde edilen numunelerde daha homojen bir yüzey kaplaması ve daha yoğun CNT ağ yapısı oluştuğu dikkat çekmektedir.

SWCNT ve MWCNT kaplamalar arasında film oluşumu ve yüzey örtücülüğü bakımından bazı farklılıklar gözlenmekle birlikte, genel olarak daha yüksek damlatma miktarlarının (100 µL) yüzey kaplama açısından daha iyi sonuç verdiği söylenebilir. Bu yönüyle çalışma, sürdürülebilir ve enerji etkin elektronik teknolojilerin geliştirilmesine katkı sağlayabilecek bir altyapı niteliği taşımaktadır.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] K. Karabacak, İ. B. Çavuş ve O. Kıyılı, Polimerlerin elektrik iletkenliği. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 27(3), 1249–1264, 2022. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1124984>.

- [2] M. F. Yu, B. S. Files, S. Arepalli and R.S. Ruoff, Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes and their mechanical properties. Physical Review Letters, 84(24), 5552, 2000. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.5552>.
- [3] M. S. Özsonay and Ö. Topgider, Properties and Biomedical Applications of Carbon Nanotubes, Innovative Health Sciences, 1(1), 2025. <https://doi.org/10.5281.inno202514>.
- [4] S. Rathinavel, K. Priyadharshini, D. Panda, A review on carbon nanotube: An overview of synthesis, properties, functionalization, characterization, and the application. Materials Science and Engineering: B, 268, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115095>.
- [5] A. Hirsch, Functionalization of single-walled carbon nanotubes. Angewandte Chemie-International Edition, 41, 1853–1859, 2002. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20020603\)41:11%3C1853::AID-ANIE1853%3E3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20020603)41:11%3C1853::AID-ANIE1853%3E3.0.CO;2-N).
- [6] S.M. Sze, K.K. Ng, Physics of Semiconductor Devices Third Edition, 2021. John Wiley & Sons.
- [7] P. Arora, A. Sindhu, N. Dilbaghi and A. Chaudhury, Engineered multifunctional nanowires as novel biosensing tools for highly sensitive detection. Applied Nanoscience (Switzerland), 3, 363–372, 2013. <https://doi.org/10.1007/s13204-012-0142-4>.
- [8] X. Wang, L. Zhi and K. Müllen, Transparent, conductive graphene electrodes for dye-sensitized solar cells, Nano Lett., 8, 323–327, 2008. <https://doi.org/10.1021/nl072838r>.
- [9] V. Parkash and A.K. Kulkarni, Optical absorption characteristics of silicon nanowires for photovoltaic applications. IEEE Trans. Nanotechnol., 10, 1293–1297, 2011. <https://doi.org/10.1109/TNANO.2011.2136383>.
- [10] L. A. Dronina, A. L. Danilyuk, N. G. Kovalchuk, E. V. Lutsenko, A. V. Danilchuk and S. L. Prischepa, Temperature-dependent transport of photoinduced charge carriers across a single-walled carbon nanotube film/Si interface. Materials, 18(19), 4437, 2025. <https://doi.org/10.3390/ma18194437>.
- [11] V. Nevruzoglu, M. Kaya, M. Manir, D. B. Altuntas and Z. K. Sesen, New technological application in the preparation of Ag-containing graphene oxide structure: cryogenic coating method. Chemical Papers, 1-11, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11696-025-04401-0>.
- [12] P. G. Collins, K. Bradley, M. Ishigami and A. Zetthl, Extreme oxygen sensitivity of electronic properties of carbon nanotubes. Science, 287 1801–1804, 2000. <https://doi.org/10.1126/science.287.5459.1801>.
- [13] G.U. Sumanasekera, C.K.W. Adu, S. Fang and P.C. Eklund, Effects of gas adsorption and collisions on electrical transport in single-walled carbon nanotubes. Physical Review Letters, 85(5), 1096, 2000. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.1096>.

