



**KARBON NANOTÜP ESASLI İPLİKLERİN
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Volkan YALI

Yüksek Lisans Tezi

Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatma GÖKTEPE

2016

T.C.
NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KARBON NANOTÜP ESASLI İPLİKLERİN ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Volkan YALI

TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. FATMA GÖKTEPE

TEKİRDAĞ-2016

Her hakkı saklıdır

Prof. Dr. Fatma GÖKTEPE danışmanlığında, Volkan YALI tarafından hazırlanan “Karbon Nanotüp Esaslı İpliklerin Özelliklerinin İncelenmesi” isimli bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Fatma GÖKTEPE

İmza:

Üye : Prof. Dr. Bülent ÖZİPEK

İmza:

Üye : Prof. Dr. Sunay ÖMEROĞLU

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Prof. Dr. Fatih KONUKCU

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARBON NANOTÜP ESASLI İPLİKLERİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Volkan YALI

Namık Kemal Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatma GÖKTEPE

Sahip oldukları olağanüstü özellikleri sayesinde karbon nanotüpler (KNTler) teknolojik açıdan ilgi çeken ileri malzemeler arasındadır. Bu malzemeler, toz partikül form yanında son yıllarda dünyada sınırlı sayıda ileri araştırma merkezinde eğrilebilir karbon nanotüp elyaf halinde özel bir forma sahip olarak da üreilmeye başlanmıştır. Ancak eğrilebilir karbon nanotüplerin özellikleri, eğrilebilir karbon nanotüp elyaf dizinlerinin (KNT ormanları) iplik haline dönüştürülmesi ve bu liflerden elde edilen çok özel nano-lif ipliklerin yapısal ve mekanik özellikleri hakkında mevcut çalışma sayısı çok sınırlıdır. Bu doğrultuda sunulan çalışmada, KNT ormanlarından iki farklı yöntemle farklı büküm seviyelerinde KNT iplikler üretilmiş, uygulanan eğirme yönteminin ve büküm miktarının iplik yapı ve özelliklerine etkisi irdelenmiştir. Bu özel liflerden eğrilen çok ince ipliklerin yapıları; yüzey görünümleri, iplik inceliği ve yüzey büküm açısı esas alınarak incelenmiş, artan büküm miktarının iplik yapısına etkileri araştırılmıştır. Ayrıca üretilen ipliklerin mukavemet özellikleri test edilerek, kopma mukavemeti ve % kopma uzaması değerleri analiz edilmiştir. Çalışmada ilave olarak iplikler, elektrik iletkenlikleri bakımından da analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eğrilebilir Karbon Nanotüpler (KNTler), KNT İplikler, KNT Lif Dizini (KNT Ormanı), Nano-lif İplikler.

2016, 85 sayfa

ABSTRACT

MSc. Thesis

INVESTIGATION OF CARBON NANOTUBE YARN PROPERTIES

Volkan YALI

Namık Kemal University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Textile Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Fatma GÖKTEPE

Carbon nanotubes (CNTs) are among technologically important and advanced materials due to their outstanding properties. Although these materials are produced mainly in particle form, just recently they have also been produced as spinnable fiber form at a few advanced research institutes in the World. However, the available studies on properties of spinnable carbon nanotubes, conversion of these spinnable carbonnanotube arrays (CNT forests) into yarns and the structural and mechanical properties of these special nanofiber yarns are very limited. In this respect, CNT yarns are produced from CNT forests by use of two different methods, then the effect of spinning methods on yarn structure and properties is investigated. The structure of these special yarns are analysed mainly by investigating yarn fineness and surface twist angle and the effect of yarn twist level on yarn properties is determined. Yarns are also analysed in terms of their mechanical performance in terms of yarn tenacity and breaking extension. In addition, the electrical conductivity of the yarns is also analysed.

Keywords: Spinnable Carbon Nanotubes (CNTs), CNT Yarns, CNT Forest, Nano-fiber Yarns.

2016, 85 pages

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGE DİZİNİ.....	v
ŞEKİL DİZİNİ.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
TEŞEKKÜR.....	x
1. GİRİŞ: KARBON NANOTÜP LİFLER	1
2. KARBON NANOTÜPLER	7
2.1 Kısa Tarihçe	7
2.2. Karbon Nanotüplerin Sınıflandırılması	7
2.3. Karbon Nanotüplerin Sentezlenmesi.....	9
2.4. Karbon Nanotüplerin Temel Özellikleri	9
2.4.1. Boyutsal özellikler.....	9
2.4.2. Mekanik özellikler.....	10
2.4.3. Elektriksel özellikler	11
2.4.4. Isıl özellikler.....	11
2.5. Eğrilebilir Karbon Nanotüpleri İpliğe Dönüştürme Yöntemleri	11
2.5.1. Kuru eğirme ile karbon nanotüp iplik üretimi.....	11
2.5.2. Yaş eğirme ile karbon nanotüp iplik üretimi.....	14
2.5.3. Karbon nanotüp ipliklere ilave fonksiyon kazandırılması	17
3. MATERYAL VE YÖNTEM	18
3.1. Kullanılan Karbon Nanotüp Ormanlarının Özellikleri.....	18
3.2. Karbon Nanotüp Ormanlarının İpliğe Dönüştürülmesi.....	19

3.2.1. Yöntem 1 ile iplik eğirme.....	20
3.2.2. Yöntem 2 ile iplik eğirme.....	22
3.3. İplik Yüzey Görüntüleri, İplik İnceliği ve Yüzey Büküm Açılarının Analizi	24
3.4. KNT İpliklerde Büküme Bağlı Kısalma Faktörünün Tespiti	25
3.5. İplik Mukavemet Özelliklerinin Analizi	26
3.6. İplik Elektriksel Direnç Değerlerinin Ölçümü	27
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	29
4.1. Büküm Miktarının ve Eğirme Yönteminin İplik Yüzey Görüntüsüne Etkisi	29
4.2. Büküm Miktarı ve Eğirme Yönteminin İplik İnceliği ve İplik Yüzey Açısına Etkisi	34
4.2.1. Yöntem 1 ile eğrilen ipliklerin analizi.....	34
4.2.2. Yöntem 2 ile eğrilen ipliklerin analizi.....	37
4.3. İdeal İplik Geometrisi Esas Alınarak Yapılan Analizler.....	41
4.3.1. İplik büküm seviyelerinin analizi.....	41
4.3.2. Karbon nanotüp ipliklerde büküme bağlı kısalma faktörü değerlerinin analizi.....	43
4.4. İplik Mukavemet Değerlerinin Analizi ve Bükümle İlişkisi	46
4.4.1. Yöntem 1 ile eğrilen ipliklerin analizi.....	46
4.4.2. Yöntem 2 ile eğrilen ipliklerin analizi.....	48
4.5. Elektriksel Direnç Değerleri.....	50
5. SONUÇ.....	54
6. KAYNAKLAR.....	56
EKLER.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	85

ÇİZELGE DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1: KNT iplik eğirme parametreleri.....	20
Çizelge 4.1: Yöntem 1 ile üretilen KNT ipliklerin SEM görüntülerine örnekler (4000x).....	29
Çizelge 4.2: Yöntem 2 ile üretilen KNT ipliklerin SEM görüntülerine örnekler (4000x).....	31
Çizelge 4.3: Büküm miktarına bağlı olarak değişen iplik çapı değerleri (yöntem 1)	34
Çizelge 4.4: Büküm miktarının iplik çapına etkisine ait ANOVA analizi (yöntem 1)	36
Çizelge 4.5: Yüzey büküm açılarına ait değerler (yöntem 1)	36
Çizelge 4.6: Büküm miktarının yüzey büküm açısına etkisinin ANOVA analizi (yöntem 1)	37
Çizelge 4.7: Verilen büküm miktarına bağlı olarak değişen iplik incelikleri (yöntem 2).....	38
Çizelge 4.8: Büküm miktarının iplik çapına etkisinin ANOVA testi (yöntem 2).....	39
Çizelge 4.9: Büküm miktarına bağlı olarak değişen yüzey büküm açıları (yöntem 2).....	39
Çizelge 4.10: Büküm miktarının büküm açısına etkisinin ANOVA testi (yöntem 2)	40
Çizelge 4.11: Nominal hesaplanan büküm değerleri	42
Çizelge 4.12: Farklı yüzey büküm açılarına karşılık gelen kısılma faktörleri (Hearle ve ark. 1969)	43
Çizelge 4.13: Çalışmada yöntem 2 ile elde edilen KNT ipliklere ait kısılma faktörleri	44
Çizelge 4.14: Yöntem 1 ile üretilen ipliklerin kopma mukavemeti ve % uzama değerleri	46
Çizelge 4.15: Yöntem 1'deki KNT ipliklerin maksimum yük ortalamalarının ANOVA testi	47
Çizelge 4.16: Yöntem 1'deki KNT ipliklerin % uzama ortalamalarının ANOVA testi	48
Çizelge 4.17: Yöntem 2 ile üretilen ipliklerin kopma mukavemeti ve % uzama değerleri	48
Çizelge 4.18: Yöntem 1'e göre üretilen KNT ipliklerin elektriksel dirençleri	50
Çizelge 4.19: Yöntem 1'deki KNT ipliklerin direnç değerlerine ait ANOVA testi	51
Çizelge 4.20: Yöntem 2'ye göre üretilen KNT ipliklerin elektriksel dirençleri	51
Çizelge 4.21: Yöntem 1'deki KNT ipliklerin direnç değerlerine ait ANOVA testi	52

Çizelge 4.22: Yöntem 1 ile eğrilen KNT ipliklerin iletkenlik değerleri	52
Çizelge 4.23: Yöntem 2 ile eğrilen KNT ipliklerin iletkenlik değerleri	52



ŞEKİL DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Lif yapısındaki malzemelerin inceliklerine örnekler (Hongu ve ark. 2005).....	1
Şekil 1.2. KNT'lere yönelik yayın ve patent sayısında yıllar bazında artış (De Volder ve ark. 2013)	3
Şekil 2.1. Zig-zag, kiral ve kiriş KNTler (Eser 2006).....	8
Şekil 2.2. KNT liflerin büküm verilerek ipliğe dönüştürülmesi; tek kat ve katlı KNT ipliklere örnekler (Zhang ve ark. 2004).....	12
Şekil 2.3. KNT iplik eğirme sisteminin şematik görünümü (Tran ve ark. 2009).....	13
Şekil 2.4. Eğrilebilen ve eğrilemeyen karbon nanotüp ormanları (Iijima ve ark. 2012).....	14
Şekil 2.5. Yaş eğirme ile kesintisiz uzunlukta KNT iplik üretimi (Ericson ve ark. 2004).....	15
Şekil 2.6. Karbon nanotüp demetlerinden (orman) ipliklerin eğrilmesi (Zhang ve ark. 2006)	16
Şekil 2.7. a) CVD yöntemiyle sürekli iplik eğirme düzeneği, b) gaz akışındaki karbon nanotüplerin görüntüsü, c) karbon nanotüplerin iplik haline dönüşümü, d) karbon nanotüp ipliklerin görüntüsü, e) bobine sarılması (Zhong ve ark. 2010).....	16
Şekil 2.8. Nanopartikül ilaveli KNT iplikler (Lima ve ark. 2011).....	17
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan KNT ormanlarına ait örnek bir görüntü	18
Şekil 3.2. KNT lif dizinlerine ait tipik SEM görüntüsü ve KNT liflerinin şematik gösterimi.	18
Şekil 3.3 Kullanılan KNT lif dizinlerine ait tipik özellikler	19
Şekil 3.4. KNT iplik eğirme düzeneğinin görünümü	19
Şekil 3.5. Yöntem 1'e göre KNT ormanından iplik eğirme adımları	21
Şekil 3.6. KNT lif dizininden (KNT ormanı) lif çekimine ait görüntü	22
Şekil 3.7. Yöntem 2'ye göre KNT ormanından iplik eğirme adımları	23
Şekil 3.8. Çalışma kapsamında eğrilmiş KNT ipliklere örnekler	24
Şekil 3.9. Çalışmada kullanılan taramalı elektron mikroskobu	25
Şekil 3.10. Çalışmada kullanılan universal mukavemet testi cihazı	26
Şekil 3.11. Mukavemet testi için numune hazırlama (yöntem 1 ve yöntem 2).....	27
Şekil 3.12. Numunelere ait mukavemet testinden bir görüntü	27
Şekil 3.13. İletkenlik ölçümü	28
Şekil 3.14. KNT iplik aktarma için kullanılan karton şablonlar	28
Şekil 4.1. Büküm miktarının KNT iplik inceliğine etkisi (yöntem 1).....	35
Şekil 4.2. Büküm miktarının yüzey büküm açısına etkisi (yöntem 1)	36
Şekil 4.3. Büküm miktarının KNT iplik inceliğine etkisi (yöntem 2).....	38

Şekil 4.4. Büküm miktarının yüzey büküm açısına etkisi (yöntem 2)	39
Şekil 4.5. İdeal iplik geometrisine ait şematik gösterim	41
Şekil 4.6. Nominal büküm değerleri-hesaplanan büküm değerleri ilişkisi (yöntem 1).....	42
Şekil 4.7. Nominal büküm değerleri-hesaplanan büküm değerleri ilişkisi (yöntem 2).....	42
Şekil 4.8. Yüzey büküm açısına bağlı olarak kısalma faktöründe gözlenen değişim	44
Şekil 4.9. Bazı ipliklere ait kısalma faktörleri (Hearle ve ark. 1969)	45
Şekil 4.10. Yüzey büküm açısı ile kısalma faktörü arasındaki ilişki	45
Şekil 4.11. Büküm miktarına bağlı olarak iplik mukavemetinde değişim (yöntem 1)	46
Şekil 4.12. Büküm miktarına bağlı olarak iplik % kopma uzama değerlerinde değişim (yöntem 1)	47
Şekil 4.13. Büküm miktarına bağlı olarak iplik mukavemetinde değişim (yöntem 2)	49
Şekil 4.14. Büküm miktarına bağlı olarak %kopma uzama değerlerinde değişim (yöntem 2)	49
Şekil 4.15. Yöntem 1 ile elde edilen KNT ipliklerin elektriksel dirençleri	50
Şekil 4.16. Yöntem 2 ile elde edilen KNT ipliklerin elektriksel dirençleri	51

KISALTMALAR

CVD	: Chemical Vapor Deposition
CNT	: Carbon Nanotube
KNT	: Karbon Nanotüp
MWNT	: Multi-walled Nanotube
OLED	: Organic Light Emitting Diode
S	: Siemens
SEM	: Scanning Electron Micsroscope
SWNT	: Single-walled Nnotube



TEŞEKKÜR

Bu çalışma konusunun belirlenmesinden tamamlanmasına kadar olan tüm çalışmalarında beni yönlendiren, destek olan ve tecrübelerini paylaşan tez danışmanım, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Fatma GÖKTEPE'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Namık Kemal Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi NKU.BAP.00.17.AR.14.09 No'lu proje ile çalışmama değerli katkılarından dolayı Üniversitemiz Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Ayrıca; bu çalışmaları yapabilmem için gerekli KNT liflerini sağlayan Teksas Dallas Üniversitesi Nanotech Enstitüsü (A.B.D.) direktörü Prof. Dr. Ray H. BAUGHMAN'a; iplik mukavemet testlerinin gerçekleştirilmesi için laboratuvar imkanlarını sağlayan Marmara Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'ne, özellikle bu bölümdeki Sayın Doç. Dr. Metin YÜKSEK'e ve Arş. Gör. Dr. Erhan SANCAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Ve son olarak da bugüne kadar benden hiçbir konuda yardımlarını esirgemeyen ve daima yanımda olarak bana destek olan eşim Saliha Sayha YALI'ya ve beni bugünlere getiren aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

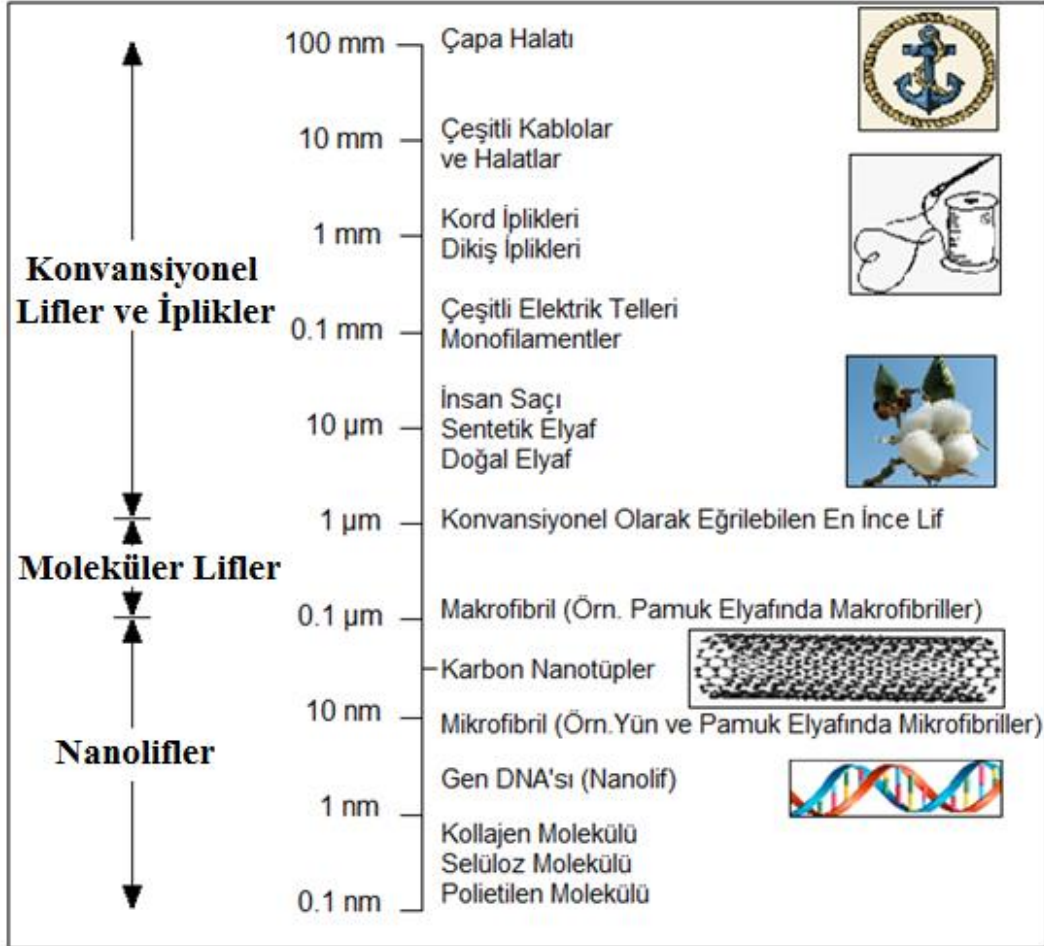
Ocak 2016

Volkan YALI
Tekstil Mühendisi

1. GİRİŞ: KARBON NANOTÜP LİFLER

Tekstil lifleri ile ilgili birçok tanım bulunmakla birlikte ASTM (American Society for Testing and Materials) D123-919 standardı, lifleri, uzunlukları çaplarının en az 100 katı olan, tekstillerin temel elementi olarak tanımlamıştır. JIS (Japanese Industrial Standards) L0204-1979 standardı ise lifleri; iplik ve kumaşları oluşturan; inceliğine kıyasla oldukça uzun, esnek yapısal birimler olarak tanımlamaktadır (Hongu ve ark. 2005). Dolayısıyla elyaf inceliği, liflerin önemli karakteristiklerinden birisidir.

Genel olarak tüm lif yapısındaki malzemeler incelendiğinde, incelikleri bakımından Şekil 1.1’de görülebileceği gibi nanometrik ölçeklerden milimetrik ölçeklere kadar geniş bir yelpazede çap dağılımına sahiptir (Hongu ve ark. 2005).



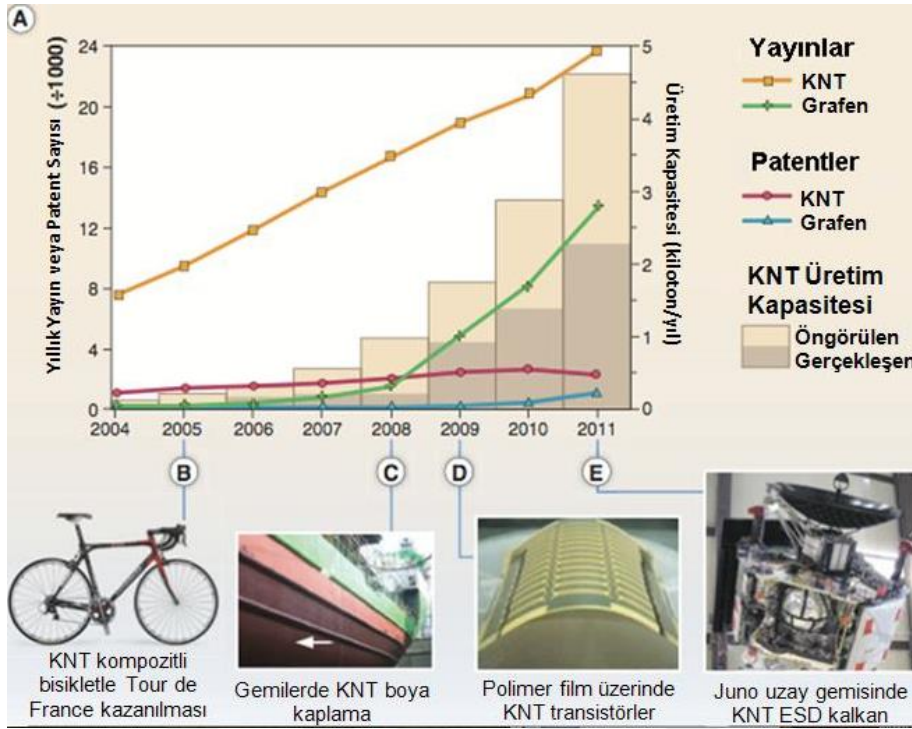
Şekil 1.1. Lif yapısındaki malzemelerin inceliklerine örnekler (Hongu ve ark. 2005)

20. Yüzyılın sonlarından itibaren malzemelerin atomlarının kontrollü bir şekilde yerleştirilebileceği, bu sayede malzemelerde istenilen üstün özelliklerin sağlanabileceğinin anlaşılmasıyla nanoteknoloji alanındaki çalışmalar tüm dünyada hız kazanmaya başlamıştır. Nanoteknolojinin tekstil teknolojisi için de önemli yansımaları olmuş, böylelikle üstün özelliklere sahip yüksek performanslı ürünlerin elde edilmesi mümkün hale gelmiştir. Nanometre ölçeğinde inceliğe sahip liflerin üretimi ise bu doğrultuda son yıllarda yoğunlaşılan alanlardan birisidir.

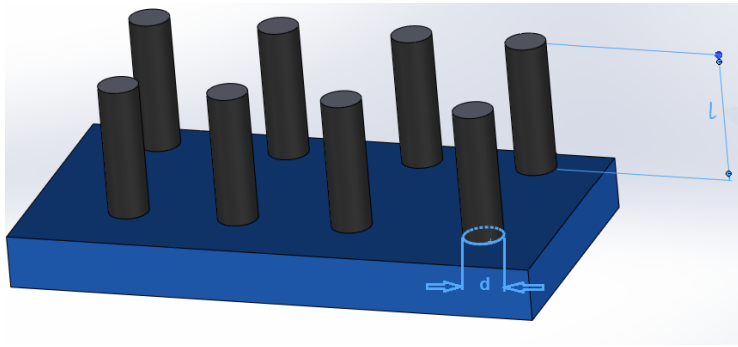
Öte yandan karbon nanotüpler (kısaca KNT'ler), üstün özellikleri nedeniyle teknolojik olarak ilgi çeken ve son yıllarda üzerinde yoğun çalışılan malzemelerdendir. Nitekim 1990'larda KNT'ler konusunda çalışmaların hızla artmasıyla birlikte, yayın ve patent sayısında önemli artış gözlenmektedir (Şekil 1.2). Bu gelişmelere paralel şekilde ticari anlamda KNT üretiminin esasında 2000'li yıllarda başladığını ve 2006 yılından itibaren dünyada KNT üretiminin 10 kat arttığını söyleyebiliriz (De Volder 2013).

Günümüzde KNT'ler çoğunlukla toz partikül halde üretilmektedir. Daha çok kompozit malzeme ya da ince film halinde malzemelerin üretiminde kullanılan KNT'lerin, söz konusu malzemelerde tam anlamıyla oryante olamaması nedeniyle üstün özellikleri nihai ürüne tam olarak yansıtılamamakta, dolayısıyla elde edilen özellikler de sınırlı olmaktadır. Bu nedenle, normalde toz partikül halinde üretilen bu üstün nano-malzemelerin son yıllarda eğrilebilir formda yani karbon nanotüp elyaf olarak üretilmesi gerçekleştirilmiş, böylelikle bu üstün malzemelerin özelliklerini nispeten koruyarak fotovoltailerden aktüatörlere varıncaya kadar çok çeşitli kullanım alanına sahip üstün performanslı teknik ipliklere dönüştürülmesi mümkün hale gelmiştir (Göktepe 2015).

Söz konusu eğrilebilir KNT'ler aşağıda şematize edildiği şekilde silikon bir altlık üzerinde yer alan lif dizinleri olarak üretilmekte (Şekil 1.3), henüz çok yeni olan çalışmalarda bu dizinler yan yana dizilmiş liflerin yapmış olduğu çağrışımdan yola çıkarak KNT ormanı (CNT forest) olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 1.2. KNT'lere yönelik yayın ve patent sayısında yıllar bazında artış (De Volder ve ark. 2013)



Şekil 1.3. KNT ormanına ait şematik gösterim

Sunulan tez çalışmasında, dünyada henüz çok az sayıda ileri araştırma merkezinde KNT ormanı olarak üretilebilen eğrilebilir KNT'lerin ipliğe dönüştürülmesi ve elde edilen ipliklerin yapısal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Nitekim henüz az sayıda da olsa literatürde bu alanda yapılan çalışmalarda daha çok eğrilebilir karbon nanotüplerin üretilmesi ve ipliğe dönüştürülmesi üzerinde durulmakta olup, tamamen yeni bir alan olan bu konuda karbon nanotüp liflerden elde edilen ipliklerin özellikleriyle ilgili çalışma sayısının oldukça ise çok sınırlı olduğu görülmektedir.

Bu konu üzerine literatürde yapılan çalışmalar incelenecek olursa, Zhang ve ark. (2005) yaptıkları çalışmalar sonucu dikey yönlendirilmiş nanotüp lif dizinleri geliştirerek ürettikleri transparan nanotüp yüzeylerin, yüksek anizotropiye sahip elektrik iletkenliğe sahip aerogel yüzeyler olarak yoğunlaştırılabildiğini ve bu malzemelerin plastiklerin mikrodalgalarla bağlanmalarında ve transparan, yüksek elastomerik elektrotların, iletken aplikatörlerin, elastik organik ışık yayan diyotların (OLED) üretiminde kullanılabileceğini belirtmiştir.

KNT'lerden sürekli iplik eğrilmesine yönelik ilk çalışma ise Zhang ve ark. (2006) tarafından yapılmıştır. Burada çok iyi hizalanmış karbon nanotüp elyaf dizinlerinden 20-30 µm inceliğinde kompakt bir iplik üretmişlerdir. Bu işlem esnasında ipliği ayrıca etanol içerisinde çekerek azalan yüzey alanından dolayı ipliğin ilk hali kadar yapışkan olmadığı ve bir motor yardımıyla ya da elle kolayca sarılabilir olduğu ve ayrıca büküm işlemiyle mukavemetinin de belirgin ölçüde iyileştiği belirtilmektedir.

Atkinson ve ark. (2007) nanotüplerin, nano yüzey veya iplik formuna dönüştürülürken özelliklerini kaybetmemeleri için, bağlayıcılara olan gereksinimi ortadan kaldırmak amacıyla katı şekil verme yöntemi üzerine yaptıkları çalışmada, KNT ipliklerde 700 MPa kopma mukavemeti değerine ulaştıklarını ve iplik mukavemetinin, nanotüp uzunluğu artırılarak ve nanotüp kalitesi iyileştirilerek arttırılabildiğini; iplik modülünün de belirli bir sınıra kadar bükümün azalmasıyla arttığını belirtmişlerdir.

Zhang ve ark. (2007) ise bir motor üzerine monte edilmiş, dönüş hızı değiştirilebilen bir mikro-probdan oluşan iğ vasıtasıyla karbon nanotüp demetinden KNT iplik eğirerek, eğirme prosesini bir optik mikroskop altında analiz etmişlerdir. Bu çalışmada teorik bir uzunluk sınırlaması olmamasına rağmen, kullanım kolaylığı sağlaması düşüncesiyle 20 cm uzunluğunda KNT ipliklerin üretildiği belirtilmiştir.

Tran ve ark. (2009) ise modifiye bir eğirme işlemi kullanarak karbon nanotüp ipliklerin kopma mukavemeti direncini arttırmaya yönelik çalışmışlar ve eğirme sistemini bölgelere ayırarak modifiye etmişlerdir. Kullanılan sistemin KNT lif yığınlarının daha kontrollü bir şekilde gerilmesine izin verdiği belirtilmektedir. Çalışmada eğirme işleminin daha iyi anlaşılmasına dair bilgilerin yanı sıra KNT kompozit iplikler gibi yeni fikirler ortaya koymuşlardır.

Lepro ve ark. (2010), KNT ormanlarının yaygın olarak oluşturulduğu yüzeyler olan silikon levhalar yerine, uygun fiyatlı metalik yüzeyler üzerinde KNT ormanlarını oluşturma üzerine çalışmışlardır. Metal yüzeyler üzerinde çok duvarlı, çift duvarlı, tek duvarlı KNT dizinleri ve çok duvar-tek duvar karışımı KNT dizinleri oluşturmaya başarmışlar ve bu metotla bu yüzeyler üzerinde oluşturdıkları KNT'lerden elde edilen ipliklerin ve yüzeylerin

elektiriksel ve mekanik özelliklerinde ilgi çekici sonuçlar elde etmişlerdir. Çalışmada bu özelliklerin, saydam iletken filmler, kutupla tırıcılar, polarize ışık kaynakları, organik ışık yayan diyotlar, termo-akustik hoparlörler, yapay kaslar, ışınım ölçerler, iletken ve ışık yayan ısı da ıtıcılarının parçaları gibi çeşitli alanlarda kullanım yeri bulacağı belirtilmektedir.

Zhong ve ark. (2010), karbon kaynağı olarak etanol ve aseton karışımının kullanıldığı bir gaz akışı sırasında kimyasal buhar  okeltme (CVD) prosesi ile çok katmanlı yapıya sahip kontinu KNT iplik üretmişlerdir.

Foroughi ve ark. (2011) ise yapay kaslara yönelik yaptıkları çalışmada, üretmiş oldukları KNT ipliklerin burulma hareketi üzerinde  alı mı lar ve söz konusu ipliklerin herhangi bir motor kullanımına gerek kalmadan, dönen birer elektrot olarak kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır.

Lima ve ark. (2011), çeşitli nano partikül ilaveleriyle fonksiyonel KNT ipliklerin üretiminin mümkün olduğunu ortaya koymuş ve iplik mekanik özelliklerinin, dokunabilir, dikilebilir ve giyilebilir elektronik tekstillerin uygulamalarında kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca TiO₂ ilavesinin kendi kendine temizlenebilen akıllı tekstillerde ve güneş pillerinde ışık absorpsiyonunun ayarlanması için etkili olduğu sonucuna ula mı lardır.

Miao (2011), karbon nanotüp ipliklerin elektiriksel iletkenlikleri üzerine çalışarak iplik yapısındaki gözeneklilik ile iletkenlik arasında ters orantı olduğu sonucunu ortaya koymuştur.

Iijima ve ark. (2012), SEM görüntülerinde k  uk çaplı ve d  uk çap varyasyonuna sahip; e rilebilen ve e rilemeyen dikey hizalanmış karbon nanotüp ormanlarından yapılan iplik e rilmesinin gözlemlenmesine yönelik bir çalışma yapmıştır. Çalışmada e rilebilen karbon nanotüp ormanlarının düzgün yapıda oldukları, ancak aktif katalizör parçacıklarının azalmasından dolayı e rilemeyen KNT ormanlarında liflerin belirgin bir farklılık olarak kıvrımlı bir yapıda oldukları belirtilmektedir.

Lima ve ark. (2012), ilave kimyasal malzemelerle takviye edilen bükümlü karbon nanotüp ipliklerin; elektrolitsiz, yüksek mukavemet sağlayan yapay kaslar olarak kullanılmasına yönelik  alı mı lardır.

Ghemes ve ark. (2012), yaptıkları çalışmada 5 mm geni li indeki bir KNT ormanından çekim yaparak 7000 t/m'lik büküm vererek 20  m inceli inde KNT iplikler elde etmişlerdir. Bu KNT ipliklerin mukavemet testlerinde %10 sabit uzama yöntemine göre 1 cm'lik numunelerle  alı mı lar ve 1 GPa'dan daha yüksek kopma mukavemeti ve 50 GPa Young Modülü değerlerini elde etmişlerdir.

De Volder ve ark. (2013), yaptıkları kapsamlı çalışmada KNT'lerden üretilmiş iplik ve yüzeylerin mekanik, ısıl ve elektiriksel  zelliklerinin, KNT'lerin kendi özelliklerine kıyasla

belirgin ölçüde düşük olduğunu ortaya koymuştur. Yüksek kaliteli birkaç duvarlı KNT'lerden yapılan ipliklerde, 357 GPa modül ve 8.8 GPa mukavemet değerlerine ulaşabildiklerini, santimetre ölçekli çenelerde ise 2 GPa değerinde, yani yaklaşık olarak Kevlar lifinin mukavemet değerlerine eşit değerlere ulaştıklarını belirtmişlerdir.

Haines ve ark. (2014) yapay kaslar üzerine yaptıkları çalışmada misina ve dikiş ipliklerini eğrilebilir KNTler gibi iletken malzemelerle kaplayarak, yapay kas olarak mevcut alternatiflere kıyasla kasılma performansını 10 kat arttıran, maliyeti çok düşük tamamen yeni bir yapay kas geliştirerek bu alana tam anlamıyla yeni bir yön kazandıracak çalışma başlatmışlardır.

Sonuç olarak, literatürde yer alan çalışmalar söz konusu özel ipliklerin üretiminin son derece yeni bir alan olduğunu göstermekte, bu ipliklerin yapısal ve mekanik özelliklerinin yakından incelenmesi konusundaki çalışmalara olan ihtiyacı açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

2. KARBON NANOTÜPLER

2.1 Kısa Tarihçe

Karbon atomu, oluşturduğu farklı kristal biçimlerine göre doğada üç allotropik formda bulunmaktadır: Elmas, grafit ve amorf karbon. Karbonun yapay allotropları arasında ise camsı karbon, fulerenler (buckyball) ve karbon nanotüpler yer almaktadır. Fuleren, tek tabakalı grafit yapısı olan grafen başlangıç maddesinden elde edilen, 60 adet karbon atomunun futbol topu şeklinde bir kafes yapı halini alarak oluşturduğu küresel molekül olup, ilk kez Rice Üniversitesi'nde H. Kroto ve ark. tarafından 1985 yılında keşfedildiği belirtilmiştir (Göktepe 2015). Karbon nanotüpler ise 1991 yılında Japonya'da elektron mikroskopisti S. Iijima tarafından fuleren sentezi esnasında deneysel olarak keşfedilmiştir. Bununla birlikte esasında ilk kez 1952'de Rus bilimadamı Radushkevich tarafından keşfedildiğine dair iddialar da mevcuttur. KNT'ler C_{60} molekülünün iki eşit parçaya bölünüp aralarına grafenden oluşan silindirin yerleştirilmesiyle meydana getirilmiştir. Bal peteği deseninde sıralanmış karbon atomlarının bir araya gelmesiyle oluşan örüntünün (grafit) kendi üzerinde döndürülerek sarıldığı ve kenarlarının birleştirildiği düşünülürse bir grafit tüpü yani karbon nanotüp oluşturulmuş olmaktadır. Dolayısıyla, KNT'ler, grafitin, çapı bir kaç nm olan silindirik bir tüp formunda şekillenmesiyle oluşan, uzunluğu birkaç nm ile birkaç μ m aralığında değişebilen karbon atomlarından meydana gelen yapılardır (Göktepe 2015).

KNT'lerin ucu açık ya da kapalı olabilmekte, uzunluk/çap oranları yaklaşık 100 kata kadar çıkabilmekte, uzunluk ve çap değerlerine göre fiziksel ve kimyasal özellikleri değişebilmektedir. Yüksek mukavemet ve modül, yüksek elektriksel ve ısı iletkenlik, nispeten yüksek ve düşük sıcaklıklarda stabilite gibi birçok üstün özelliğe ve düşük yoğunluğa sahip olan KNT'ler iki boyutlu grafit tabakası olan grafenle birlikte pek çok bakımdan keşfedilen en sofistike malzemeler arasında addedilmektedir (Göktepe 2015).

2.2. Karbon Nanotüplerin Sınıflandırılması

KNT'ler katman sayısına ve katlanma şekline göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır (Özdoğan ve ark. 2006, Küçükyıldırım ve Eker 2012);

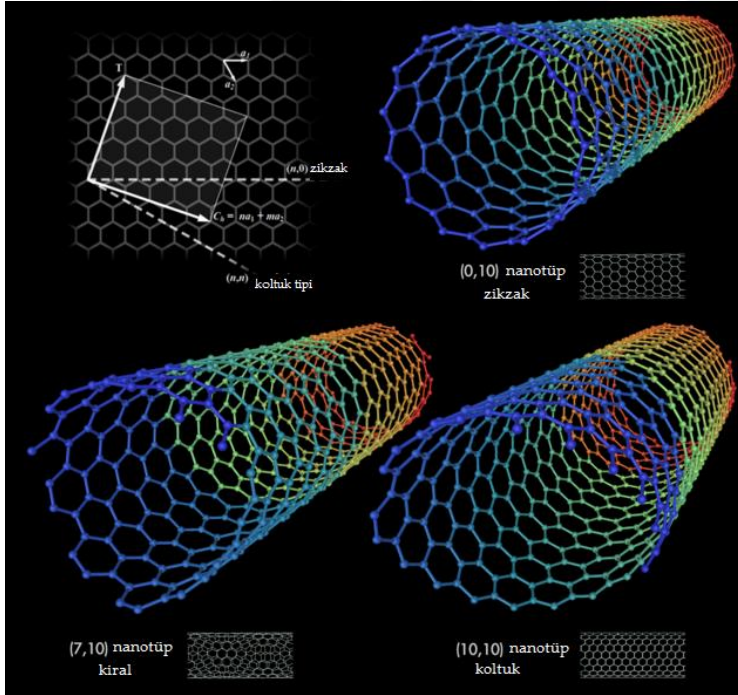
a. Katman sayısına göre;

KNT'ler grafitin doğası gereği tek veya çok katmanlı olmasına bağlı olarak tek veya çok duvarlı/katmanlı (sırasıyla SWNT ve MWNT'ler) olarak sınıflandırılmaktadır.

MWNT'ler, çok sayıda SWNT içermektedir. Sonuç olarak MWNT'lerin her bir katmanı farklı elektronik karakter ve kiraliteye sahip olabilir. MWNT'ler üzerindeki çalışmalar, elektriksel iletim özelliklerinin daha çok en dış katmanın iletkenliğine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, yüzey fonksiyonlaştırma işleminin elektronik özellikleri neden ciddi anlamda değiştirdiğini de açıklamaktadır.

b. Katlanma şekline göre;

KNT'lerin katlanma şekline göre farklı türlerini anlamak için grafit yapının bir eksen etrafında dönerek silindirik şeklinde katlandığını hayal etmek yardımcı olacaktır. Söz konusu grafit yapının boyutlarına ve nasıl katlandığına bağlı olarak nanotüplerin farklı çeşitleri mevcuttur (Şekil 2.1). Buna göre nanotüpler zig-zag, kiriş (armchair) veya kiral (chiral) formunda olabilmektedir. KNT'ler kiralitelerine bağlı olarak yarı iletken ya da metalik özellik göstermekte, çaplarındaki küçük bir değişiklik bile iletkenliklerinin metalikten yarı iletken hale dönüşmesine yol açmaktadır (Saito 1992, Eser 2006).



Şekil 2.1. Zig-zag, kiral ve kiriş KNTler (Eser 2006)

2.3. Karbon Nanotüplerin Sentezlenmesi

Karbon nanotüplerin sentezlenmesi tez çalışması konusunun kapsamı dışında olduğu için detaylı incelenmemiş olup, mevcut farklı yöntemler şu şekilde özetlenebilir:

Katı Halde Karbondan Sentezlenenler;

Katı hâlde karbondan sentezleme yöntemlerinde karbon kaynağı, katı halde bulunan grafit bir parça kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık ve basınçlar söz konusu olmaktadır. Lazerle aşındırma, ark boşaltma ve solar fırın yöntemleri; katı halde karbondan eğrilebilir KNT üretim yöntemleridir (Küçükyıldırım ve Eker 2012).

Gaz Halde Karbondan Sentezlenenler;

Kimyasal, ısı kimyasal, plazmayla güçlendirilmiş kimyasal ve mikrodalga plazmayla kimyasal buhar çökeltme yöntemleri ile buhar fazında büyütme yöntemi; gaz halde karbondan sentezlenen KNT üretim yöntemleridir (Küçükyıldırım ve Eker 2012).

Diğer Sentezleme Yöntemleri;

Hidrotermal sentezleme ve elektroliz yöntemi gibi çok sık kullanılmayan yöntemler de mevcuttur (Küçükyıldırım ve Eker 2012).

2.4. Karbon Nanotüplerin Temel Özellikleri

2.4.1. Boyutsal özellikler

SWNT ve MWNT'ler tipik olarak sırasıyla 0,6 - 1,4 nm ve 10 nm çaplarında üretilebilmekle birlikte 100 nm üzerinde çapa sahip MWNT üretimi de mümkündür. Tek duvarlı nanotüpler, fiziksel eğme ve bükmeye inanılmaz derecede dayanıklıdır. 120 derecelik açıyla eğilmekte sonra hasarsız olarak eski durumuna gelmektedirler (Eser 2006).

Eğrilebilir KNT'ler yukardaki bölümlerde Şekil 1.3'de şematize edildiği şekilde lif dizinleri (KNT ormanı) olarak üretilmektedir. Eğrilebilir KNT'lerin uzunlukları 100 nm ile birkaç cm arasında değişmektedir (De Volder ve ark. 2013). Çok duvarlı nanotüplerden (MWNT) oluşan KNT ormanında lif çaplarının da yaklaşık 10 nm civarında ve orman yüksekliğinin de 70 – 300 µm arasında olduğu bilinmektedir (Zhang ve ark. 2005). Tran ve

ark. (2009) ise çok duvarlı karbon nanotüplerle ilgili yaptıkları çalışmada eğrilebilir KNT uzunluğunun 300- 400µm, lif çaplarının 7,5 – 8,5 nm olduğunu belirtmiştir.

2.4.2. Mekanik özellikler

Karbon nanotüplerin Young modülünün 1 TPa'nın üzerinde olduğu ve eksen boyunca nanotüpün bir elmas kadar sert olduğu belirtilmektedir. Tahmini kopma mukavemeti değerleri 200 GPa civarında olup, bu değer çelikten çok daha yüksektir. Üstün dayanımları nedeniyle uygun miktarlarda nanotüp üretimi gerçekleşirse yapı endüstrisinde önemli bir sorunun ortadan kalkacağı belirtilmektedir (Eser 2006).

Karbon nanotüpler; yüksek modüllü (yaklaşık 0,7 TPa), yüksek mukavemetli (yaklaşık 30 GPa) malzemelerdir (Atkinson ve ark. 2007). Çok duvarlı nanotüplerin elastisite modülleri 1 TPa, mukavemetleri 100 GPa'dır (De Volder ve ark. 2013). Karbon nanotüpler; yüksek modüllü (yaklaşık 1 TPa), yüksek mukavemetli (yaklaşık 150 GPa) malzemelerdir (Zhang ve ark. 2007). De Volder ve ark. (2013), yüksek kaliteli birkaç duvarlı KNT'lerden yapılan ipliklerde, yalnızca milimetre ölçülerindeki KNT'lere uygun çene mesafesinde, 357 GPa modül ve 8.8 GPa mukavemet değerlerine ulaşabildiklerini, santimetre ölçekli çenelerde ise 2 GPa değerinde, yani yaklaşık olarak Kevlar lifinin mukavemet değerlerine eşit değerlere ulaştıklarını ve karbon lifleri yerine kullanılabilecek potansiyele sahip olduğu belirtmişlerdir.

Öte yandan söz konusu eğrilebilir KNT'lerden elde edilen karbon nanotüp (KNT) ipliklerin, ağırlıklarının 100000 katı kadar ağırlığı kaldırabildiği bilinmektedir. Son yıllarda parafin vaksı ilave edilmiş KNT ipliklerin ısı, ışık veya elektrik etkisi vasıtasıyla, yapılarında bulunan parafin vaksın erimesi sonucu bu ipliklerde üstün uzama-kısalma davranışının gerçekleştiği; bu şartlar ortadan kaldırıldığında ise 25 milisaniye gibi çok kısa bir sürede eski hallerine dönebildiği gözlenmiştir. Bu yönüyle yapay kas olarak kullanımı ön planda olan bu iplikler, dokuma, örme ve dikim gibi tekstil işlemlerine müsait olup, teknik ve akıllı tekstiller için önemli bir potansiyele sahiplerdir (Anonim 2012).

İplik enine kesitinde 100000 adet KNT yer alabilen söz konusu ipliklere yaklaşık 20000 t/m büküm verilerek parafin gibi konuk materyal ilavesiyle %3 uzayıp kısalabilen, kendi ağırlığının 100000 katı civarında bir ağırlığı taşıyabilen, yaklaşık 10000 d/dk torsiyon hareketi yapabilen çelikten daha güçlü ipliklerin elde edilebildiği bilinmektedir (Lima ve ark. 2011, Lima ve ark. 2012).

2.4.3. Elektriksel özellikler

Karbon nanotüpler yüksek elektriksel iletkenliğine (10-30 kS/cm) sahip malzemelerdir (Atkinson ve ark. 2007). Tipik olarak metalik özellikte olan MWNT'ler, 10^9 Acm^{-2} seviyesinde akım taşıyabilmektedir (De Volder ve ark. 2013).

Karbon-ark yöntemiyle üretilen çok duvarlı karbon nanotüplerin direncinin metalik ile yarı iletken seviye arasını kapsayan $5 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ ile $6 \times 10^{-2} \Omega\text{m}$ aralığında, katalitik yöntemlerle üretilen çok duvarlı karbon nanotüplerin direncinin ise $8 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ ile $20 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ aralığında olduğu belirtilmektedir. Karşılaştırmak gerekirse, yüksek kaliteli bir karbon lifinin elektriksel direnci yaklaşık $1 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$, amorf karbonunki ise $5 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ ile $8 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ aralığındadır (Miao 2011). Aynı araştırmacı, çalışmasında KNT ipliklerin elektriksel iletkenliğinin ise $1,5 \times 10^4 \text{ S/m}$ ile $3,7 \times 10^4 \text{ S/m}$ gibi geniş bir aralıkta değiştiğini, elektriksel direncin ise $2,6 \times 10^{-5} \Omega\text{m}$ ile $6,7 \times 10^{-5} \Omega\text{m}$ aralığında olduğunu ve bu değerlerin, kendisinin yararlandığı kaynaklardakilerle yakın değerler olduğunu belirtmiştir.

2.4.4. Isıl özellikler

Karbon nanotüpler yüksek ısı iletkenliğe (yaklaşık 2000 W/m K) sahip malzemelerdir (Atkinson ve ark.2007) ve bu iletkenlik değeri, bakırın yaklaşık 4 katı, konvansiyonel karbon lifinin yaklaşık 2 katıdır (Sinnott ve ark. 2001). SWNT'lerin ısı iletkenlik değerleri ise oda sıcaklığında 3500 W/mK değerine ulaşabilmektedir (De Volder ve ark. 2013). Nanotüpler şu ana kadar bilinen, elmas dahil, tüm malzemelere göre daha iyi ısı iletimi sağlamaktadır (Eser 2006).

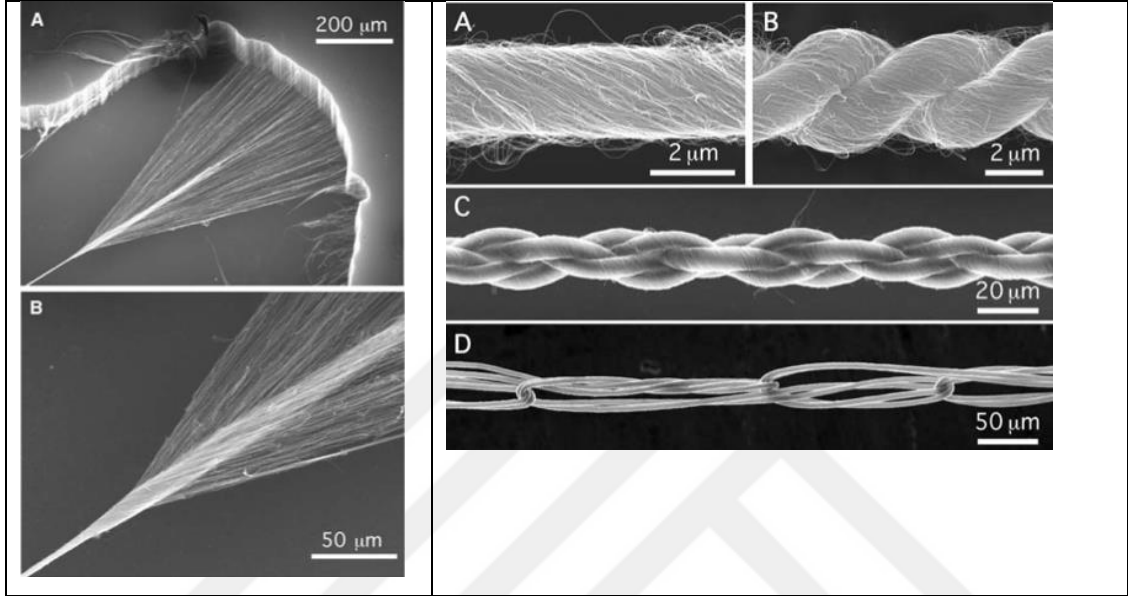
2.5. Eğrilebilir Karbon Nanotüpleri İpliğe Dönüştürme Yöntemleri

KNT elyaf üretimi ve bunların ipliğe dönüştürülmesine yönelik çalışmalar dünyada belli sayıda araştırma merkezi tarafından yürütülmekte ve buna bağlı olarak literatürde sınırlı sayıda araştırma yer almaktadır. KNT liflerinin iplik haline dönüştürülmesinde kullanılan yöntemler, kuru ve yaş yöntemler olmak üzere iki gruba ayrılarak incelenebilir (Göktepe 2015). Aşağıda bu yöntemler kısaca özetlenmektedir.

2.5.1. Kuru eğirme ile karbon nanotüp iplik üretimi

CVD tekniği ile üretilen KNT elyaf dizinlerinin doğrudan ipliğe dönüştürülmesi işlemi literatürde kuru eğirme olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde; eğrilebilir KNT liflerinin üretimini takiben, konvansiyonel şapel iplik eğirmeye benzer şekilde çekim, büküm ve sarım

aşamalarıyla iplik üretimi gerçekleştirilmektedir. Sonuç olarak kuru eğirme sonrasında Şekil 2.2’de gösterildiği gibi konvansiyonel iplik yapısına benzer helisel şekilde yönlenmiş liflerden oluşmuş düzgün yapıda KNT iplikler elde edilmekte, iplik incelik ve bükümü arzu edilen şekilde kontrol edilebilmekte, ayrıca çok katlı ya da farklı iplik konfigürasyonları rahatlıkla ele edilebilmektedir (Göktepe 2015).