- [14] X. Li, Y. Jung, K. Sakimoto, T.H. Goh, M.A. Reed and A.D. Taylor, Improved efficiency of smooth and aligned single walled carbon nanotube/silicon hybrid solar cells. *Energy Environ. Sci.*, 6, 879–887, 2013. <https://doi.org/10.1039/C2EE23716D>.
- [15] Y. Jia, P. Li, X. Gui, J. Wei, K. Wang, H. Zhu, D. Wu, L. Zhang, A. Cao and Y. Xu, Encapsulated carbon nanotube-oxide-silicon solar cells with stable 10% efficiency. *Appl. Phys. Lett.*, 98, 2011. <https://doi.org/10.1063/1.3573829>.
- [16] Q. Cao and J.A. Rogers, Ultrathin films of single-walled carbon nanotubes for electronics and sensors: A review of fundamental and applied aspects. *Advanced Materials*, 21, 29–53, 2009. <https://doi.org/10.1002/adma.200801995>.
- [17] P. Aurang, R. Turan and H.E. Unalan, Nanowire decorated, ultra-thin, single crystalline silicon for photovoltaic devices. *Nanotechnology*, 28, 2017. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa81b9>.
- [18] A.A. Tonkikh, V.I. Tsebro, E.A. Obratsova, D. V. Rybkovskiy, A.S. Orekhov, I.I. Kondrashov, E.I. Kauppinen, A.L. Chuvilin and E.D. Obratsova, Films of filled single-wall carbon nanotubes as a new material for high-performance air-sustainable transparent conductive electrodes operating in a wide spectral range. *Nanoscale*, 11, 6755–6765, 2019. <https://doi.org/10.1039/C8NR10238D>.
- [19] R.H. Gangupomu, M.L. Sattler and D. Ramirez, Comparative study of carbon nanotubes and granular activated carbon: physicochemical properties and adsorption capacities. *J. Hazard. Mater.*, 302, 362–374, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.09.002>.
- [20] J.C. Charlier, X. Blasé and S. Roche, Electronic and transport properties of nanotubes. *Rev. Mod. Phys.*, 79, 677–732, 2007. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.79.677>.
- [21] D.D. Tune, N. Mallik, H. Fornasier and B.S. Flavel, Breakthrough carbon nanotube–silicon heterojunction solar cells. *Adv. Energy Mater.*, 10, 2020. <https://doi.org/10.1002/aenm.201903261>.
- [22] H. Gu and T.M. Swager, Fabrication of free-standing, conductive, and transparent carbon nanotube films. *Advanced Materials*, 20, 4433–4437, 2008. <https://doi.org/10.1002/adma.200801062>.
- [23] Z.P. Yang, L. Ci, J.A. Bur, S.Y. Lin and P.M. Ajayan, Experimental observation of an extremely dark material made by a low-density nanotube array. *Nano Lett.*, 8, 446–451, 2008. <https://doi.org/10.1021/nl072369t>.
- [24] M.M. Adachi, M.P. Anantram and K.S. Karim, Optical properties of crystalline-amorphous core-shell silicon nanowires. *Nano Lett.*, 10, 4093–4098, 2010. <https://doi.org/10.1021/nl102183x>.
- [25] M.P. Anantram, and F. Léonard, Physics of carbon nanotube electronic devices. *Reports on Progress in Physics*, 69, 507–561, 2006. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/69/3/R01>.
- [26] P.N. Minh and P.H. Khoi, Carbon nanotube: A novel material for applications. In: *J. Phys. Conf. Ser.*, Institute of Physics Publishing, 2009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/187/1/012002>.
- [27] G. Akgül, M. Tomakin and H. H. Erkaya, Semi-conductive carbon from industrial tea waste biomass for a pn junction. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(4), 5327–5337, 2025. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05413-8>.
- [28] O. A. Kamanina, S. S. Kamanin, A. S. Kharkova and V. A. Arlyapov, Glucose biosensor based on screen-printed electrode modified with silicone sol–gel conducting matrix containing carbon nanotubes. *3 Biotech*, 9(7), 290, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1818-1>.
- [29] T. Bayazit, Photodetector performance under blue–green–red light in ZnTe thin films grown by the quasi-closed volume method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 36, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10854-025-16182-z>.
- [30] R. Terborg, K.J. Kim and V.D. Hodoroba, Elemental composition and thickness determination of thin films by electron probe microanalysis. *Surface and Interface Analysis*, 55, 496–500, 2023. <https://doi.org/10.1002/sia.7183>.
- [31] L. Hu, D.S. Hecht and G. Gruner, Percolation in transparent and conducting carbon nanotube networks. *Nano Lett.*, 4, 2513–2517, 2004. <https://doi.org/10.1021/nl048435y>.
- [32] D. Simien, J.A. Fagan, W. Luo, J.F. Douglas, K. Migler and J. Obrzut, Influence of nanotube length on the optical and conductivity properties of thin single-wall carbon nanotube networks. *ACS Nano*, 2, 1879–1884, 2008. <https://doi.org/10.1021/nl800376x>.
- [33] K.A. Wepasnick, B.A. Smith, K.E. Schrote, H.K. Wilson, S.R. Diegelmann and D.H. Fairbrother, Surface and structural characterization of multi-walled carbon nanotubes following different oxidative treatments. *Carbon N. Y.*, 49, 24–36, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.08.034>.
- [34] A. Kuznetsova, I. Popova, J.T. Yates, M.J. Bronikowski, C.B. Huffman, J. Liu, R.E. Smalley, H.H. Hwu and J.G. Chen, Oxygen-containing functional groups on single-wall carbon nanotubes: Nexafs and vibrational spectroscopic studies. *J. Am. Chem. Soc.*, 123, 10699–10704, 2001. <https://doi.org/10.1021/ja011021b>.
- [35] S. Gholipour, R. Rahighi, M. Panahi, A. Mirsepah, A. Bakhshayesh, F. Shahbaz Tehrani, M. Pourjafarabad, F. Ahmed, M.Z. Ansari and Y. Abdi, Photodiodes and phototransistors based on nanomaterials-silicon heterostructures: a review. *Opt. Quantum Electron.* 57, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11082-024-07119-7>.