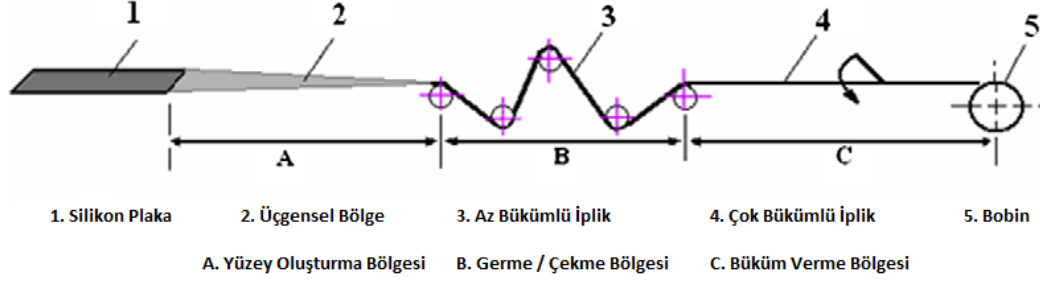


Şekil 2.2. KNT liflerin büküm verilerek ipliğe dönüştürülmesi; tek kat ve katlı KNT ipliklere örnekler (Zhang ve ark. 2004)

Bu yöntemle ilgili deneyimler, 1 cm uzunluğundaki KNT ormanından yaklaşık 3 m uzunluğunda elyaf şeridi çekilebildiğini göstermektedir. Çekilen şerit yoğunluğunun tipik olarak 30 mg/m² civarında olduğu bilinmektedir. Bu şekilde 1 cm² alanına sahip bir KNT ormanından 10-50 m uzunluğunda iplik üretilmekte ve 10000-100000 t/m büküm aralığında, örneğin 1-10 µm çapa sahip son derece ince iplikler eğrilebilmektedir (Göktepe 2015).

Tran ve ark. (2009) ise modifiye bir eğirme işlemi kullanarak karbon nanotüp ipliklerin kopma mukavemeti direncini arttırmaya yönelik çalışmalarında, karbon nanotüp ipliklerin kuru halde eğrilmesinde iplikteki kopma mukavemeti direnci ve eğirme sisteminin iplik yapısına etkisini araştırmışlardır. Aynı araştırmacılar ısı uygulamalarının mukavemeti özelliklerine etkisinden de bahsetmişler ve bunları kapsayan yeni bir eğirme sistemi üzerinde çalışmışlardır (Şekil 2.3). Sunulan eğirme sisteminde, karbon nanotüp elyaf şeridi kontrollü bir şekilde gerilebildiği, karbon nanotüp demetlerinin daha iyi hizalandığı ve büküm verilerek

büyük ölçüde sıkıştırılmış bir iplik yapısının elde edilebildiği belirtilmektedir. Bu yöntemle, önceki çalışmalardaki gerilmeye maruz kalan ipliklere kıyasla yaklaşık iki kat daha yüksek mukavemet elde edildiği görülmektedir.

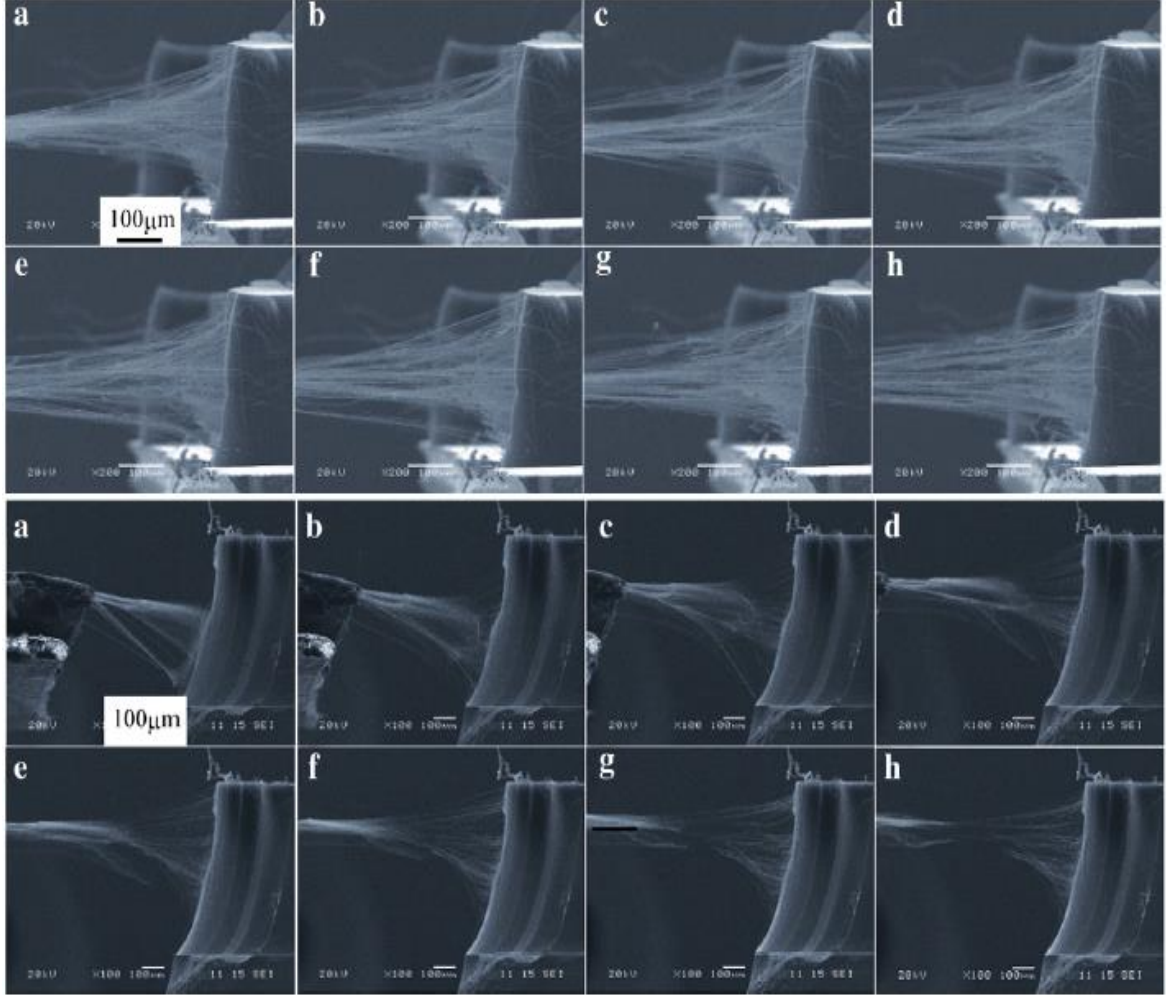


Şekil 2.3. KNT iplik eğirme sisteminin şematik görünümü (Tran ve ark. 2009)

Zhang ve ark. (2007) ise bir mikropobdan oluşan iğ vasıtasıyla karbon nanotüp demetinden lifleri ipliğe dönüştürmüşlerdir. Bu mikropob iğ, dönüş hızının ayarlanabildiği bir motor üzerine yerleştirilmiştir. Eğirmenin başlatılması için gereken pürüzlülüğün sağlanması için mikropob iğ ucuna 2 μm 'lık silikon nitrit parçacıkları yüklenmiştir. Karbon nanotüp lifler 1500-2500 d/dk aralığındaki dönüş hızı ve 5 cm/dk çekim hızı ile eğrilmişlerdir. Başlangıçtaki şeridin genişliği, eğrilen iplik çapını belirlemektedir. Bu çalışmada, teorik bir uzunluk sınırlaması olmamasına rağmen, kullanım kolaylığı sağlaması düşüncesiyle karbon nanotüp iplikler 20 cm uzunluğunda üretilmiştir. Eğirme sonrası büküm işleminde, bir ucu bükümü veren döndürücüye bağlı olan ipliğin diğer ucuna aksel yönde uygun bir ağırlık asılarak gerilim sağlanmaktadır. İşlemin devamında sağlanacak bükümün performansı, büküm hızı ve süresine bağlı olarak değişir. Bu çalışmada 5 cm uzunluğundaki bir karbon nanotüp iplik, 500d/dk devirle 2 dakika boyunca büküme tabi tutulmuştur. Bu araştırmanın sonuçlarına dayanarak, gelecekte daha uzun eğrilebilir karbon nanotüp iplikler üzerine yoğunlaşılacağı öngörülmüştür. Ayrıca bu çalışmada, karbon nanotüp ipliğe bir polimer matris ilavesiyle, iplik dayanımının çok daha geliştirilebileceği de belirtilmektedir (Zhang ve ark. 2007).

Iijima ve ark. (2012) tarafından karbon nanotüplerin eğrilmesinin gözlemlenmesi üzerine yapılan bir çalışmada; eğrilebilen ve eğrilemeyen karbon nanotüp ormanlarından iplik eğirme esnasında alınan SEM görüntüleri incelenmiştir. Karbon nanotüplerin, eğrilebilen dikey yönlenmiş karbon nanotüp ormanlarının tüm kısmından sürekli olarak çekilebildiğini, eğrilemeyen karbon nanotüp ormanlarının kök kısımlarında bağlantıların koptuğunu

belirtmişlerdir. Çalışmada iki tür karbon nanotüp ormanlarının SEM görüntüleri karşılaştırılarak (Şekil 2.4), eğrilebilenlerin düzgün olmasına rağmen, aktif katalizör parçacıklarının azalmasından dolayı; eğrilemeyenlerin kıvrımlı bir yapıda olduğunu belirtmişlerdir.

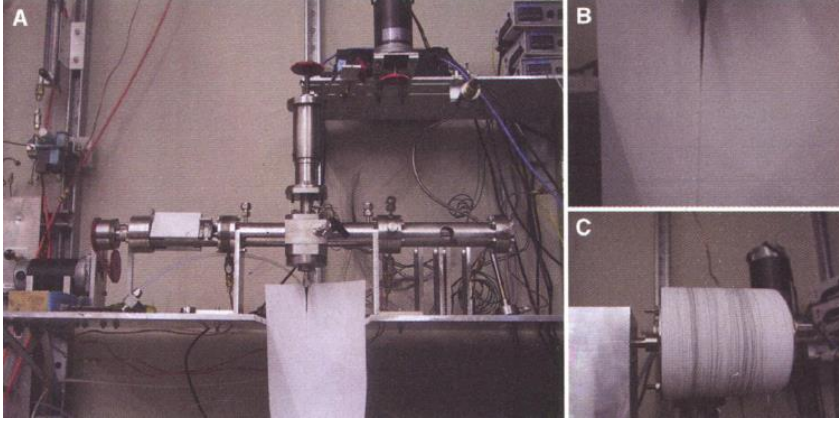


Şekil 2.4. Eğrilebilen ve eğrilemeyen karbon nanotüp ormanları (Iijima ve ark. 2012)

2.5.2. Yaş eğirme ile karbon nanotüp iplik üretimi

Yaş eğirmeyle üretime örnek olarak Rice Üniversitesi'nde (A.B.D.) başarıyla gerçekleştirilen kesintisiz uzunlukta SWNT iplik üretimi verilebilir. Bu proseste KNT'ler %102'lik sülfürik asit içerisinde dispers edilmekte ve ardından dietil eter, %5 sülfürik asit ve su ile işleme tabi tutularak kontinü filament halinde iplikler üretilmektedir (Şekil 2.5). Araştırmada gerek nanotüp oryantasyonunun, gerekse elektrik ve ısı iletkenliklerin yüksek olduğu belirtilmektedir. Ancak bu yöntemde çok uzun süre asitle muameleye bağlı olarak

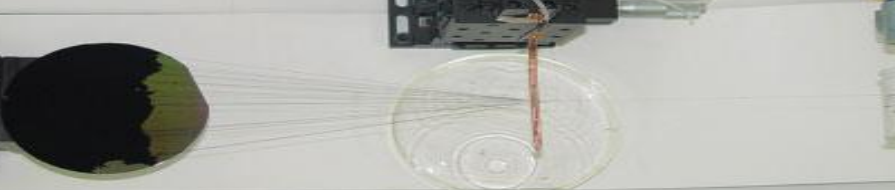
malzemede ortaya çıkan interkalasyon problemi ve korozyon riskinin özellikle endüstriyel üretimler için çok özel üretim ekipmanı ihtiyacına yol açtığı bir gerçektir (Göktepe 2015).



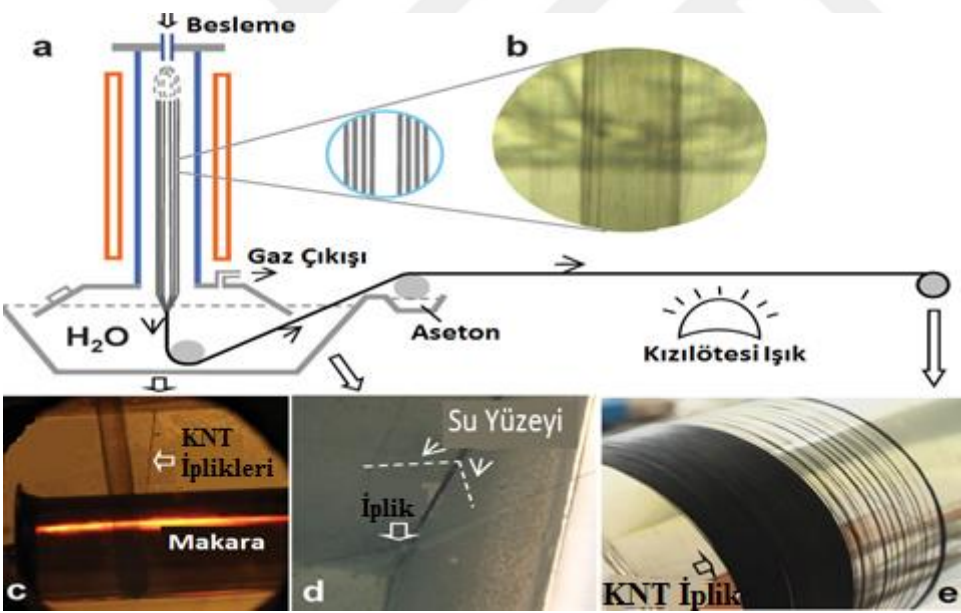
Şekil 2.5. Yaş eğirme ile kesintisiz uzunlukta KNT iplik üretimi (Ericson ve ark. 2004)

Bu bölümde bahsedilecek bir diğer yöntem ise, esasında söz konusu sistemde kuru eğirme ile liflerin çekilmesinin ardından, ilave yaş işlemle dayanım kazandırılması esasına dayanmaktadır. Dolayısıyla hem kuru hem de yaş işlem sınıfına dahil edilebilir. Bu yöntemde Zhang ve ark. (2006) 4 inç'lik yüzeyde çok iyi hizalanmış karbon nanotüp dizilerinden sürekli iplikler eğirerek yaptıkları çalışmada; karbon nanotüp ipliği, KNT ormanından birkaç cm genişliğinde çekilen liflerden 20-30 μm çapında sıkı bir iplik haline getirerek elde etmişlerdir. Bu lifleri etanol ile muamele ederek, azalan yüzey alanından dolayı ipliğin, liflerin önceki hali kadar yapışkan olmadığını belirtmişlerdir (Şekil 2.6). Yine bu ipliğin bir motor yardımıyla veya elle kolayca sarılabildiğini, ayrıca karbon nanotüp iplik mukavemetinin de büyük ölçüde iyileştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca karbon nanotüplerin hidrofobik özellikte olduğunu ama etanol, metanol, aseton, kloroform gibi birçok organik çözücülerle ıslatılabildiği sonucuna da yer vermişlerdir.

Zhong ve ark. (2010) çok katmanlı kontinü karbon nanotüp iplikler üzerine yaptıkları çalışmalarında, kimyasal buhar çökeltmesiyle (CVD) eğirme prosesini kullanarak çok katmanlı yapıya sahip kontinü karbon nanotüp iplik üretmişlerdir. Bu yöntem, karbon nanotüplerin gaz akışı içerisinde Van der Waals kuvvetleri ile birbirine bağlanarak asemble oluşturması esasına dayanmaktadır. Bu çalışmaya göre asetonun buharlaştırılmasıyla oluşturulan karbon nanotüpler, çok yüksek dayanım özelliğine sahip olmuşlardır. Karbon nanotüplerin, karbon kaynağı olarak etanol ve aseton karışımının kullanıldığı bir gaz akışı sırasında kendiliğinden birleşerek katmanlaşabildiklerini keşfetmeleri (Şekil 2.7), bu çalışmadaki eğirme yönteminin temelini oluşturmuştur (Zhong ve ark. 2010). Bu yöntemle



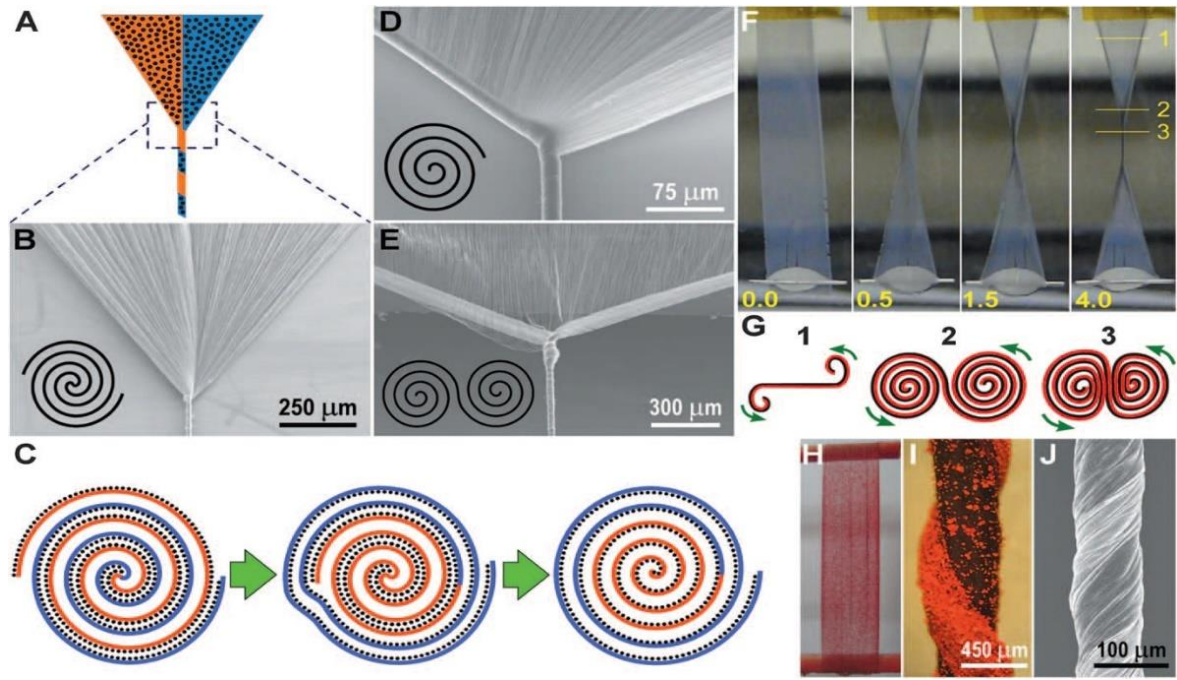
Şekil 2.6. Karbon nanotüp demetlerinden (orman) ipliklerin eğrilmesi (Zhang ve ark. 2006)



Şekil 2.7. a) CVD yöntemiyle sürekli iplik eğirme düzeneği, b) gaz akışındaki karbon nanotüplerin görüntüsü, c) karbon nanotüplerin iplik haline dönüşümü, d) karbon nanotüp ipliklerin görüntüsü, e) bobine sarılması (Zhong ve ark. 2010)

2.5.3. Karbon nanotüp ipliklere ilave fonksiyon kazandırılması

Karbon nanotüp ipliklerde; Arşimet spiralleri, Fermat spiralleri gibi karmaşık yapılarla yüksek fonksiyonellik sağlayan nanopartiküllerin eklenmesi üzerine çalışmalar da literatürde mevcuttur (Şekil 2.8). Ayrıca TiO_2 ilavesinin, kendi kendine temizlenebilen akıllı tekstillerde ve güneş pillerinde ışık absorpsiyonunun ayarlanması için etkili olduğu ifade edilmiştir (Lima ve ark. 2011).



Şekil 2.8. Nanopartikül ilaveli KNT iplikler (Lima ve ark. 2011)

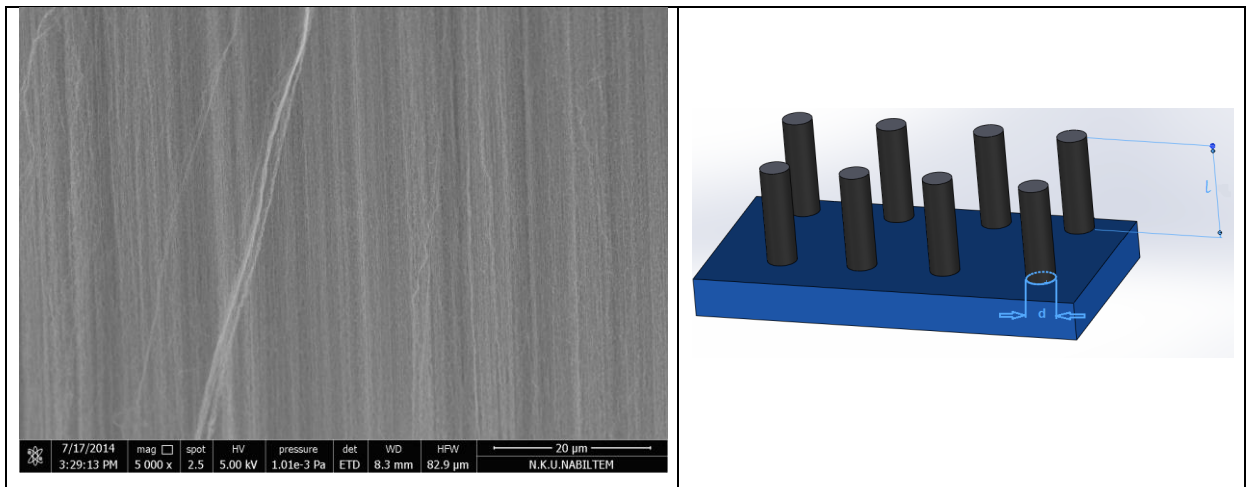
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Karbon Nanotüp Ormanlarının Özellikleri

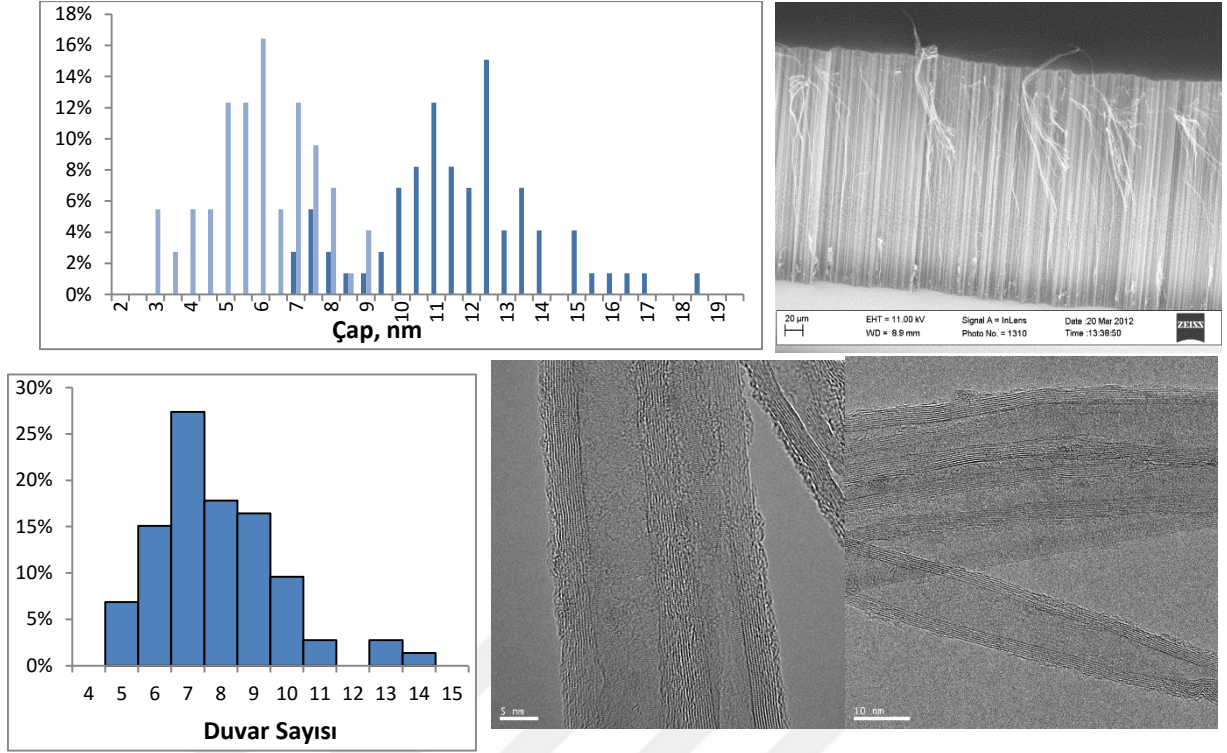
Çalışmada, kendi literatüründe KNT ormanı (CNT forest) olarak adlandırılan ve silikon altlık üzerinde dikey yönde yönlenecek şekilde sentezlenmiş iki ayrı KNT lif dizinleri Teksas Dallas Üniversitesi Nanotech Enstitüsü'nden (ABD) temin edilerek kullanılmıştır (Şekil 3.1). Söz konusu KNT ormanında dikey yönde yönlenmiş lif dizinlerinin tipik SEM görüntüsü Şekil 3.2'de görülmektedir. Çalışmada kullanılan KNT orman özelliklerine ait tipik veriler ise Şekil 3.3'te yer almaktadır. Yer alan sonuçlar, KNT ormanlarının yaklaşık 12 nm civarında dış çapa sahip ve ortalama 7-8 duvarlı liflerden oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan KNT ormanlarına ait örnek bir görüntü



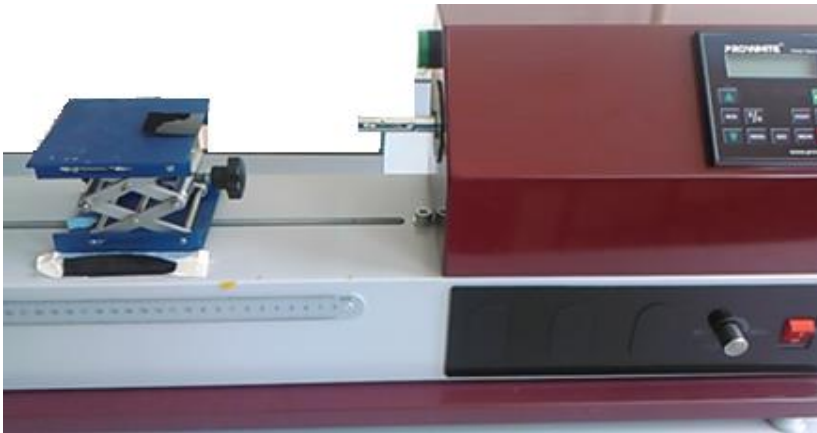
Şekil 3.2. KNT lif dizinlerine ait tipik SEM görüntüsü ve KNT liflerinin şematik gösterimi



Şekil 3.3 Kullanılan KNT lif dizinlerine ait tipik özellikler

3.2. Karbon Nanotüp Ormanlarının İpliğe Dönüştürülmesi

Sunulan tez çalışmasında KNT ormanlarından kuru eğirme yöntemiyle bükümlü iplik eğirilmesi gerçekleştirilmiştir. Eğirme işlemleri, NKÜ Tekstil Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında yer alan Prowhite marka konvansiyonel iplik büküm ölçme cihazı yardımıyla KNT liflerin ormandan şerit halinde çekilmesi ve belirlenen tur sayısında büküm vererek ipliğe dönüştürmek suretiyle gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. KNT iplik eğirme düzeneğinin görünümü

Çalışmada KNT ormanlarından bükümlü iplik üretirken, farklı eğirme yöntemlerinin etkisini incelemek amacıyla iki farklı yol izlenmiştir. Belli bir noktaya sabitlenmiş altlığından KNT liflerin sürekli şekilde çekilmesi ve büküm verilmesi işlemi Yöntem 1 olarak adlandırılmıştır. Yöntem 2’de ise KNT lif dizinlerinin belli uzunlukta şerit halinde çekilerek ön büküm verilmesini takiben elde edilen yarı mamül KNT ormanından ayrılmış ve ipliklere belli bir ağırlık altında nominal büküm verilmiştir. Söz konusu her iki yöntemle elde edilen iplik özellikleri Çizelge 3.1’de özetlenmiştir. Yöntem 2 ile yapılan eğirme işlemlerinden, Yöntem 1’den farklı olarak 6000 t/m ve 7000 t/m ara büküm seviyeleri de çalışmaya dahil edilmiştir. Yöntem 2 ile eğirme işleminde ise 20000 t/m nominal büküm seviyesinde iplik eğirme de planlanmış olmakla birlikte, söz konusu büküm seviyelerinde bu yöntemle eğirmede ipliklerde gözlenen aşırı kıvrım nedeniyle eğirme gerçekleştirilemediği için çalışmanın bu bölümüne dahil edilememiştir.

Çizelge 3.1. KNT iplik eğirme parametreleri

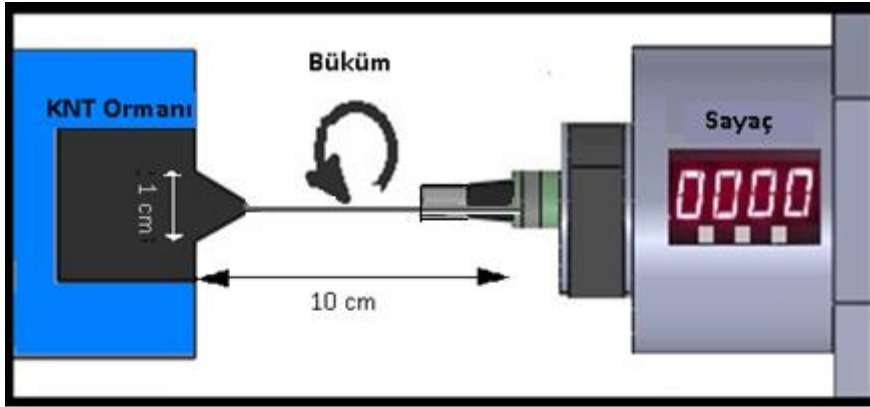
Eğirme Yöntemi	Nominal Büküm Miktarı (t/m)	Hazırlanan Numune (adet)	Büküm Yönü	Lif çekilen KNT Orman Genişliği (mm)
Yöntem 1	5000	10	S	10
	10000	10		
	15000	10		
	20000	10		
Yöntem 2	5000	10	S	10
	6000	10		
	7000	10		
	10000	10		
	15000	10		

Her iki eğirme için izlenen metoda ait detaylı açıklamalar ise aşağıda yer almaktadır.

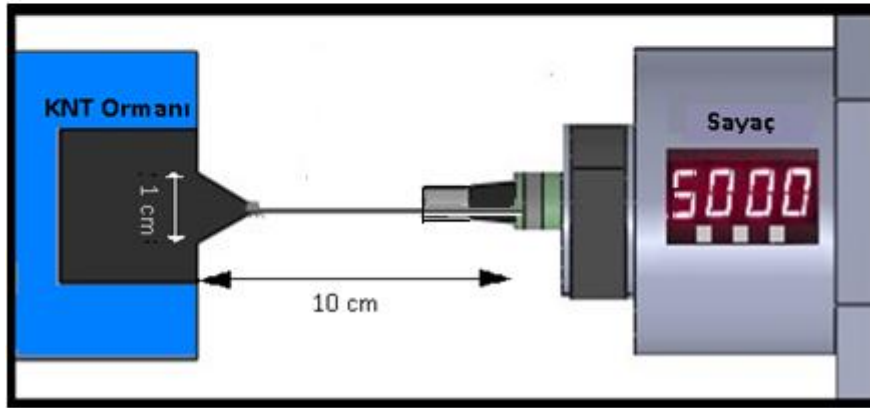
3.2.1. Yöntem 1 ile iplik eğirme

Bu yönteme göre çalışılırken Şekil 3.5’de şematize edildiği üzere, ipliğe dönüştürülecek KNT ormanlarının bulunduğu yüzey, iplik eğirme düzeneğinde kendi eksenine etrafında istenilen miktarda dönüş yapabilen mil (eğirme iği) ile aynı yükseklikte ve bu mile 10 cm uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilmiş bir platform üzerinde sabitlenmiştir.

Daha sonra KNT ormanı üzerinden 10 mm genişliğinde bir alandan hassas şekilde KNT elyaf şeridi çekilerek (Şekil 3.5), 10 cm uzaklıktaki eğirme iğine tutturulmuştur. Söz konusu çekim esnasında lifler, KNT lifleri arasındaki van der Waals kuvvetleri sayesinde birbiri sırasınca akış halinde çekim yönünü takip edebilmektedir. KNT ormanında ve çekilen KNT lifleri arasında herhangi bir dağılma/kopma olmadığından emin olunmasının ardından, liflere uygulanacak nominal büküm miktarı (t/m) ayarlanmış ve belirli uzunlukta KNT iplikler bu şekilde eğirilmiştir.



1. Adım

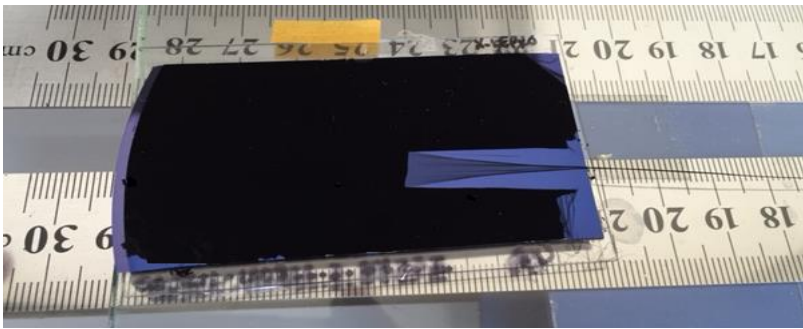


2. Adım

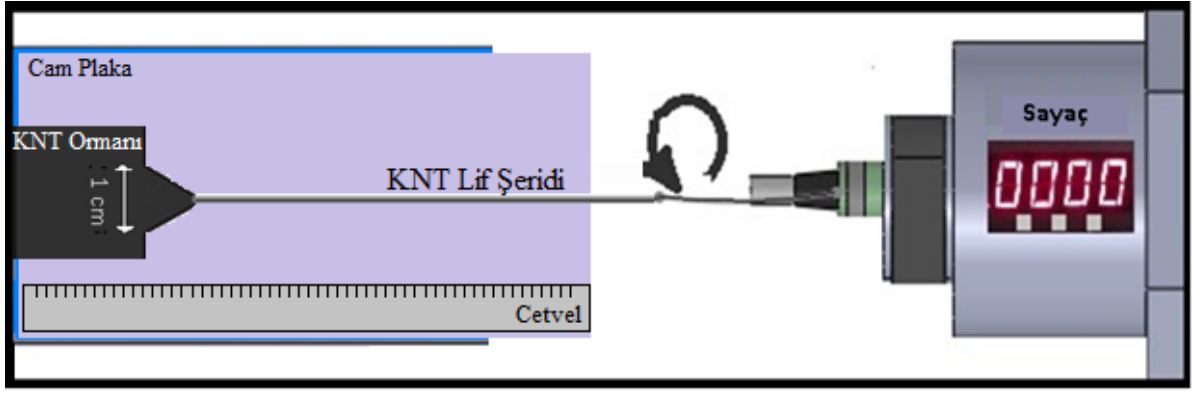
Şekil 3.5. Yöntem 1'e göre KNT ormanından iplik eğirme adımları

3.2.2. Yöntem 2 ile iplik eğirme

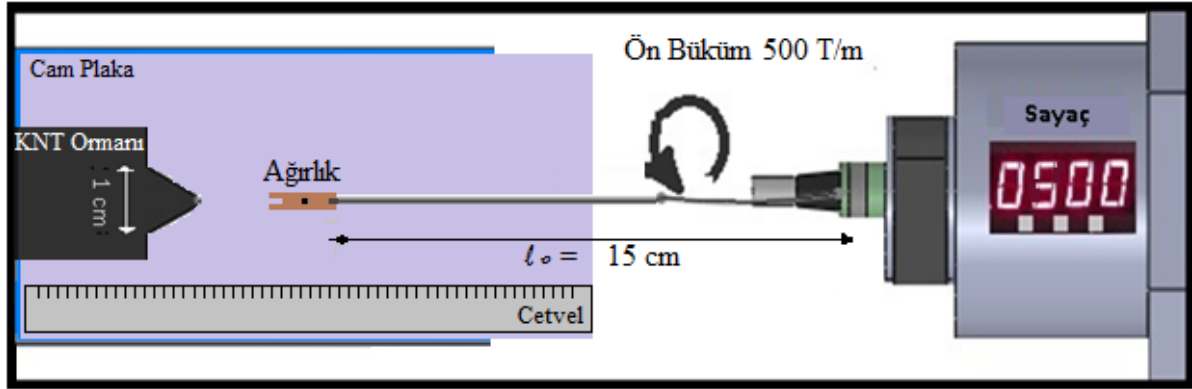
Bu yöntemde de başlangıçta ipliğe dönüştürülecek KNT ormanlarının bulunduğu yüzey, iplik eğirme düzeneğinde kendi eksenini etrafında istenilen miktarda dönüş yapabilen mil (büküm mili) ile aynı yükseklikte olacak şekilde yerleştirilmiş bir platform üzerinde sabitlenmiştir. Ardından Yöntem 1'e benzer şekilde KNT lif dizininden (KNT ormanı) aynı genişlikte (10mm) ve istenen uzunlukta elyaf şeridi çekilmiş (Şekil 3.6) ve şeridin ucu Yöntem 1'de olduğu gibi büküm miline sabit şekilde tutturulmuştur (Şekil 3.7, 1. Adım). Bir sonraki adımda ise söz konusu elyaf şeridine tecrübelerle belirlenen uygun minimum seviyede (500 t/m) ön büküm verilmiştir (Şekil 3.7, 2. Adım). Ön büküm verilmesi işlemine, son derece hassas işlem gerektiren ve çok kolay dağılabilen veya kopabilen KNT şeritlerinin rahat sevkini için ihtiyaç duyulmuştur. Bu işlemi takiben, ön büküm işlemine tabi tutulmuş ve ilk uzunluğu (l_0) belirli söz konusu lif şeridinin serbest ucuna 0,40g kütleyle sahip bir ağırlık hassas şekilde ilaştırılarak bu şekilde esas iplik eğirme işlemi yapılmıştır. Çalışmada tüm ipliklere "S" yönünde büküm verilmiştir. Eğirme sonunda bükümden dolayı kısalmaya bağlı olarak erişilen son uzunluk (l_1) mesafesi de kaydedilmiştir (Şekil 3.7, 3. Adım). Böylelikle bu yöntemde Yöntem 1'den farklı olarak, ipliklere verilen farklı büküm seviyelerinde bükümden dolayı kısalma değerlerinin de belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla tüm eğirme işlemleri, elyaf dizinlerinin yer aldığı altık, bir cetvel ve cam plaka üzerine yerleştirilmek suretiyle gerçekleştirilmiştir.



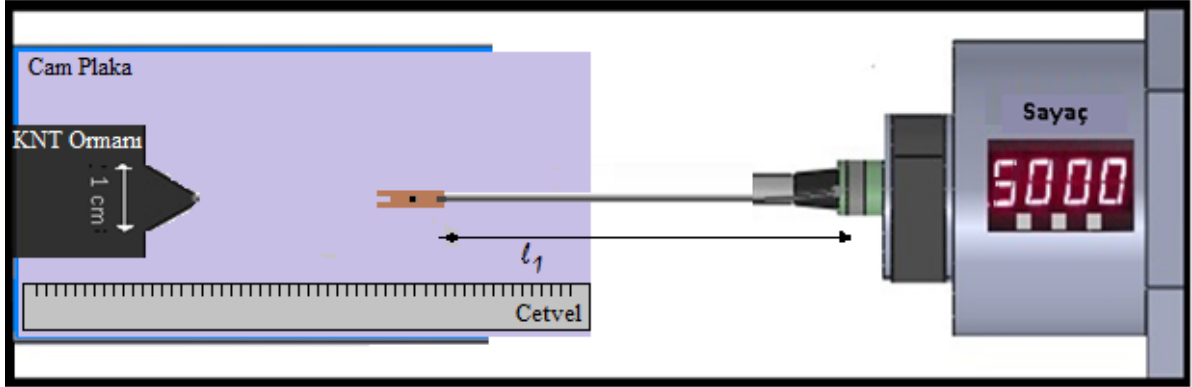
Şekil 3.6. KNT lif dizininden (KNT ormanı) lif çekimine ait görüntü



1. Adım



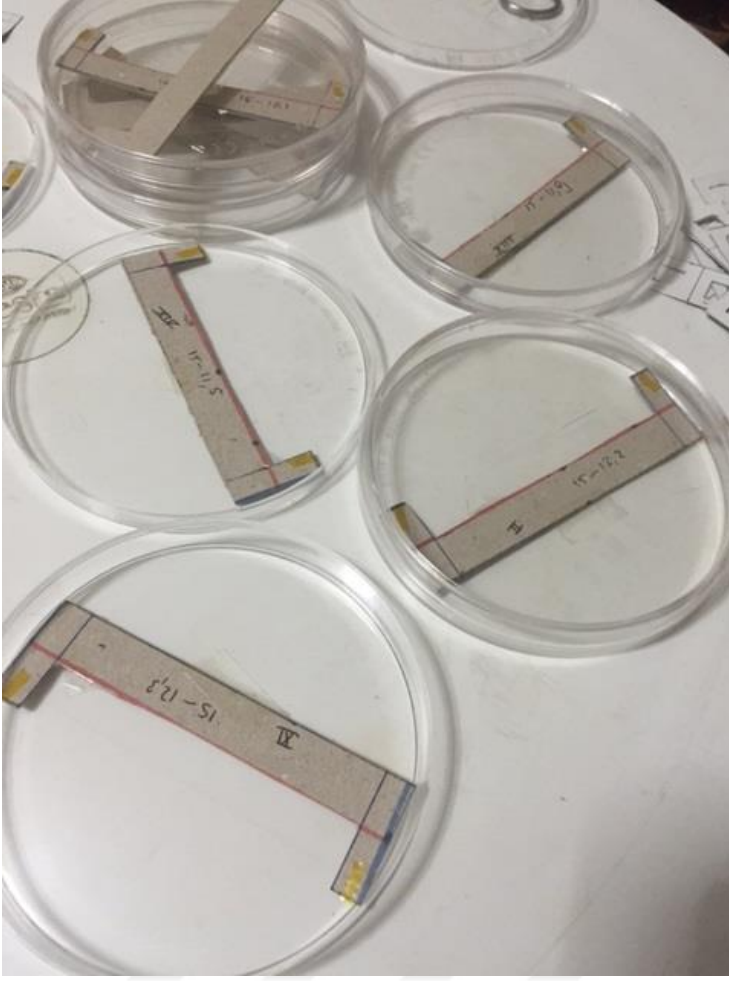
2. Adım



3. Adım

Şekil 3.7. Yöntem 2'ye göre KNT ormanından iplik eğirme adımları

Her iki yöntemde de elde edilen son derece ince ve hassas özelliğe sahip söz konusu özel iplikler, Şekil 3.8'de görülen karton şablonlara iki ucundan yapıştırılarak ayrı ayrı petri kaplarda muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.8. Çalışma kapsamında eğrilmiş KNT ipliklere örnekler

3.3. İplik Yüzey Görüntüleri, İplik İnceliği ve Yüzey Büküm Açılarının Analizi

Çalışmada öncelikle söz konusu çok özel liflerden eğrilen özel ipliklerin yüzey görüntüleri analiz edilerek hem genel görünimleri hem de nominal büküm seviyesi ve ipliklere uygulanan eğirme yönteminin etkisinin ortaya konması amaçlanmıştır. Bu amaçla nano ölçekte liflerden eğrilmiş söz konusu ipliklerin yüzey görüntüleri, Namık Kemal Üniversitesi NABİLTEM birimindeki FEİ marka, QUANTA FEG 250 model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 3.9). Görüntü alırken ipliklerde çap ve yüzey büküm açısı değerlerinin net ve hassas bir şekilde görülebildiğine kanaat getirilen 4000x büyütme oranı kullanılmıştır.

Elde edilen ipliklerin incelik ve yüzey büküm açısı değerlerinin tespiti için ise SEM ve Photoshop programından faydalanılmıştır. Yöntem 1’de her bir büküm seviyesinde 10’ar adet numune alınmış ve her bir numune için 5’er adet yüzey büküm açısı ve iplik çapı değeri ölçülmüştür. Dolayısıyla ipliklerin her bir nominal büküm seviyesi için toplam 50’şer adet

veri elde edilmiştir. Yöntem 2 ile elde edilen ipliklerde ise her bir nominal büküm değerine sahip ipliklerden benzer şekilde 10'ar adet numune alınmış ve her bir numune için 10'ar adet yüzey büküm açısı ve iplik çapı değeri ölçülmüş, böylelikle bu yöntemle eğrilen ipliklerin her bir büküm seviyesi için toplam 100'er adet veri elde edilmiştir.



Şekil 3.9. Çalışmada kullanılan taramalı elektron mikroskobu

3.4. KNT İpliklerde Büküme Bağlı Kısalma Faktörünün Tespiti

Bu bölümde KNT ipliklerde büküme bağlı kısalma miktarının Yöntem 2 ile yapılan eğirme esnasında tayin edilmesi amaçlanmıştır. Bu yöntemle eğirmede ilk uzunluğu 15 cm olarak ayarlanan numunelerin (l_0) (Şekil 3.7, 2. Adım), büküm verme sonrası uzunlukları da kaydedilmiş (l_1) (Şekil 3.7, 3. Adım) ve şu şekilde kısalma faktörü hesaplanmıştır.

$$C_y = l_0 / l_1 \quad (1)$$

Yukarıdaki eşitlikte, (l_0) ipliğin bükümsüz halde ilk uzunluğunu, (l_1) ise bükümlü uzunluğunu ifade etmektedir. Söz konusu kısalma faktörü özellikle şapeli ipliklerin eğirilmesi esnasında uygulanması gereken çekim miktarının ne kadar artırılması gerektiğini ifade eden bir katsayı olarak değerlendirilmektedir (Hearle ve ark. 1969). Sonuç olarak üretilen ipliklerin her bir büküm seviyesi için 10'ar adet numune için kısalma faktörü değeri tespit edilerek sonuçlar analiz edilmiştir.

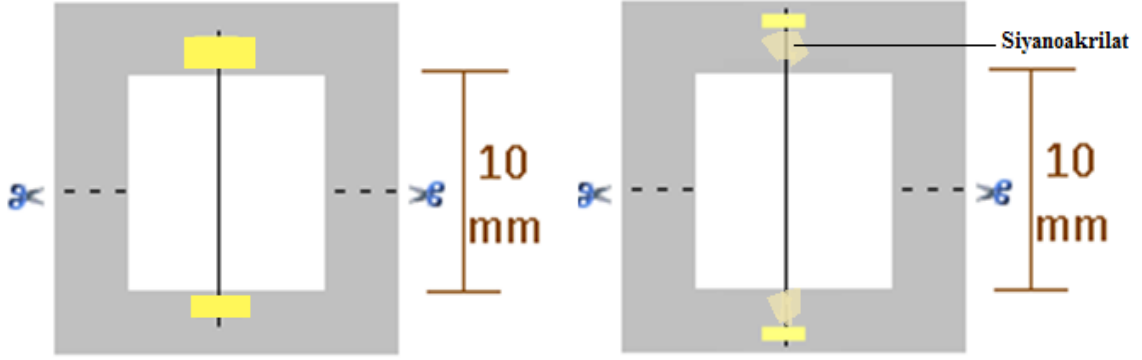
3.5. İplik Mukavemet Özelliklerinin Analizi

Çalışmada üretilen KNT ipliklerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi de çalışmanın temel amaçlarından birisidir. Bu doğrultuda, mukavemet testleri Marmara Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Instron 4411 mukavemet test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10). Testler, 50 N'luk yük hücresi ve lif mukavemeti ölçümüne uygun pnömatik çeneler kullanarak, 1 cm çene aralığı ve söz konusu özel iplikler için kullanılmakta olan dakikada %1 sabit uzama (CRE) hızı ile yapılmıştır. Söz konusu test çalışma parametreleri, Atkinson ve ark. (2007) tarafından KNT iplikler için belirtilen koşullar dikkate alınarak belirlenmiştir. Yöntem 1 ile üretilen ipliklerde her bir büküm seviyesi için 10'ar adet numune test edilirken, Yöntem 2 ile üretilen ipliklerde her bir büküm seviyesi için 5'er adet test yapılmıştır. Yöntem 2 ile büküm verilen KNT ipliklerde 5000 t/m, 6000 t/m ve 7000 t/m bükümlü ipliklerin kalınlık ve yüzey açıları arasında belirgin fark gözlenmediğinden 6000 t/m büküm seviyesine sahip iplikler için mukavemet testleri yapılmamıştır.

Mekanik özellikleri test edilecek olan KNT ipliklerinden test numunesi hazırlanırken Şekil 3.11'de görüldüğü gibi, KNT ipliğin yapıştırıldığı doğrultuda 10 mm'lik boşluğa sahip olacak şekilde kesilmiş karton çerçeveler kullanılmıştır. Yöntem 1 ile yapılan ölçümlerden sonra kayma problemi olmaması için Yöntem 2 ile yapılan testlerde Ghemes ve ark. (2012) tarafından sunulan çalışmada önerildiği gibi siyanoakrilat içerikli yapıştırıcı kullanılmıştır. Bu çerçeveler, test cihazının çenelerine takıldıktan sonra, çeneler arasındaki kuvvetin sadece ipliğe uygulanması için iki kenarından kesilmiştir (Şekil 3.12). Testlerde ipliklerin 0,1 mm/dk hızda çekilmesi sonucu kopmalar gözlenmiş ve Bluehill 2 yazılımı ile elde edilen kuvvet-uzama eğrileri analiz edilmiştir.



Şekil 3.10. Çalışmada kullanılan universal mukavemet testi cihazı



Şekil 3.11. Mukavemet testi için numune hazırlama (yöntem 1 ve yöntem 2)



Şekil 3.12. Numunelere ait mukavemet testinden bir görüntü

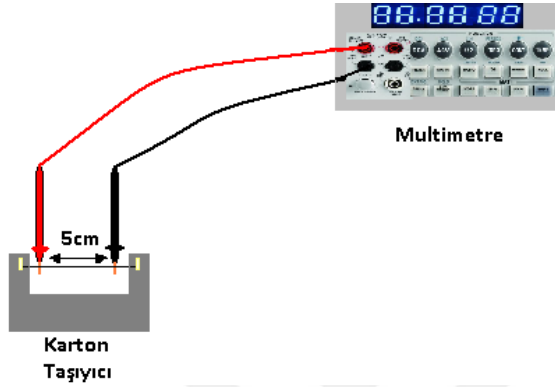
3.6. İplik Elektriksel Direnç Değerlerinin Ölçümü

Elektriksel direnç değerleriyle ilgili yapılan ölçümlerde Şekil 3.13’de görülen ikili prob metodu kullanılmıştır. Yöntem 1’de GW INSTEK GDM-8245 marka bir multimetrenin probaları arasındaki mesafe 5 cm olacak şekilde sabitlenerek, Yöntem 1 ile büküm verilen KNT ipliklerin 5 cm’lik uzunluklarındaki elektriksel direnç miktarları $k\Omega$ cinsinden ölçülmüş ve 1 cm’deki dirençleri hesaplanmıştır. Bu yöntemde problara KNT iplik ile asılı olan kartonların bir süre sonra iplikleri ağırlıklarından dolayı deforme ederek boyutsal değişimlerine yol açtığı gözlemlendiğinden; Yöntem 2 ile eğrilen iplikler için 1 cm uzunluğundaki numuneler kullanılmış ve iki yöntem için öz dirençleri aşağıdaki temel ilişkiler kullanılarak ölçülmüştür.

$$R = (L \times \rho) / S \quad (2)$$

$$\sigma = 1 / \rho \quad (3)$$

Verilen 2 ve 3 no'lu eşitliklerde; R direnç, L uzunluk, S kesit alanı, ρ öz direnç, σ iletkenlik değerini ifade etmektedir. Bu hesaplamada ipliklerin dairesel enine kesite sahip silindirik formunda olduğu düşünülerek hesaplama yapılmış, ipliklerin ortalama çap değerleri esas alınarak kesit alanları hesaplanmıştır. Nitekim belli büküm seviyesine sahip KNT ipliklerin enine kesitlerinin dairesel çok yakın olduğu belirtilmektedir (Göktepe 2015).



Şekil 3.13. İletkenlik ölçümü

Yöntem 1 ile eğrilen iplikler bu problara aktarılmadan önce Şekil 3.14'de görülen yaklaşık 0,5 g ağırlığındaki karton üzerine yapıştırılarak, direnç ölçümü yapılacak olan ipliklerin boyutları ve uygulanan gerginliğin mümkün olduğunca sabit olması sağlanmıştır.



Şekil 3.14. KNT iplik aktarma için kullanılan karton şablonlar

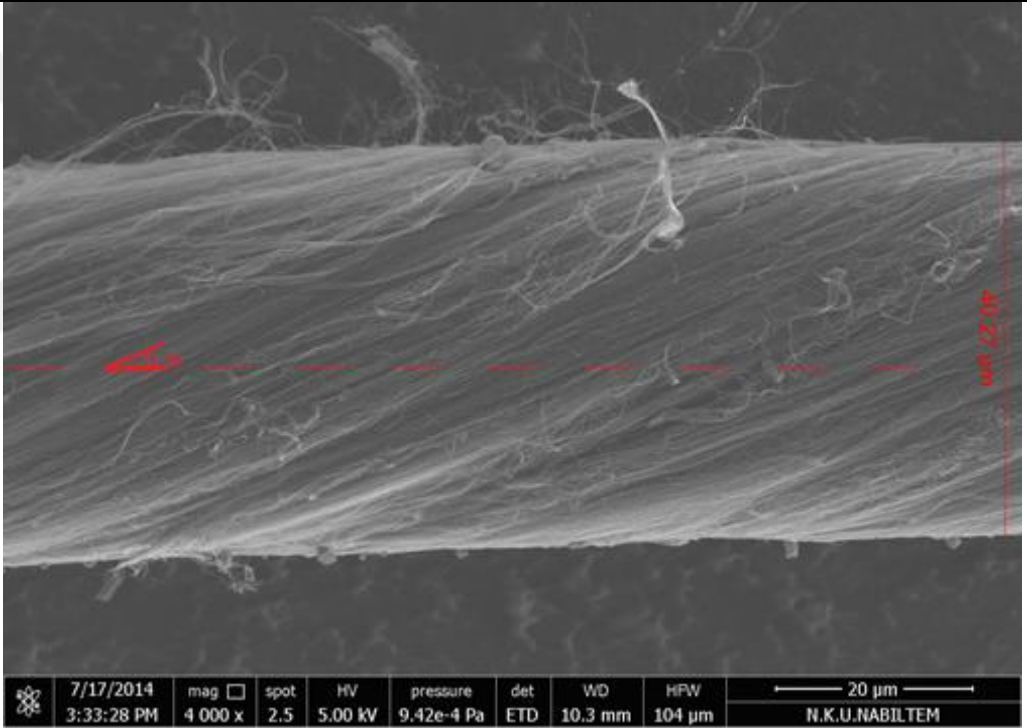
Çalışma kapsamında yapılan testlerde elde edilen sonuçlar ayrıca istatistiksel olarak da analiz edilmiş olup, bu amaçla IBM SPSS Statistics 21 programı kullanılmıştır. Elde edilen özellikler arasında istatistiksel açıdan anlamlı fark olup olmadığını değerlendirmek için ANOVA analizinde Tukey çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

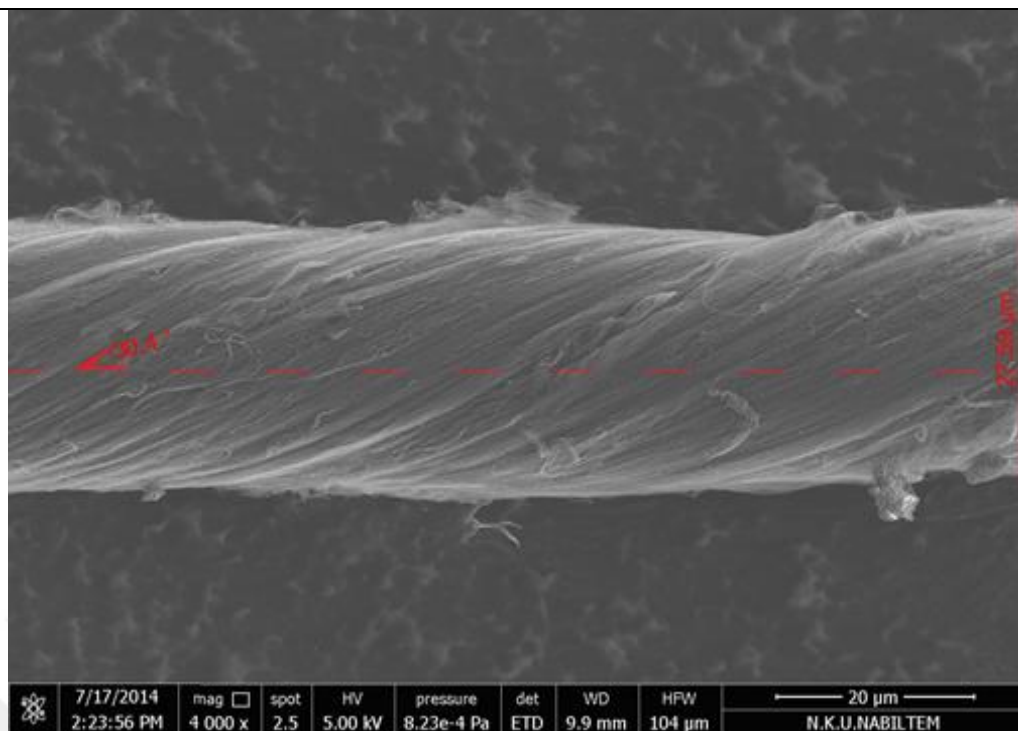
4.1. Büküm Miktarının ve Eğirme Yönteminin İplik Yüzey Görüntüsüne Etkisi

Çalışmada iki farklı eğirme yöntemi ile elde edilen (Yöntem 1 ve Yöntem 2) KNT iplik görüntülerine ait tipik örnekler Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu çalışmada incelenen görüntülerin tamamı ise Ek 1’de sunulmuş durumdadır.

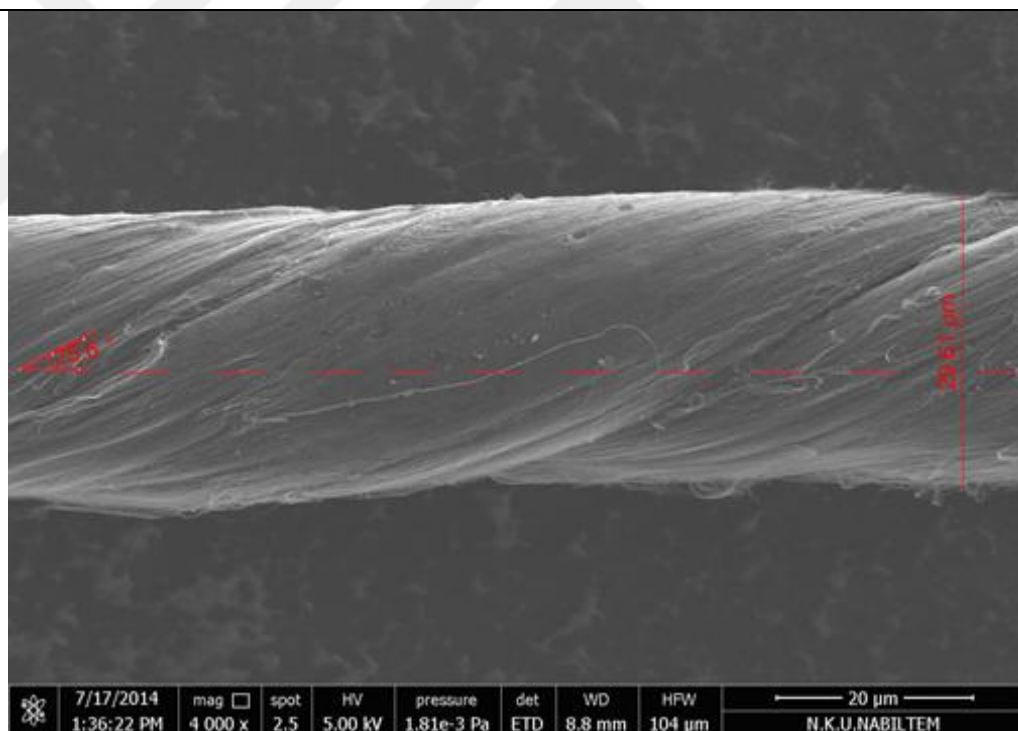
Çizelge 4.1. Yöntem 1 ile üretilen KNT ipliklerin SEM görüntülerine örnekler (4000x)

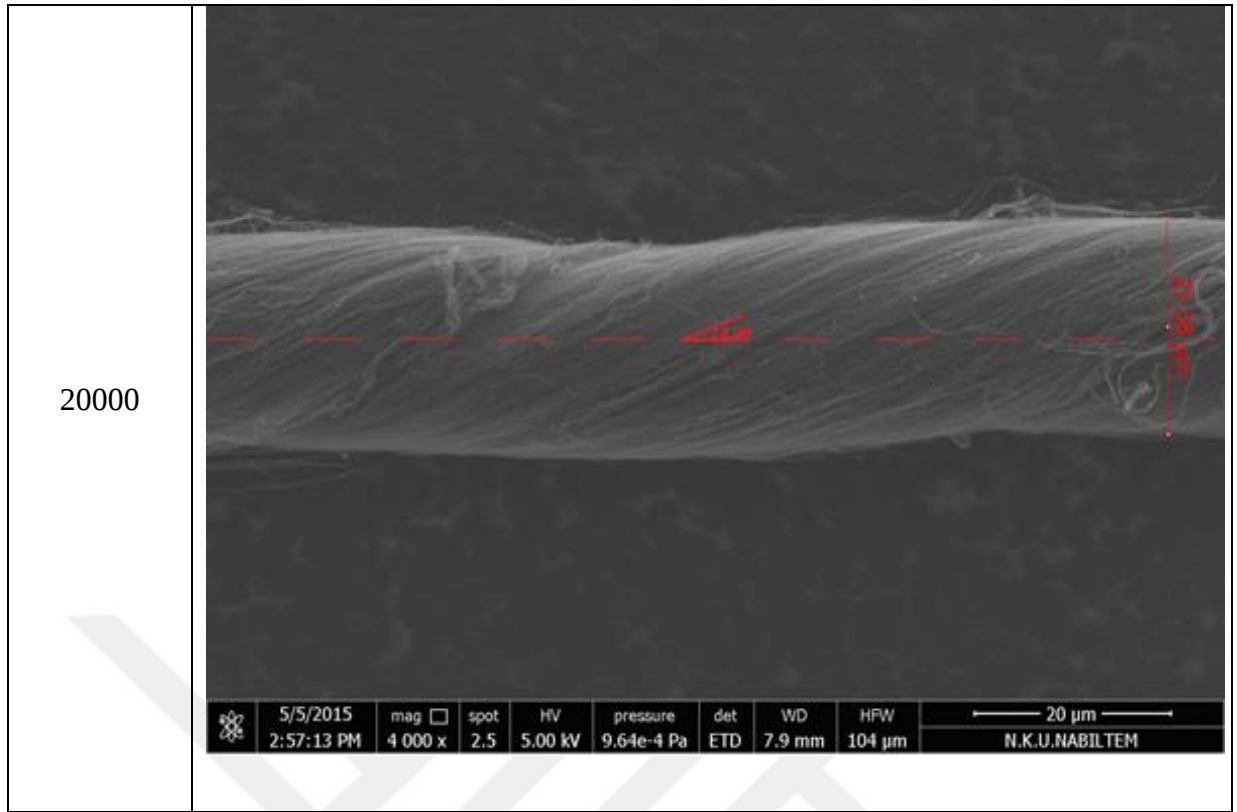
Büküm Miktarı (t/m)	
5000	

10000

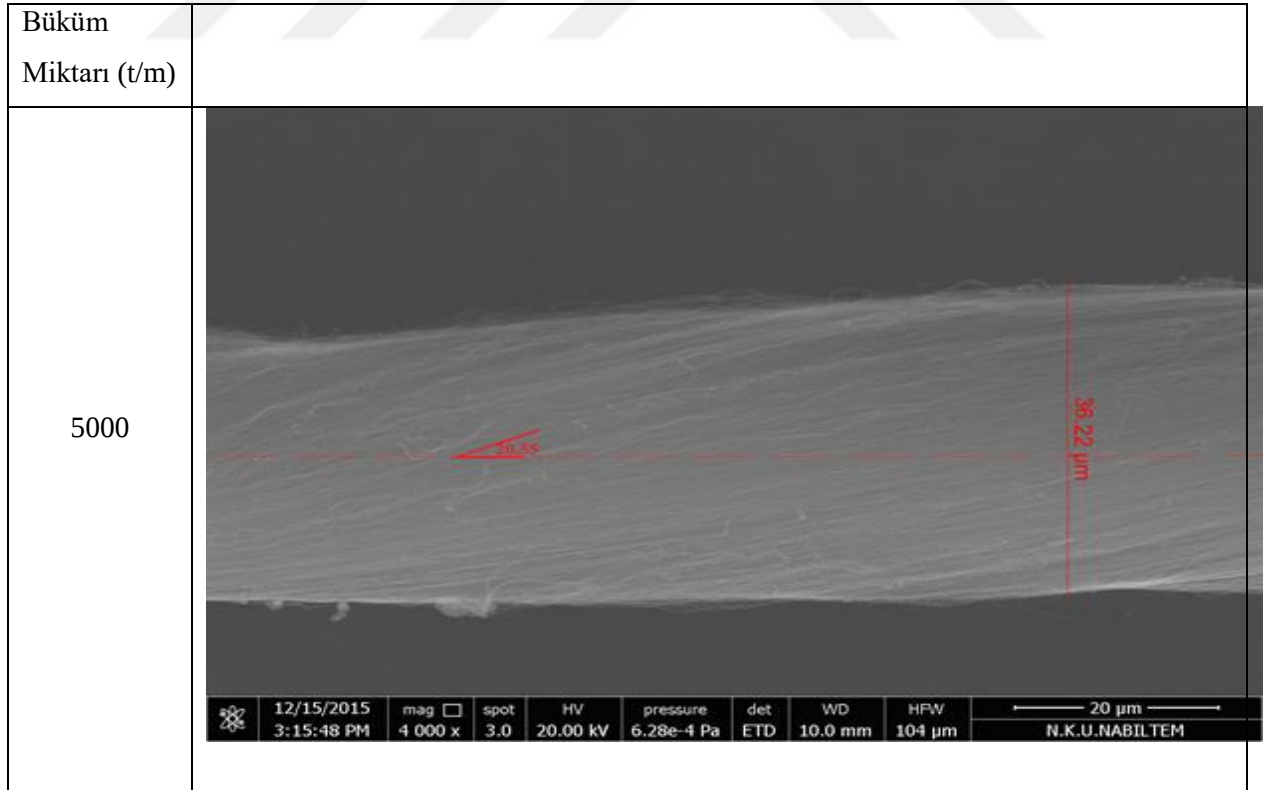


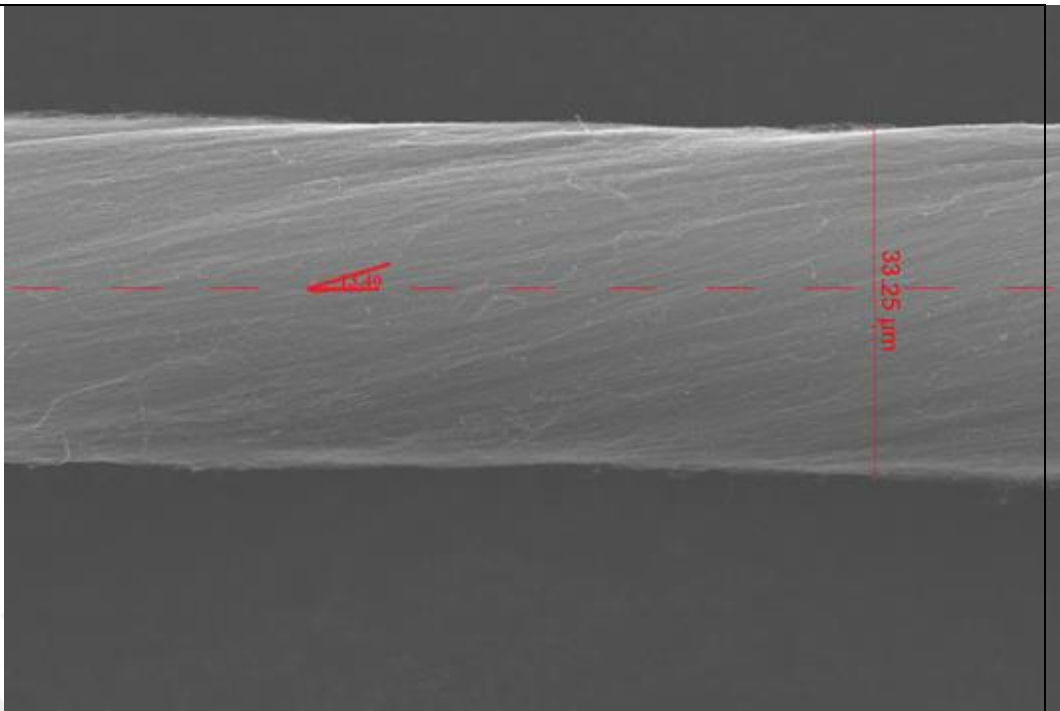
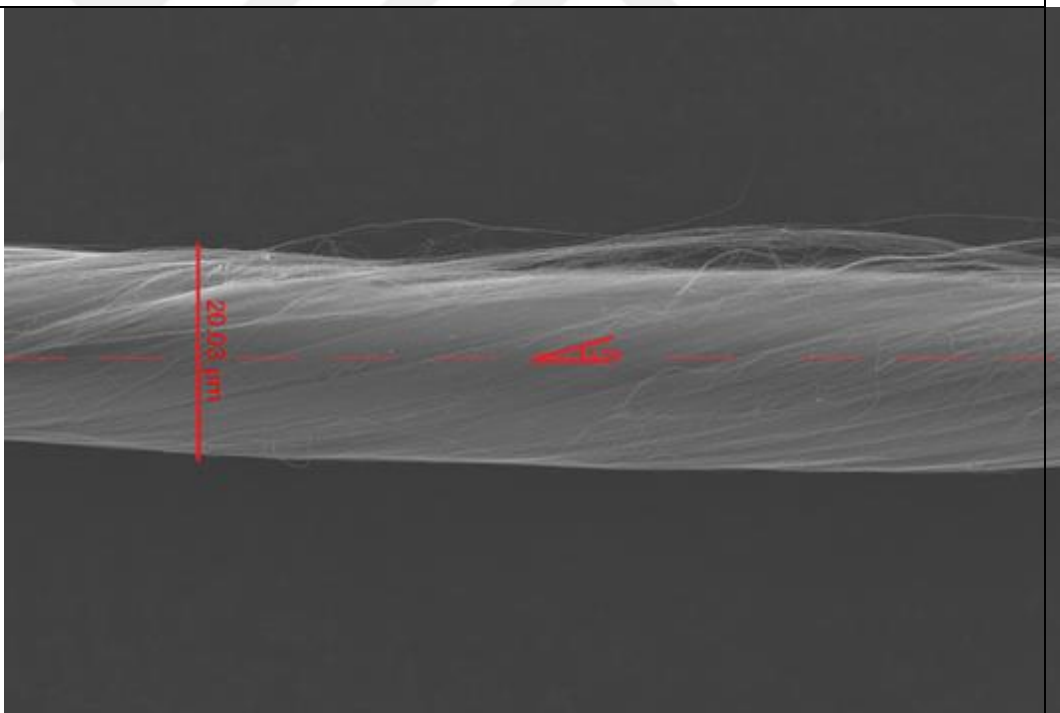
15000

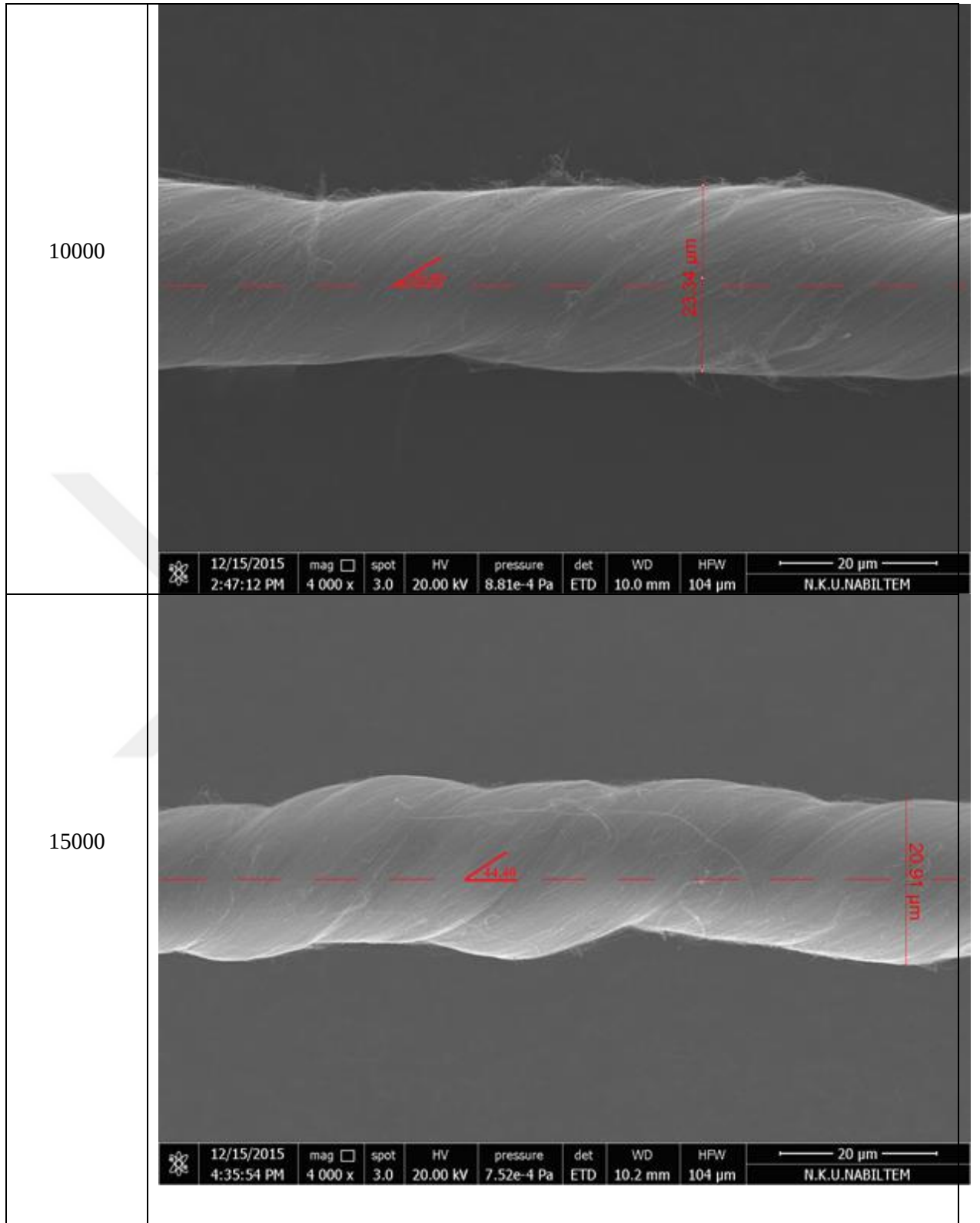




Çizelge 4.2. Yöntem 2 ile üretilen KNT ipliklerin SEM görüntülerine örnekler (4000x)



6000	 33.25 µm <table data-bbox="410 893 1474 949"><tr><td>12/15/2015 4:10:23 PM</td><td>mag ☐ 4 000 x</td><td>spot 3.0</td><td>HV 20.00 kV</td><td>pressure 2.48e-3 Pa</td><td>det ETD</td><td>WD 10.0 mm</td><td>HPW 104 µm</td><td>20 µm N.K.U.NABILTEM</td></tr></table>	12/15/2015 4:10:23 PM	mag ☐ 4 000 x	spot 3.0	HV 20.00 kV	pressure 2.48e-3 Pa	det ETD	WD 10.0 mm	HPW 104 µm	20 µm N.K.U.NABILTEM
12/15/2015 4:10:23 PM	mag ☐ 4 000 x	spot 3.0	HV 20.00 kV	pressure 2.48e-3 Pa	det ETD	WD 10.0 mm	HPW 104 µm	20 µm N.K.U.NABILTEM		
7000	 20.03 µm <table data-bbox="410 1711 1474 1767"><tr><td>12/15/2015 2:30:35 PM</td><td>mag ☐ 4 000 x</td><td>spot 3.0</td><td>HV 20.00 kV</td><td>pressure 2.42e-3 Pa</td><td>det ETD</td><td>WD 9.4 mm</td><td>HPW 104 µm</td><td>20 µm N.K.U.NABILTEM</td></tr></table>	12/15/2015 2:30:35 PM	mag ☐ 4 000 x	spot 3.0	HV 20.00 kV	pressure 2.42e-3 Pa	det ETD	WD 9.4 mm	HPW 104 µm	20 µm N.K.U.NABILTEM
12/15/2015 2:30:35 PM	mag ☐ 4 000 x	spot 3.0	HV 20.00 kV	pressure 2.42e-3 Pa	det ETD	WD 9.4 mm	HPW 104 µm	20 µm N.K.U.NABILTEM		



Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de yer alan görüntüler, KNT liflerden eğrilen ipliklerde konvansiyonel ipliklere benzer şekilde nominal büküm miktarı arttıkça daha sıkı bir iplik yapısının ortaya çıktığını göstermektedir. 5000 t/m nominal büküme sahip iplikler diğerlerine kıyasla oldukça daha kaba iken, 10000 t/m seviyelerine doğru hızla daha kompakt yapının

elde edildiği, özellikle nominal 10000 t/m üzerinde büküme sahip ipliklerde yüksek büküm seviyesine bağlı kıvrımlı/boğumlu yapıların ortaya çıktığı görülmektedir. Yapılan eğirme işlemlerinde 5000 t/m büküm seviyesinin altında ipliklerin tam olarak büküm almadığı gözlemlendiği için çalışmaya 5000 t/m'den daha düşük büküm miktarları dahil edilmemiştir.

4.2. Büküm Miktarı ve Eğirme Yönteminin İplik İnceliği ve İplik Yüzey Açısına Etkisi

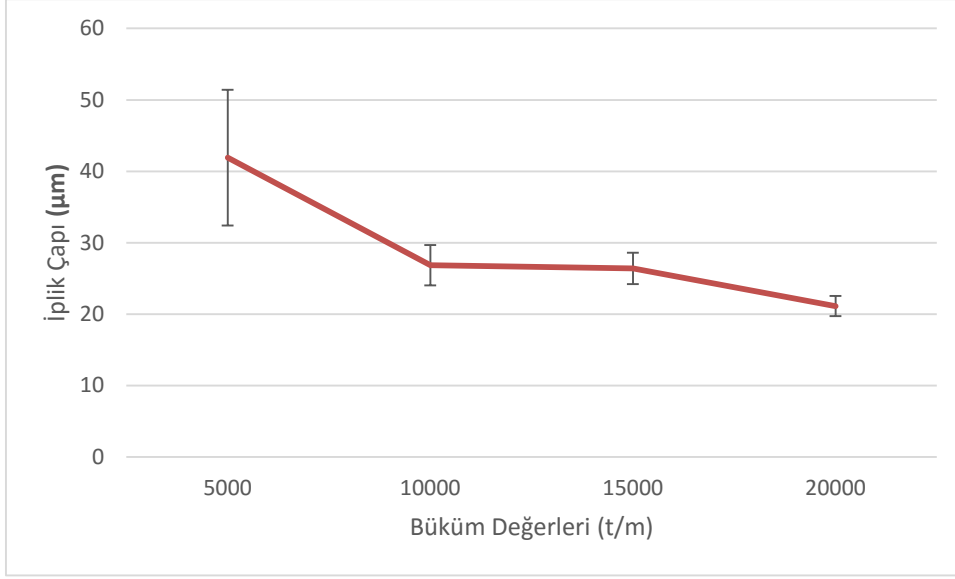
Bu bölümde her bir büküm değeri için 10'ar adet SEM görüntüsü alınmıştır. Her bir SEM görüntüsünden Yöntem 1 ile eğrilen ipliklerde 5'er adet ölçüm, Yöntem 2 ile eğrilen ipliklerde ise 10'ar ölçüm yapılmıştır. Dolayısıyla her iki yöntemle eğrilen iplikler için sırasıyla toplam 50 ve 100'er adet iplik inceliği (iplik çapı) ve iplik yüzey büküm açısı değeri elde edilmiş bulunmaktadır (Ek 2). Söz konusu değerlere ait analizler ise aşağıda özetlenmiştir.

4.2.1. Yöntem 1 ile eğrilen ipliklerin analizi

SEM görüntülerinden yapılan ölçümler doğrultusunda Yöntem 1 ile eğrilen iplikler için elde edilen ortalama iplik çapı ve yüzey büküm açısı değerleri Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.5'te yer almaktadır. İplik büküm miktarına bağlı ortalama iplik inceliğindeki ve yüzey büküm açısındaki değişimler ise Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de görülmektedir.

Çizelge 4.3. Büküm miktarına bağlı olarak değişen iplik çapı değerleri (yöntem 1)

Nominal Büküm Miktarı (t/m)	Ortalama İplik Çapı (µm)	%CV
5000	41,92	22,70
10000	26,85	10,52
15000	26,40	8,34
20000	21,12	6,37



Şekil 4.1. Büküm miktarının KNT iplik inceliğine etkisi (yöntem 1)

Şekil 4.1’de yer alan sonuçlar, 5000t/m nominal büküm seviyesinde ortalama 40 μm civarında çapa sahip KNT iplikler eğrilebildiğini, iplik büküm miktarının artışıyla birlikte iplik inceliğinin önemli derecede azaldığını göstermektedir. Öte yandan gerek elde edilen iplik görüntüleri, gerekse Çizelge 4.3’de yer alan sonuçlar Yöntem 1 ile elde edilen ipliklerden düşük büküm seviyesine sahip olanlarda iplik çap varyasyonunun oldukça yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Düşük nominal büküm seviyelerinde ortaya çıkan söz konusu yüksek orandaki çap varyasyonu, KNT liflerin düşük büküm seviyelerinde tam anlamıyla büküm alamaması ve iplik gövdesine dahil olamamasından kaynaklanan ve eğrilmiş iplik uzunluğu boyunca gözle de fark edilebilen incelik değişiminin bir sonucudur.

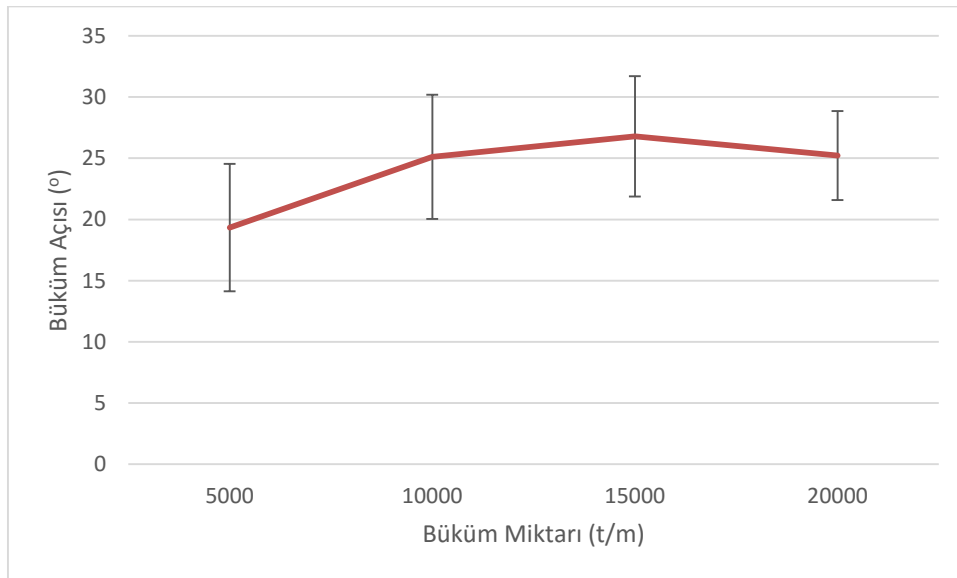
Söz konusu test sonuçları ANOVA analizi ile değerlendirildiğinde bekleneceği üzere 10000 t/m ile 15000 t/m büküme sahip ipliklerin inceliği arasında anlamlı bir fark olmadığı görülmektedir (Çizelge 4.4). ANOVA analizlerinin detaylı sonuçları ise Ek 3’te verilmektedir.

Çizelge 4.4. Büküm miktarının iplik çapına etkisine ait ANOVA analizi (yöntem 1)

Büküm	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
20000	50	21,1238	26,3982 26,8450	41,9194
15000	50			
10000	50			
5000	50			
Sig.		1,000	,972	1,000

Çizelge 4.5. Yüzey büküm açılarına ait değerler (yöntem 1)

Nominal Büküm Miktarı (t/m)	Ortalama Yüzey Büküm Açısı (°)	%CV
5000	19,33	26,98
10000	25,12	20,21
15000	26,79	18,33
20000	25,22	14,42



Şekil 4.2. Büküm miktarının yüzey büküm açısına etkisi (yöntem 1)

Şekil 4.2’de yer alan değerler, Yöntem 1 ile üretilen ipliklerde iplik yüzey büküm açısının yaklaşık 19 ° ila 27 ° arasında değiştiğini göstermektedir. Ancak yüzey büküm açısı başlangıçta verilen büküm miktarı ile artmakla beraber 15000t/m ve sonrasında beklenenin aksine azalma gerçekleşmiştir. Diğer ifade ile yüksek büküm seviyelerinde, nominal bükümün artmasına rağmen iplik yüzey büküm açısında arzu edilen düzeyde artış elde edilemediği görülmektedir. Söz konusu davranışın, kullanılan eğirme yönteminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitekim Yöntem 1’de KNT lif dizinlerinin yer aldığı altlık, platform üzerinde ve eğirme kafasına belli mesafede sabitlenmiş olup, belli bir noktadan sonra aşırı büküm seviyesinin etkisiyle lifler arasında kaymanın gerçekleştiği ve bu nedenle yüksek büküm seviyelerinin ipliğe aktarılamadığı düşünülmektedir.

Bu değerlere ait ANOVA analiz sonuçları incelendiğinde ise istatistiki açıdan yalnızca 5000 t/m büküm değerine sahip ipliklerin yüzey büküm açısının diğerlerinden önemli derecede farklı olduğu söylenebilir (Çizelge 4.6). ANOVA analizlerinin detaylı sonuçları ise Ek 3’te verilmektedir.

Çizelge 4.6. Büküm miktarının yüzey büküm açısına etkisinin ANOVA analizi (yöntem 1)

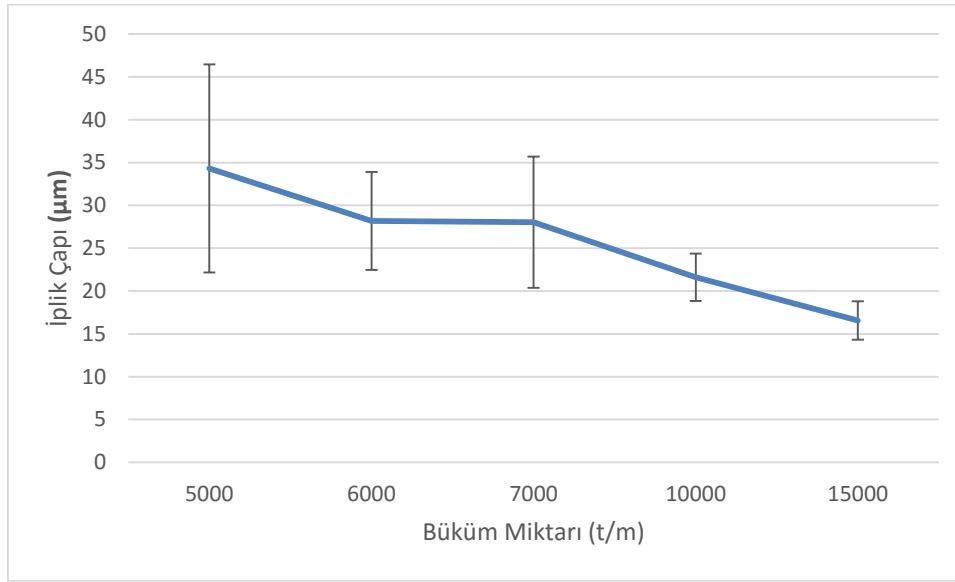
Bukum	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
5000	50	19,3260	
10000	50		25,1240
20000	50		25,2198
15000	50		26,7940
Sig.		1,000	,297

4.2.2. Yöntem 2 ile eğrilen ipliklerin analizi

Yöntem 2 ile eğrilen ipliklere ait ortalama iplik çapı ve yüzey büküm açısı değerleri Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.9’da, değişimlere ait grafikler ise Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Verilen büküm miktarına bağlı olarak değişen iplik incelikleri (yöntem 2)

Nominal Büküm Miktarı (t/m)	Ortalama İplik Çapı (μm)	%CV
5000	34,32	35,40
6000	28,17	20,31
7000	28,05	27,29
10000	21,61	12,79
15000	16,56	13,46



Şekil 4.3. Büküm miktarının KNT iplik inceliğine etkisi (yöntem 2)

Yukarıda yer alan ait sonuçlar incelendiğinde büküm miktarı arttıkça bekleneceği üzere daha ince iplik elde edildiği ve bu yöntemle yaklaşık ortalama 34 ila 17 μm aralığında çapa sahip ipliklerin eğirebildiği görülmektedir. Çizelge 4.8'e bakıldığında aralarında anlamlı bir fark bulunmasa da 6000 t/m büküm değerinden sonra 7000 t/m bükümde büküm açısının düştüğü görülmektedir. Ayrıca 5000 t/m, 6000 t/m ve 7000 t/m bükümlü ipliklerde incelik varyasyonu oldukça yüksek çıkmıştır. Bu durum, Yöntem 2 ile üretilen KNT iplikleri için ilgili seviyelerdeki büküm değerlerinin, bükümlü iplik formunu iplik uzunluğu boyunca homojen bir şekilde oluşturmaya yeterli olmadığı şeklinde açıklanabilir. Nitekim düşük

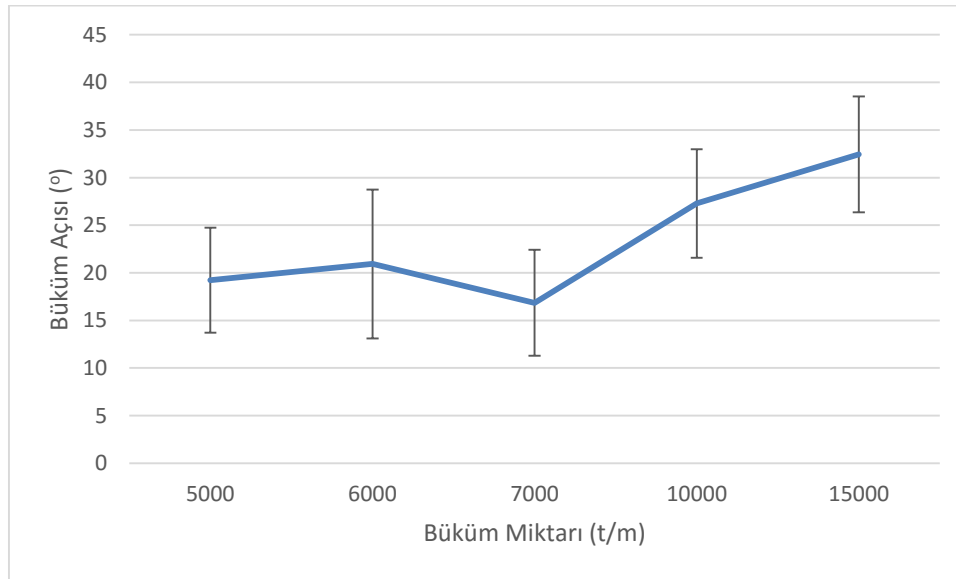
büküm seviyelerinde eğirme esnasında ipliklerde yer yer tam büküm almamış bölgelerin yer aldığı gözlenmiştir.

Çizelge 4.8. Büküm miktarının iplik çapına etkisinin ANOVA testi (yöntem 2)

Bukum	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
15000	100	16,5586	21,6095		
10000	100				
7000	100			28,0460	
6000	100			28,1678	
5000	100				34,3211
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Çizelge 4.9. Büküm miktarına bağlı olarak değişen yüzey büküm açıları (yöntem 2)

Nominal Büküm Miktarı (t/m)	Ortalama Yüzey Büküm Açısı (°)	%CV
5000	19,22	28,71
6000	20,93	37,34
7000	16,85	33,06
10000	27,28	20,85
15000	32,45	18,75



Şekil 4.4. Büküm miktarının yüzey büküm açısına etkisi (yöntem 2)

Şekil 4.4'te yer alan değerler, Yöntem 2 ile üretilen ipliklerde iplik yüzey büküm açısının yaklaşık 19° ila 33° arasında değiştiğini göstermektedir. Aralarında anlamlı bir fark bulunmasa da 6000 t/m büküm değerinden sonra 7000 t/m bükümde büküm açısının düşmesi, büküm verme aşamasında gözlenen büküm kısılması miktarında da 7000 t/m'lik ipliklerin kısılma ortalamalarının 6000 t/m'lik ipliklere göre daha az olmasıyla ilişkilidir. Bu iki farklı büküm miktarında ortalama sonuçlar birbirine çok yakın çıkmıştır. Bu durum, ilgili büküm değerlerinin ipliğin fiziksel yapısına homojen olarak tam anlamıyla dağılamadığı anlamına gelebilir. 7000 t/m bükümlü ipliklerin çap varyasyonunun yüksek çıkması da bu tahmini desteklemektedir. Bu sonuçlardan dolayı kopma mukavemeti testlerinde 6000 t/m bükümlü ipliklerle ölçüm yapmaya gerek duyulmamıştır.

Çizelge 4.10. Büküm miktarının büküm açısına etkisinin ANOVA testi (yöntem 2)

Bukum	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
7000	100	16,8491			
5000	100	19,2237	19,2237		
6000	100		20,9321		
10000	100			27,2849	
15000	100				32,4514
Sig.		,054	,293	1,000	1,000

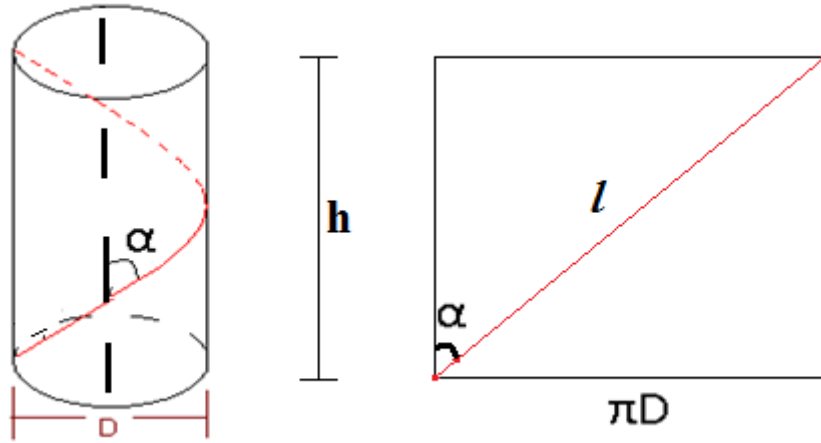
Bu çalışmada kullanılan farklı eğirme yöntemleri kıyaslandığında; Yöntem 2'de Yöntem 1'e göre aynı büküm miktarında daha ince iplikler üretilmiştir. Örneğin 15000 t/m için Yöntem 1'de ortalama iplik çapı 26 µm iken, Yöntem 2'de ortalama iplik çapı 16 µm'dir. Literatürde Atkinson ve ark. (2007) tarafından 10 µm, Foroughi ve ark. (2011) tarafından 12 µm, Zhang ve ark. (2007) tarafından 10 µm inceliğine sahip ipliklerin elde edildiği belirtilmektedir. Ancak bu çalışmalarda lif çekimi yapılan KNT orman genişlikleri, büküm miktarları, çalışma uzunlukları ve eğirme yöntemlerinde farklılıklar bulunmakta, bu bilgilerin bir kısmına dair detaylar tam olarak belirtilmediği için sağlıklı karşılaştırma yapılamamaktadır.

4.3. İdeal İplik Geometrisi Esas Alınarak Yapılan Analizler

Çalışmanın bu bölümünde üretilen KNT ipliklerin ideal iplik geometrisine sahip olduğu varsayılarak büküm miktarları iplik inceliği ve yüzey büküm açısından yola çıkılarak büküm miktarları analiz edilmiş, ayrıca eğirme esnasında verilen büküm miktarına bağlı olarak kısılma faktörleri hesaplanmıştır.

4.3.1. İplik büküm seviyelerinin analizi

İdeal iplik yapısına göre, iplik kesiti dairesel olup, lifler iç içe geçmiş eş merkezli silindirler üzerinde helis eğrileri izlerler. Öte yandan iplik boyunca büküm miktarı ve liflerin iplik yapısı içindeki paketlenme yoğunluğu her yerde sabittir (Hearle, 1969). Söz konusu ideal iplik geometrisinin görünümü Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. İdeal iplik geometrisine ait şematik gösterim

Söz konusu ideal geometriye ait temel ilişkilerin şu şekilde olduğu bilinmektedir;

$$h = 1 / T \quad (4)$$

$$\tan \alpha = \pi \cdot D / h \quad (5)$$

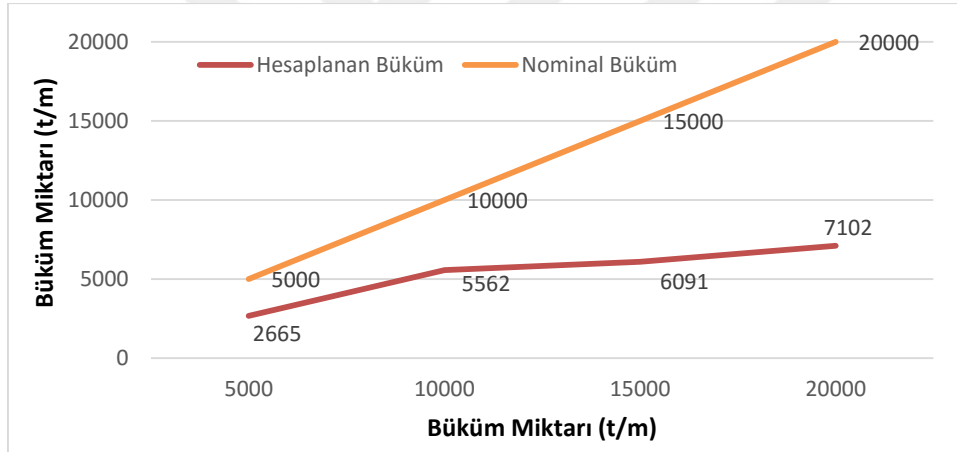
Yukarda yer alan eşitliklerde D, iplik çapını; h, bir turluk büküm yüksekliğini; l, bir turluk büküme sahip lif uzunluğunu; α ise yüzey büküm açısı değerini ifade etmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde, üretilen ipliklerin ideal iplik geometrisine sahip olduğu varsayımıyla yukarıda yer alan eşitlikler kullanılarak, SEM analizi sonucunda elde edilen yüzey büküm açısı ve iplik çapı değerleri yardımıyla, ipliklerde bir turluk büküm yüksekliği ve iplik büküm değerleri hesaplanmış ve iplik eğirme esnasında uygulanan nominal büküm

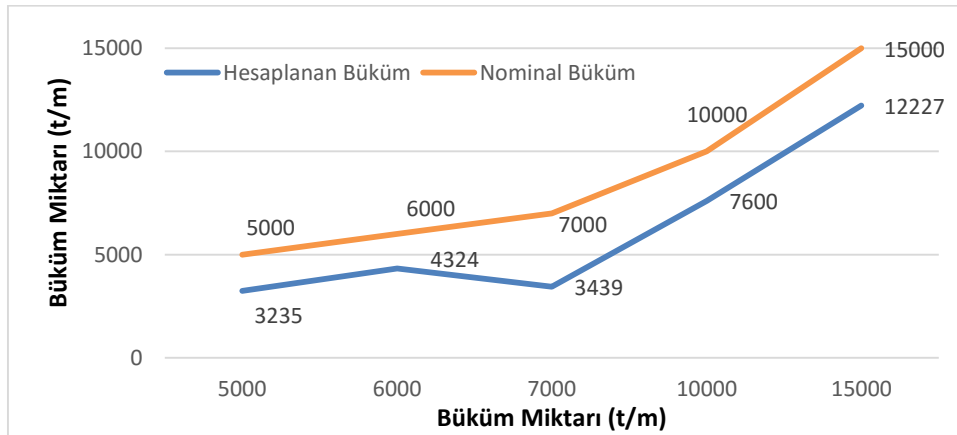
miktarları ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.11). Bu şekilde elde edilen değerler arasındaki ilişki Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de görülmektedir.

Çizelge 4.11. Nominal hesaplanan büküm değerleri

Nominal Büküm (t/m)	Hesaplanan Büküm (t/m)
Yöntem 1	
5000	2665
10000	5562
15000	6091
20000	7102
Yöntem 2	
5000	3235
6000	4324
7000	3439
10000	7600
15000	12227



Şekil 4.6. Nominal büküm değerleri-hesaplanan büküm değerleri ilişkisi (yöntem 1)



Şekil 4.7. Nominal büküm değerleri-hesaplanan büküm değerleri ilişkisi (yöntem 2)

Elde edilen sonuçlar Yöntem 1 ile eğrilen ipliklerde nominal büküm miktarı arttıkça, hedeflenen büküm seviyesinden sapmayı açık şekilde ortaya koymaktadır. Bir diğer ifade ile belli bir büküm seviyesinden sonra nominal büküm miktarı iplik yapısına sağlıklı şekilde aktarılamamaktadır. Bunun kullanılan eğirme yönteminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitekim Yöntem1 ile yapılan eğirmede KNT lif dizinleri sabit bir mesafede büküm verme işlemine tabi tutulduğu için eğirme esnasında özellikle yüksek büküm seviyelerinde önemli derecede lif kaymasının gerçekleşmesi muhtemeldir. Elde edilen sonuçlar Yöntem 2 ile eğrilen ipliklerin büküm miktarının nominal büküm seviyesinden bir miktar düşük olmakla birlikte paralel bir eğilim izlediğini ortaya koymaktadır.

4.3.2. Karbon nanotüp ipliklerde büküme bağlı kısalma faktörü değerlerinin analizi

İdeal iplik geometrisine sahip olduğu varsayılan ipliklerde bükümden dolayı kısalma faktörü (C_y) ile iplik yüzey açısı (α) arasında şu şekilde teorik bir ilişki olduğu bilinmektedir (Hearl 1969).

$$C_y (C_y-1) = (1/4) \times (\tan^2 \alpha) \quad (6)$$

6 No'lu eşitlikte, C_y ifadesinin (l_0/ l_1) kısalma faktörünü, (l_0) değerinin ipliğin bükümsüz halde ilk uzunluğunu, (l_1) değerinin ise bükümlü uzunluğunu gösterdiği daha önce ifade edilmişti. Söz konusu kısalma faktörü özellikle şapel ipliklerin eğirilmesi esnasında uygulanması gereken çekim miktarının ne kadar arttırılması gerektiğini ifade eden bir katsayı olarak değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda farklı yüzey büküm açıları için teorik olarak hesaplanmış olan kısalma faktörü değerleri şu şekildedir (Hearle ve ark. 1969).

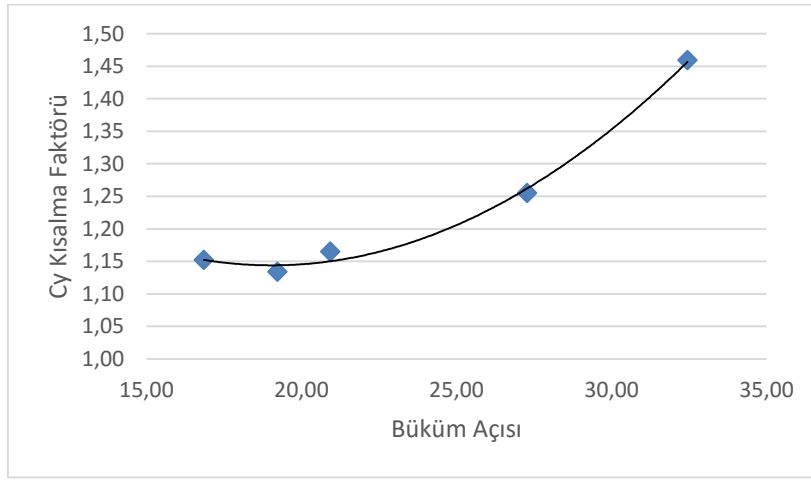
Çizelge 4.12. Farklı yüzey büküm açılarına karşılık gelen kısalma faktörleri (Hearle ve ark. 1969)

Yüzey Büküm açısı (°)	C_y
0	1,000
10	1,008
20	1,032
30	1,078
40	1,153
50	1,278

Çalışmada kullanılan Yöntem 2 ile iplik eğirme işleminde büküm artışıyla ipliklerde kısıalma miktarları da analiz edilmiş olup; elde edilen iplikler için belirlenmiş kısıalma faktörleri aşağıda özetlenmektedir.

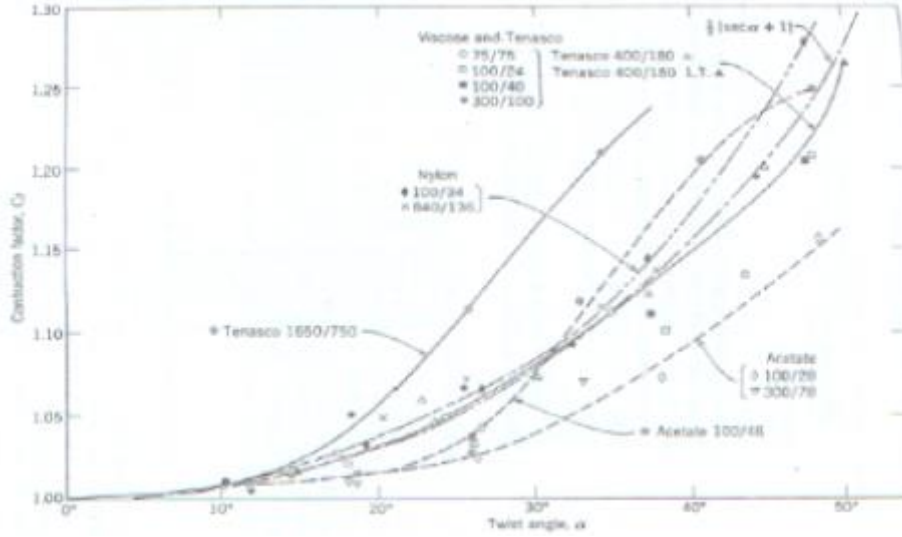
Çizelge 4.13. Çalışmada yöntem 2 ile elde edilen KNT ipliklere ait kısıalma faktörleri

Nominal Büküm Miktarı (t/m)	C_y	%CV
5000	1,13	2,68
6000	1,16	3,35
7000	1,15	3,09
10000	1,26	6,55
15000	1,46	3,15



Şekil 4.8. Yüzey büküm açısına bağlı olarak kısıalma faktöründe gözlenen değişim

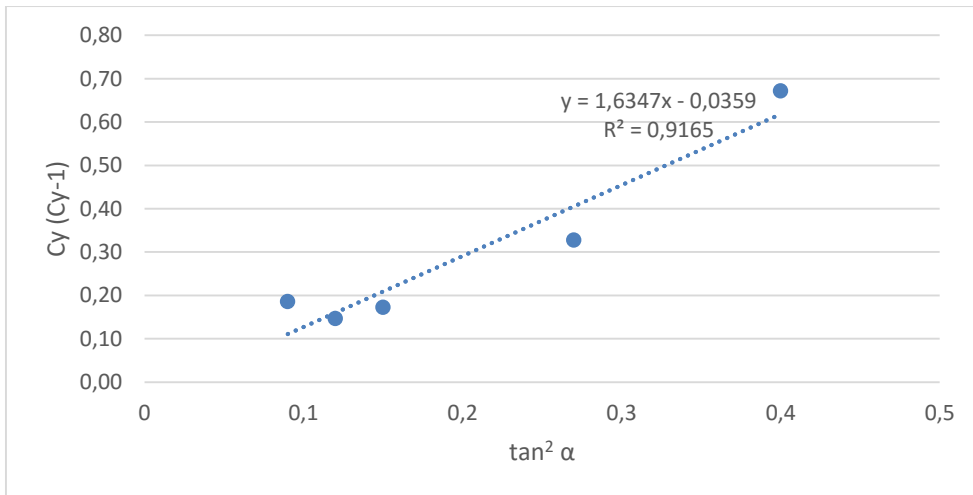
Şekil 4.8 incelendiğinde, daha önceki iplik çapı ve büküm açısı sonuçlarına benzer şekilde 5000 t/m ile 7000 t/m büküme sahip ipliklerin kısıalma faktörleri arasında belirgin bir fark gözükmemekle beraber büküm miktarı arttıkça bekleneceği şekilde kısıalma faktörünün arttığı gözlenmiştir.



Şekil 4.9. Bazı ipliklere ait kısalma faktörleri (Hearle ve ark. 1969)

Yukarıda verilen çizelge ve grafikler incelendiğinde, Yöntem 2 ile üretilen KNT İpliklere ait büküm açısına bağlı olarak kısalma faktörlerindeki trendin konvansiyonel tekstil liflerinin eğrilmesinde gözlenen kısalma eğilimine benzer olduğu görülmektedir (Şekil 4.9).

Ayrıca bu bilgiler ışığında çalışmanın bu bölümünde, elde edilen KNT ipliklerde deneysel olarak elde edilen % kısalma faktörü değerinin ideal iplik geometrisine sahip ipliklere ait eşitlik 6 ile verilen ilişkiye uygunluğunun incelenmesi de amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.10’da sunulmaktadır.



Şekil 4.10. Yüzey büküm açısı ile kısalma faktörü arasındaki ilişki

Şekil 4.10 incelendiğinde Eşitlik 6’da 1/4 olarak yer alan eğim yerine daha yüksek bir eğim elde edildiği görülmekle birlikte detaylı analizler için ilave deneylerin yapılması gerekmektedir.

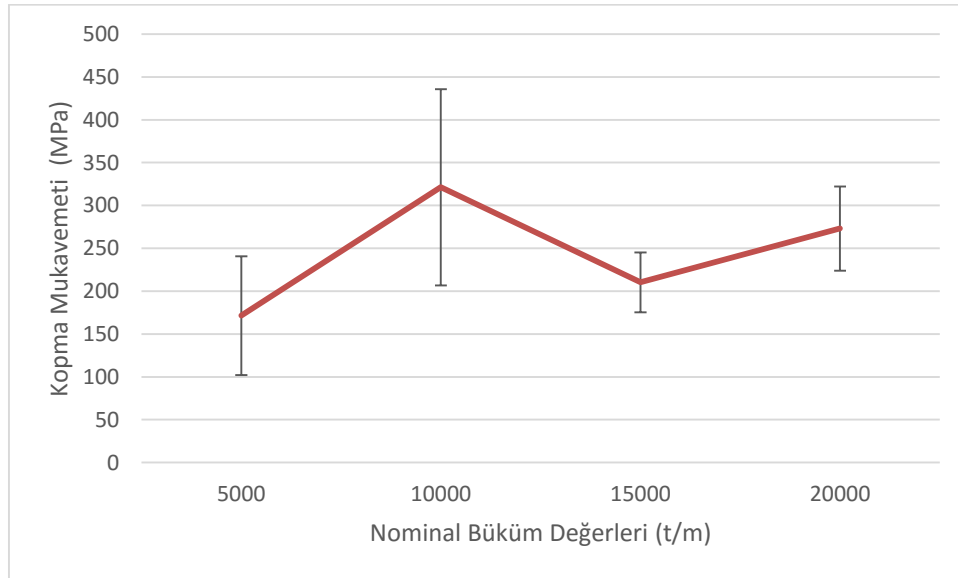
4.4. İplik Mukavemet Değerlerinin Analizi ve Bükümle İlişkisi

4.4.1. Yöntem 1 ile eğrilen ipliklerin analizi

Yöntem 1 ile eğrilen KNT ipliklerde mukavemet testlerinin detaylı sonuçları Ek 4’te verilmiş olup, elde edilen ortalama kopma mukavemeti ve % uzama değerleri ve varyasyon miktarları Çizelge 4.14’te yer almaktadır. Bu değerleri esas alarak elde edilen grafikler ise Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de görülmektedir.

Çizelge 4.14. Yöntem 1 ile üretilen ipliklerin kopma mukavemeti ve % uzama değerleri

Büküm Miktarı (t/m)	5000	10000	15000	20000
Kopma Mukavemeti (MPa)	171,37	321,21	210,33	273,01
%CV	40,44	35,60	16,62	17,94
Ortalama % K. Uzama	12,59	16,85	19,72	15,30
%CV	26,81	26,02	24,28	34,33

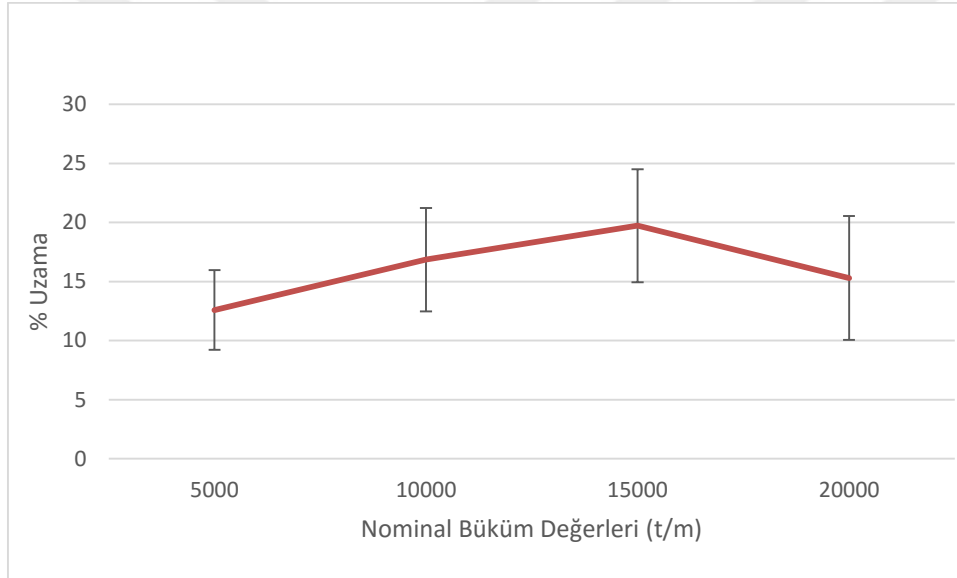


Şekil 4.11. Büküm miktarına bağlı olarak iplik mukavemetinde değişim (yöntem 1)

Şekil 4.11 incelendiğinde büküm miktarının artmasıyla birlikte kopma mukavemeti miktarının bir miktar artış gösterdiği söylenebilir.

Çizelge 4.15. Yöntem 1’deki KNT ipliklerin maksimum yük ortalamalarının ANOVA testi

Bukum	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
5000	10	171,3690		
15000	10	210,3270	210,3270	
20000	10		273,0110	273,0110
10000	10			321,2140
Sig.		,638	,241	,466



Şekil 4.12. Büküm miktarına bağlı olarak iplik % kopma uzama değerlerinde değişim (yöntem 1)

Şekil 4.12’de verilen Yöntem 1 ile üretilen ipliklerin % kopma uzaması değerleri incelendiğinde büküm miktarına bağlı olarak artış görülmekle birlikte 15000 t/m büküm seviyesinden sonra % kopma uzama değerinin azaldığı göze çarpmaktadır.

Çizelge 4.16. Yöntem 1’deki KNT ipliklerin % uzama ortalamalarının ANOVA testi

Bukum	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
5000	10	12,5920	
20000	10	15,3030	15,3030
10000	10	16,8520	16,8520
15000	10		19,7220
Sig.		,168	,144

Yukardaki sonuçlar göstermektedir ki istatistiki olarak büküm miktarının kopma mukavemetine ve %uzama miktarına etkisi vardır.

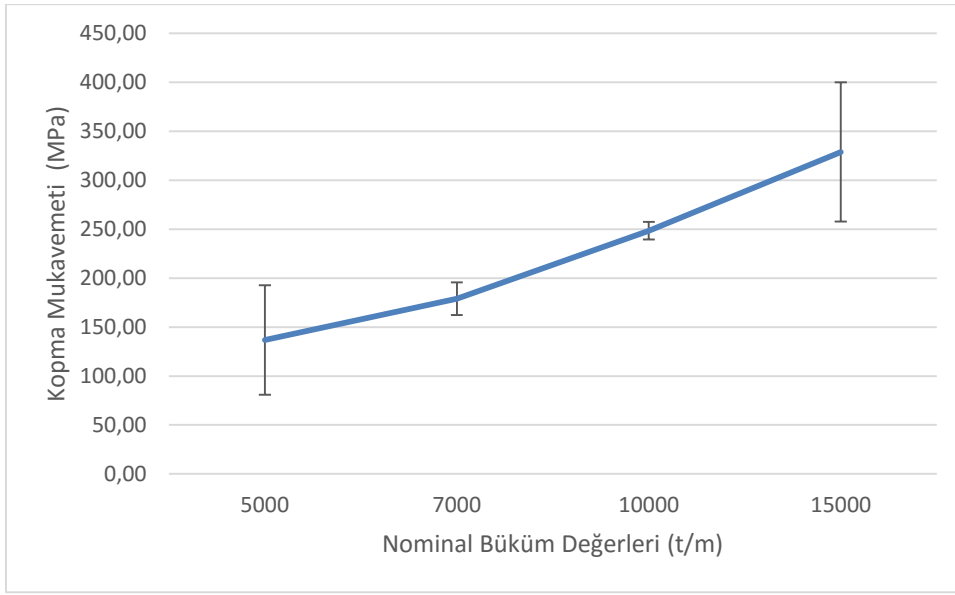
4.4.2. Yöntem 2 ile eğrilen ipliklerin analizi

Bu yöntemle üretilen ipliklerin mukavemet testlerinde, Yöntem 1’dekinden farklı olarak Ghemes ve ark. (2012) kullandığı siyanoakrilat içerikli yapıştırıcılar kullanılan test numuneleriyle ölçüm yapılmıştır (Şekil 3.11). Yöntem 2 ile büküm verilen KNT ipliklerde mukavemet test sonuçlarına ait ortalama değerler Çizelge 4.17’de verilmektedir. Sonuçlara ait detaylar ve grafiklerin tamamı ise Ek 5’de verilmiştir.

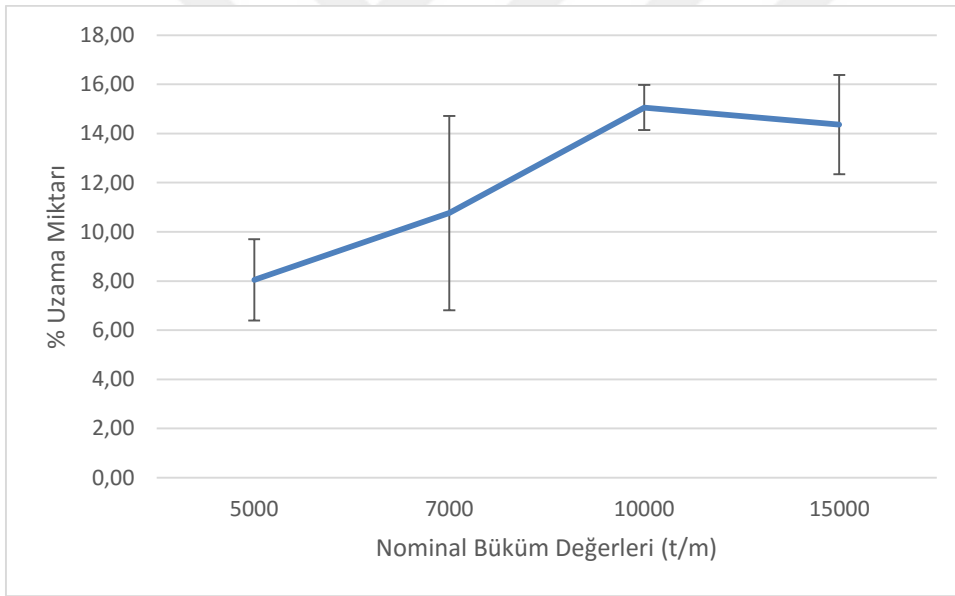
Çizelge 4.17. Yöntem 2 ile üretilen ipliklerin kopma mukavemeti ve % uzama değerleri

Nominal Büküm (t/m)	Ortalama % Kopma Uzama	%CV	Kopma Mukavemeti (MPa)	%CV
5000	8,05	20,49	136,93	40,84
7000	10,76	36,68	179,03	9,27
10000	15,06	6,10	248,44	3,60
15000	14,36	14,08	328,92	21,65

Söz konusu ipliklerin mukavemet değerlerinin iplik bükümüne bağlı olarak değişimi Şekil 4.13’te, % kopma uzama davranışının büküm ile değişimi ise Şekil 4.14’te görülmektedir.



Şekil 4.13. Büküm miktarına bağlı olarak iplik mukavemetinde değişim (yöntem 2)



Şekil 4.14. Büküm miktarına bağlı olarak % kopma uzama değerlerinde değişim (yöntem 2)

Çizelge 4.17’de verilen değerler, Yöntem 2 ile eğrilen ipliklerde büküm miktarı arttıkça ortalama kopma mukavemeti değerlerinin önemli derecede arttığını ortaya koymaktadır. İpliklerin % kopma uzama değerlerinin ise 10000 t/m büküm seviyesine kadar artış eğilimi gösterdiği fakat bu büküm seviyesinden sonra aynı seviyede kaldığı görülmektedir.

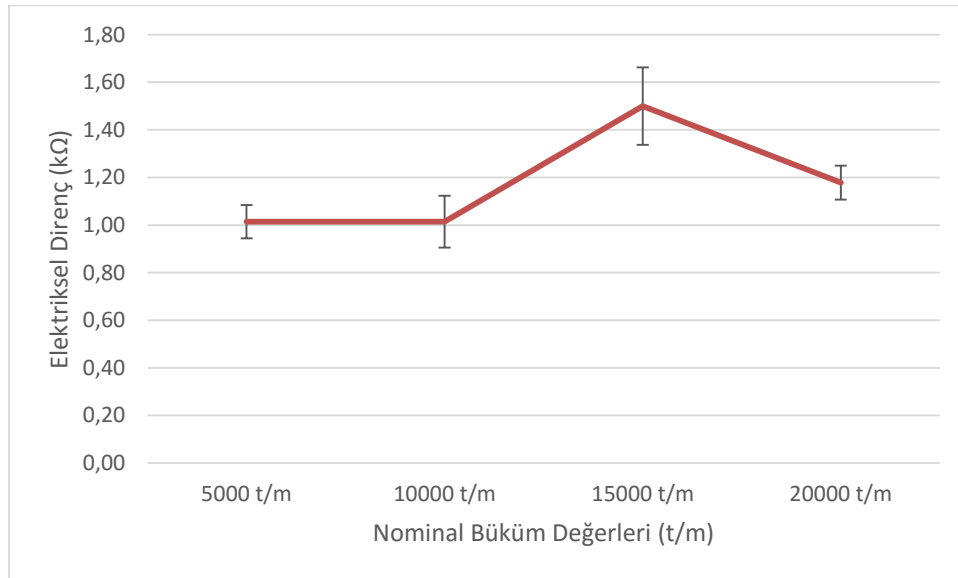
Öte yandan Yöntem 1 ve Yöntem 2 ile elde edilen ipliklerin kopma mukavemeti değerlerinin ortalama 140-330 MPa arasında değiştiği görülmektedir. Literatürde farklı eğirme metotları ve test yöntemleriyle çalışan Atkinson ve ark. (2007) tarafından 700 MPa, modifiye bir eğirme prosesi uygulayan Tran ve ark. (2009) tarafından 970-1400 MPa, Zhang ve ark. (2007) tarafından 410 MPa seviyelerinde mukavemet değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen değerler benzer yöntemle çalışan Zhang ve ark. (2004) tarafından elde edilen 150-300 MPa mukavemet değeriyle oldukça benzerlik göstermektedir.

4.5. Elektriksel Direnç Değerleri

Yöntem 1 ile eğrilen iplikler için elde edilen direnç ortalamaları Çizelge 4.18 ve Şekil 4.15'te verilmiştir. Yöntem 2 için 1 cm uzunluğundaki numunelerle yapılan elektriksel direnç ölçümlerinin ortalamaları Çizelge 4.20'de, bu sonuçların nominal büküm değerlerine göre değişimi Şekil 4.16'da, ANOVA test sonuçları Çizelge 4.19 ve Çizelge 4.21'de verilmiştir. Ortalamaları verilen bu ölçüm değerlerinin tamamı ve detaylı ANOVA testi sonuçları Ek 6'da verilmiştir.

Çizelge 4.18. Yöntem 1'e göre üretilen KNT ipliklerin elektriksel dirençleri

Nominal Büküm Değeri	5000 t/m	10000 t/m	15000 t/m	20000 t/m
Ortalama Direnç (k Ω /cm)	1,01	1,01	1,50	1,18
%CV	6,88	10,72	10,85	6,07



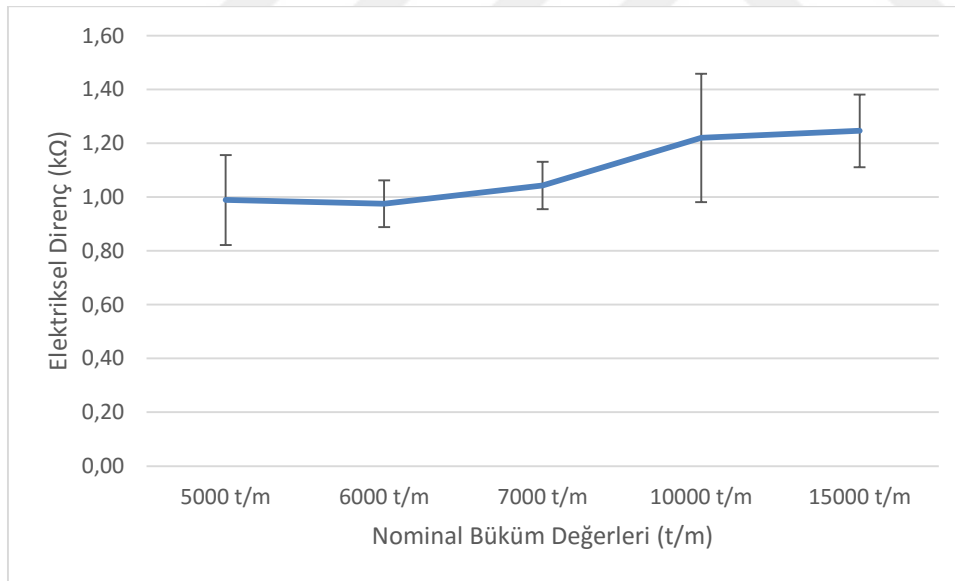
Şekil 4.15. Yöntem 1 ile elde edilen KNT ipliklerin elektriksel dirençleri

Çizelge 4.19. Yöntem 1’deki KNT ipliklerin direnç değerlerine ait ANOVA testi

Bukum	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
5000	10	1,0146	1,1786	1,4996
10000	10	1,0146		
20000	10			
15000	10			
Sig.		1,000	1,000	1,000

Çizelge 4.20. Yöntem 2’ye göre üretilen KNT ipliklerin elektriksel dirençleri

Numune	5000 t/m	6000 t/m	7000 t/m	10000 t/m	15000 t/m
Ortalama Direnç (kΩ/cm)	0,99	0,98	1,04	1,22	1,25
%CV	16,96	8,91	8,48	19,53	10,86



Şekil 4.16. Yöntem 2 ile elde edilen KNT ipliklerin elektriksel dirençleri

Çizelge 4.21. Yöntem 1’deki KNT ipliklerin direnç değerlerine ait ANOVA testi

Bukum	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
6000	10	,9750		
5000	10	,9890		
7000	10	1,0430	1,0430	
10000	10		1,2200	1,2200
15000	10			1,2460
Sig.		,860	,093	,996

Elektriksel direnç değerlerine ait grafikler ve ANOVA analizleri incelendiğinde, Yöntem 1’de 5000 t/m ile 10000 t/m arasında anlamlı bir fark görülememiştir. Büküm miktarına bağlı olarak direnç değerlerinde artış olmakla birlikte yine 15000 t/m civarındaki bir kritik değerden sonra bu seyir değişmiştir. Yöntem 2 için 5000 t/m ile 7000 t/m arasında, 7000 t/m ile 10000 t/m arasında, 10000 t/m ile 15000 t/m arasında anlamlı bir fark gözükmemektedir. Ancak bu üç farklı gruplandırma arasında büküme bağlı olarak artan bir elektriksel direnç vardır sonucu çıkarılabilir.

Elektriksel iletkenlik değerleri 2 ve 3 No’lu eşitlikler göz önüne alınarak hesaplanmış olup, her iki yöntemle üretilen ipliklere ait elde edilen sonuçlar Çizelge 4.22 ve Çizelge 4.23’te verilmiştir.

Çizelge 4.22. Yöntem 1 ile eğrilen KNT ipliklerin iletkenlik değerleri

	Yöntem 1			
Nominal Büküm Miktarı	5000 t/m	10000 t/m	15000 t/m	20000 t/m
Direnç (k Ω /cm)	1,01	1,01	1,50	1,18
Özdirenç (Ω m)	13,99 x 10 ⁻⁵	5,74 x 10 ⁻⁵	8,20 x 10 ⁻⁵	4,13 x 10 ⁻⁵
İletkenlik (S/m)	0,71 x 10 ⁴	1,74 x 10 ⁴	1,22 x 10 ⁴	2,42 x 10 ⁴

Çizelge 4.23. Yöntem 2 ile eğrilen KNT ipliklerin iletkenlik değerleri

	Yöntem 2				
Nominal Büküm Miktarı	5000 t/m	6000 t/m	7000 t/m	10000 t/m	15000 t/m
Direnç (k Ω /cm)	0,99	0,98	1,04	1,22	1,25
Özdirenç (Ω m)	9,14 x 10 ⁻⁵	6,07 x 10 ⁻⁵	6,44 x 10 ⁻⁵	4,47 x 10 ⁻⁵	2,68 x 10 ⁻⁵
İletkenlik (S/m)	1,09 x 10 ⁴	1,65 x 10 ⁴	1,52 x 10 ⁴	2,24 x 10 ⁴	3,73 x 10 ⁴

Çizelge 4.22 ve Çizelge 4.23'te yer alan sonuçlar üretilen ipliklerin iletkenliğinin Yöntem 1 için $0,71 - 2,42 \times 10^4$ S/m değerleri arasında değiştiğini, Yöntem 2 için ise $1,09 - 3,73 \times 10^4$ S/m değerleri arasında değiştiğini göstermektedir. Bu konuda literatürde yer alan iletkenlik değerleri incelendiğinde ise Miao (2011) tarafından $1,5 \times 10^4$ S/m ile $3,7 \times 10^4$ S/m değerleri ve Zhong ve ark. (2010) tarafından 5×10^5 S/m sonuçlarının elde edildiği görülmektedir. Sonuç olarak çalışmada elde edilen değerlerin literatürde yer alan değerlere oldukça yakın olduğu söylenebilir.

Öte yandan elde edilen sonuçlarda her iki yöntemde büküm miktarı arttıkça iletkenlik değerinin arttığı görülmektedir. Nitekim Miao (2011) tarafından sunulan çalışmada elde edilen iletkenlik değerlerinin ipliklerde büküm artışına bağlı olarak arttığını belirtilmekte olup, bunun sebebi de büküm arttıkça iplik gözenekliliğinin azalmasına bağlanmaktadır.

5. SONUÇ

Olağanüstü özellikleri sayesinde karbon nanotüpler (KNT'ler) günümüzün ileri malzemelerinden birisidir. Bu malzemeler daha çok toz partikül form halinde üretilmekle birlikte, son on yılda dünyada sınırlı sayıda ileri araştırma merkezinde eğrilebilir karbon nanotüp veya diğer bir ifadeyle karbon nanotüp elyaf halinde çok daha özel bir formda üretilmeye başlanmıştır. Ancak çok yeni bir alan olan eğrilebilir karbon nanotüplerin sentezlenmesi ve özelliklerinin incelenmesi yanında, karbon nanotüp elyaf dizinlerinin (KNT ormanları) iplik haline dönüştürülmesi ve bu nanoliflerden elde edilen özel ipliklerin yapısal ve mekanik özellikleri hakkında literatürde yer alan çalışma sayısı çok sınırlıdır.

Bu çalışmada Türkiye için de tamamen yeni bir ürün niteliğindeki bu üstün malzemeler, Teksas Dallas Üniversitesi Nanotech Enstitüsü'nden (A.B.D.) temin edilerek, KNT liflerden iplikler eğrilmiş ve ipliklerin yüzey görünümleri, incelikleri, yüzey büküm açıları, mukavemet ve % kopma uzama özellikleri ve iletkenlikleri analiz edilmiştir.

Bu doğrultuda sunulan tez kapsamında gerçekleştirilen temel çalışma adımları ve elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- KNT lif dizinlerinden (KNT ormanı), çalışma kapsamında Yöntem 1 ve Yöntem 2 olarak adlandırılan iki farklı yöntemle KNT iplik eğirme gerçekleştirilmiştir.
- Çalışmada Yöntem 1 ile dört farklı (5000-10000-15000-20000 t/m), Yöntem 2 ile beş farklı nominal büküm seviyesinde (5000-6000-7000-10000-15000 t/m) KNT iplik üretimleri gerçekleştirilmiştir.
- Farklı yöntem ve farklı büküm seviyelerinde elde edilen KNT ipliklerin yüzey yapıları SEM analizleri ile incelenmiş, iplik incelikleri ve yüzey büküm açılarının analiziyle iplikler karakterize edilmiştir.
- Sonuç olarak ortalama 17 ile 40 μm aralığında çap değerlerine sahip son derece ince iplikler elde edilmiş bulunmaktadır. KNT liflerden eğrilen ipliklerin konvansiyonel ipliklere benzer şekilde artan büküm miktarı ile birlikte çok daha ince, dolayısıyla daha sıkı yapıya sahip oldukları görülmektedir. Öte yandan ipliklerde özellikle düşük büküm seviyelerinde yüksek incelik varyasyonu gözlenmiştir.
- İpliklerde yüzey büküm açıları ise verilen büküm miktarına bağlı olarak 17-33° arasında değişmektedir. Yöntem 1 ile üretilen ipliklerde belli bir büküm seviyesinden sonra ilginç şekilde yüzey büküm açısında düşüş gözlenmiştir. Bu durumun kullanılan eğirme tekniğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yöntem 2 ile elde edilen

ipliklerde ise, bekleneneği üzere büküm miktarı arttıkça yüzey büküm açısı değerleri artarken iplik çapları azalmaktadır.

- Çalışmada ayrıca Yöntem 2 ile üretilen ipliklerde büküm miktarına bağlı kısalma oranları da analiz edilmiş olup, artan büküm miktarıyla kısalma faktöründe önemli derecede artış gözlenmektedir.
- Elde edilen ipliklerin kopma mukavemetlerinin yaklaşık 140-330 MPa arasında değiştiği görülmektedir. İpliklerin % kopma uzama değerleri ise % 8-20 arasında değişmektedir.
- Elde edilen ipliklerin elektriksel iletkenliği analiz edildiğinde değerlerin $0,71 - 3,73 \times 10^4$ S/m aralığında değiştiği, iplik eğirme yöntemi ve büküm miktarının, KNT ipliklerin elektriksel iletkenliği üzerinde bir miktar etkili olduğu görülmektedir.

Daha Sonraki Çalışmalar için Öneriler;

KNT ipliklerle ilgili mevcut sınırlı sayıdaki çalışmalar daha çok KNT elyaf üretimi, ipliğe dönüştürme ve elde edilen ipliklerin uygulamaları üzerinedir. Dolayısıyla tam anlamıyla iplik yapı ve özelliklerine odaklanan çalışma sayısı çok sınırlıdır. Bu yönüyle daha ayrıntılı çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Kullanılan KNT liflerin iplik özelliklerini etkileyeceği açık olup, daha sonraki çalışmalarda KNT ormanlarının tam anlamıyla karakterize edilmesi yerinde olacaktır.

Bu çalışmada literatürde elde edilen ipliklerle benzer mukavemette iplikler elde edilebilmekle birlikte, daha mukavim iplikler için eğirme işleminde modifikasyon ve eğirme sonrası ilave işlemler konusunda çalışmalara ihtiyaç vardır. Çalışmada bazı büküm seviyelerinde gerek iplik incelikleri gerekse mukavemet özelliklerinde yüksek varyasyonlar gözlenmiştir. Kullanılan eğirme yönteminin daha homojen özellikte iplikler üretecek şekilde geliştirilmesi gerekmektedir.

KNT ipliklerde artan büküm miktarına bağlı kısalma faktörünün farklı yükler altında incelenerek analiz edilmesi ve iplik yapısındaki değişimlerin gözlenmesi faydalı olacaktır.

KNT liflerin ipliğe dönüştürülmesi son derece hassas ve dikkat isteyen bir işlem olup, KNT ormanlarından liflerin çekilmesi ve ipliğe dönüştürülmesi zaman alıcı bir prosestir. Bu nedenle kılavuz vb. yardımıyla stabil ve daha hızlı eğirme yapacak şekilde kesintisiz KNT iplik eğirme işlemi yapabilen bir eğirme düzeneğinin geliştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır.

6. KAYNAKLAR

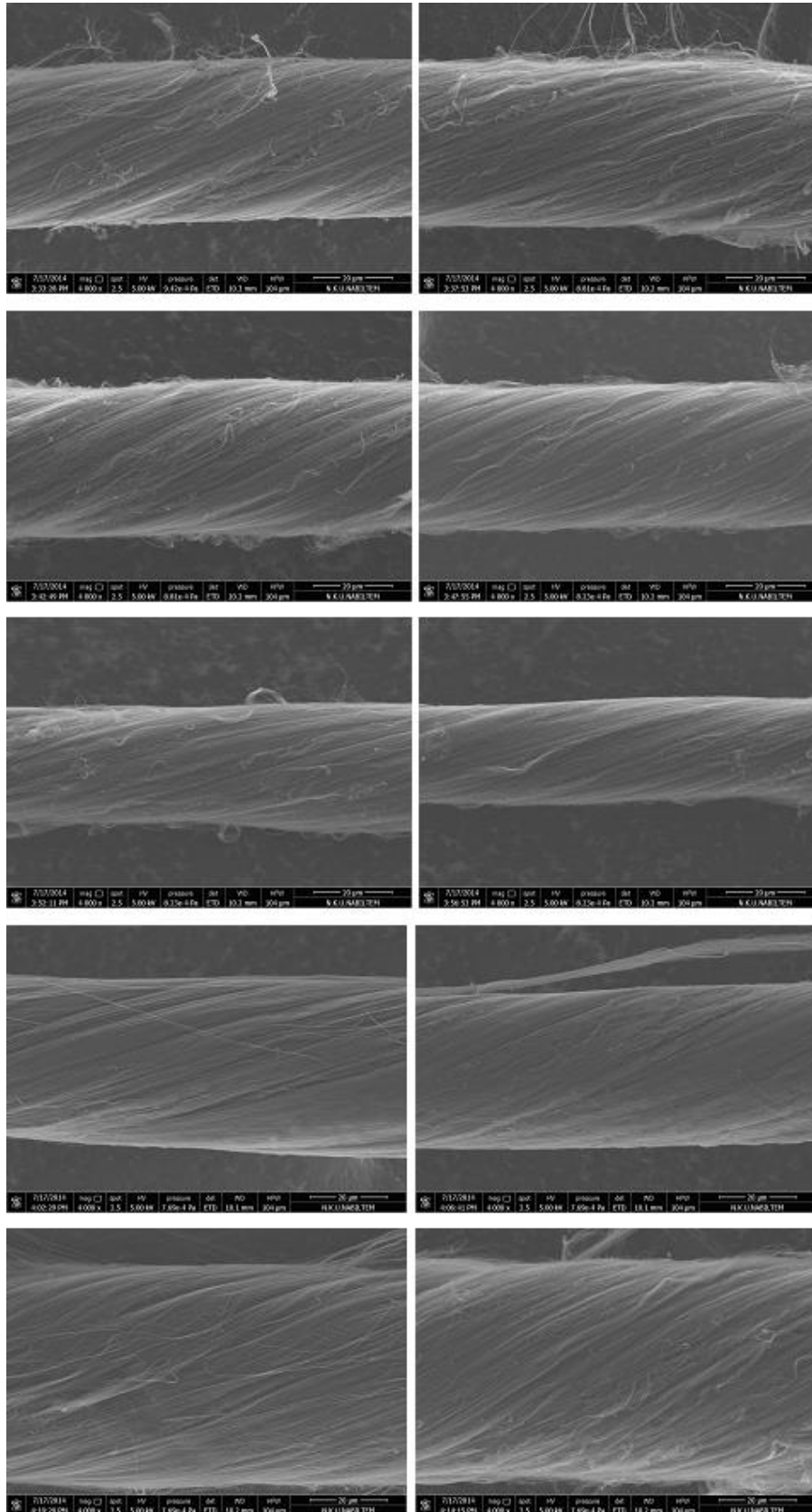
- Anonim (2012). Wax-filled Nanotech Yarn Behaves Like Powerful, Super-Strong Muscle. <http://www.sciencedaily.com/releases/2012/11/121115141534.htm> Erişim Tarihi: 14.11.2015
- Atkinson K, Hawkins S, Huynh C, Skourtis C, Dai J, Zhang M, Fang S, Zakhidov A, Lee S, Aliev A, Williams C, Baughman R (2007). Multifunctional Carbon Nanotube Yarns And Transparent Sheets: Fabrication, Properties, And Applications. *Physica B*, 394: 339–343.
- De Volder MFL, Tawfick SH, Baughman R, Hart AJ (2013). Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications. *Science*, 339: 535-539.
- Ericson L, Ramesh S., Fan H, Wang Y, Davis V, Vavro J, Zhou W, Guthy C, Fischer J, Hauge R, Pasquali M, Hwang W, Hauge RH, Fischer JE, Smalley RE (2004). Macroscopic, Neat, Single-walled Carbon Nanotube Fiber. *Science*, 305: 1447-1450.
- Eser HM (2006). Karbon Nanotüp-Sıvı Kristal Karışımlarının Elektriksel Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze.
- Foroughi J, Spinks GM, Wallace GG, Oh J, Kozlov ME, Fang S, Mirfakhrai T, Madde JDW, Shin MK, Kim SJ, Baughman R (2011). Torsional Carbon Nanotube Artificial Muscles. *Science*, 334: 494-497.
- Ghemes A, Minami Y, Muramatsu J, Okada M, Mimura H, Inoue Y (2012). Fabrication and Mechanical Properties of Carbon Nanotube Yarns Spun From Ultra-Long Multi-Walled Carbon Nanotube Arrays. *Carbon*, 50: 4579-4587.
- Göktepe F (2015). Eğrilebilir Karbon Nanotüpler ve Bu Özel Liflerden Üretilen Teknik İplikler. *Tekstil ve Mühendis*, 22: 1-12.
- Haines CS, Lima MD, Li N, Spinks GM, Foroughi J, Madden JDW, Kim SH, Fang S, de Andrade MJ, Göktepe F, Göktepe Ö, Mirvakili SM, Naficy S, Lepro X, Oh J, Kozlov ME, Kim SJ, Xu X, Swedlove BJ, Wallace GG, Baughman RH (2014). Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread. *Science*, 343: 868-872.
- Hearle JWS, Grosberg P, Backer S (1969). *Structural Mechanics of Fibers, Yarns, and Fabrics*. John Wiley & Sons Inc, 469 p, USA.
- Hongu T, Phillips GO, Machiko Takigami (2005), *New Millennium Fibers*. Woodhead Publishing in Textiles, 299 p, Cambridge, England.
- Iijima T, Oshima H, Hayashi Y, Suryavanshi U, Hayashi A, Tanemura M (2012). In-Situ Observation Of Carbon Nanotube Fiber Spinning From Vertically Aligned Carbon Nanotube Forest. *Diamond & Related Materials*, 24: 158–160.
- Küçükyıldırım BO, Eker AA (2012). Karbon Nanotüpler, Sentezleme Yöntemleri ve Kullanım Alanları. *Mühendis ve Makine*, 53: 34-44.

- Lepro X, Lima M, Baughman R (2010). Spinnable Carbon Nanotube Forests Grown On Thin, Flexible Metallic Substrates. *Carbon*, 48: 3621–3627.
- Lima M, Fang S, Lepro X, Lewis C, Ovalle-Robles R, Carretero-González J, Castillo-Martínez E, Kozlov M, Oh J, Rawat N, Haines C, Haque M, Aare V, Stoughton S, Zakhidov A, Baughman R (2011). Biscrolling Nanotube Sheets and Functional Guests into Yarns. *Science*, 331: 51-55.
- Lima MD, Li N, de Andrade MJ, Fang S, Oh J, Spinks GM, Kozlov ME, Haines CS, Suh D, Foroughi J, Kim SJ, Chen Y, Ware T, Shin MK, Machado LD, Fonseca AF, Madden JDW, Voit WE, Galvão DS, Baughman RH (2012). Electrically, Chemically, and Photonically Powered Torsional and Tensile Actuation of Hybrid Carbon Nanotube Yarn Muscles. *Science*, 338: 928-932.
- Miao M (2011). Electrical Conductivity of Pure Carbon Nanotube Yarns. *Carbon*, 49: 3755-3761.
- Özdoğan E, Demir A, Seventekin N (2006). Nanoteknoloji ve Tekstil Uygulamaları. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 3: 159-168.
- Saito RF (1992). Electronic Structure Of Chiral Graphene Tubules. *Applied Physics Letters*, 60: 2204-2206.
- Sinnott SB, Andrews R (2001). Carbon Nanotubes: Synthesis, Properties, and Applications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 3: 145–249.
- Tran CD, Humphries W, Smith S, Huynh C, Lucas S (2009). Improving The Tensile Strength Of Carbon Nanotube Spun Yarns Using A Modified Spinning Process. *Carbon*, 47: 2662–2670.
- Zhang M, Atkinson KR, Baughman RH (2004). Multifunctional Carbon Nanotube Yarns by Downsizing an Ancient Technology. *Science*, 306: 1358-1361.
- Zhang M, Fang S, Zakhidov A, Lee S, Aliev A, Williams C, Atkinson K, Baughman R (2005). Strong, Transparent, Multifunctional, Carbon Nanotube Sheets. *Science*, 309: 1215.
- Zhang X, Jiang K, Feng C, Liu P, Zhang L, Kong J, Zhang T, Li Q, Fan S (2006). Spinning and Processing Continuous Yarns from 4-Inch Wafer Scale Super-Aligned Carbon Nanotube Arrays. *Advanced Materials*, 18: 1505-1510.
- Zhang X, Li Q, Tu Y, Li Y, Coulter J, Zheng L, Zhao Y, Jia Q, Peterson D, Zhu Y (2007) Strong Carbon-Nanotube Fibers Spun from Long Carbon-Nanotube Arrays. *Small Journal* 3, 2: 244-248.
- Zhong X, Li Y, Liu Y, Qiao X, Feng Y, Liang J, Jin J, Zhu L, Hou F, Li J (2010). Continuous Multilayered Carbon Nanotube Yarns. *Advanced Materials*, 22: 692–696.

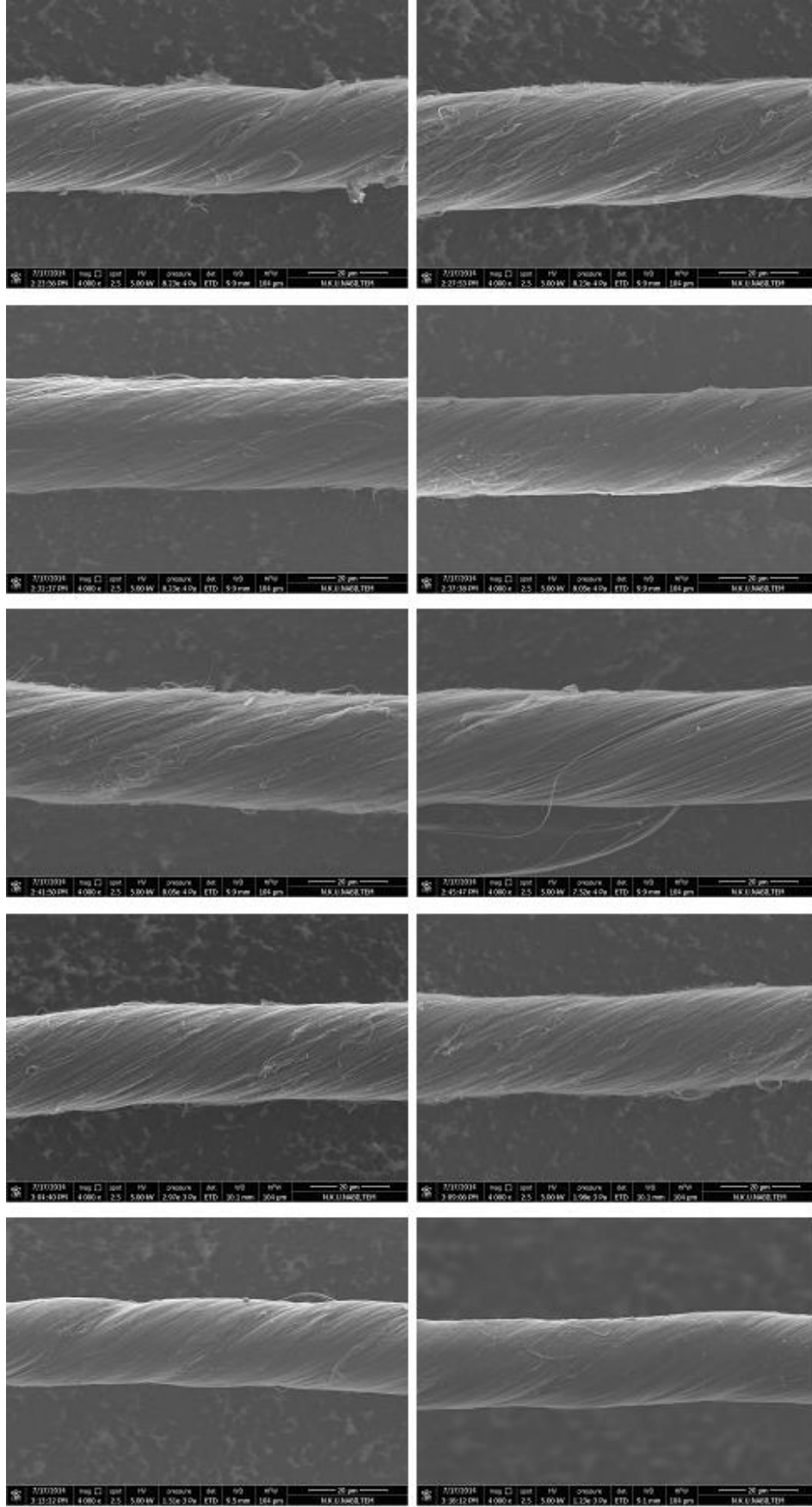
EKLER

EK 1: ÜRETİLEN İPLİKLERE AİT SEM ANALİZİ İLE BELİRLENEN YÜZEY GÖRÜNTÜLERİ

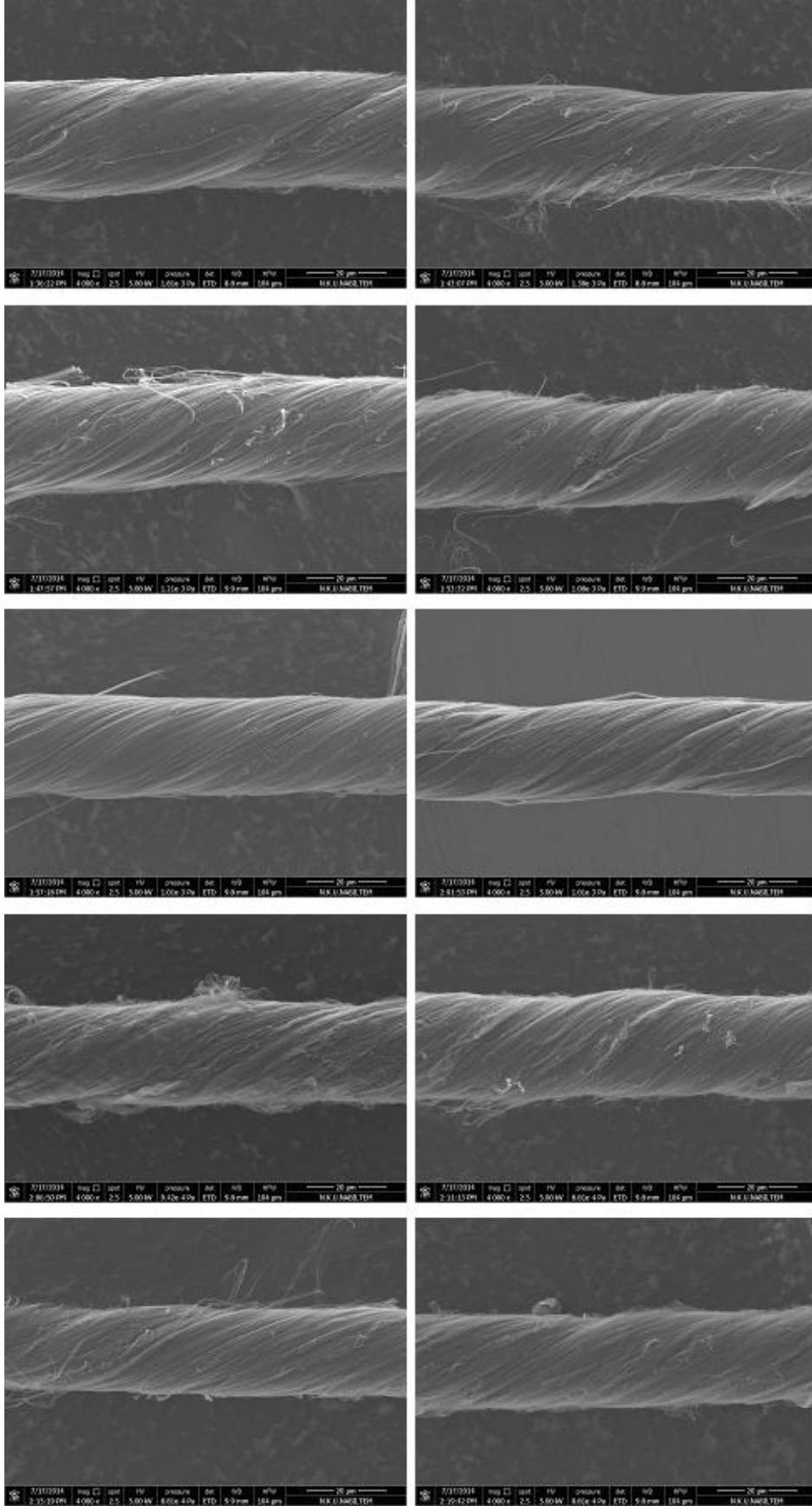
A) Yöntem 1 İle Elde Edilen İpliklere Ait Yüzey Görüntüleri (5000 t/m)



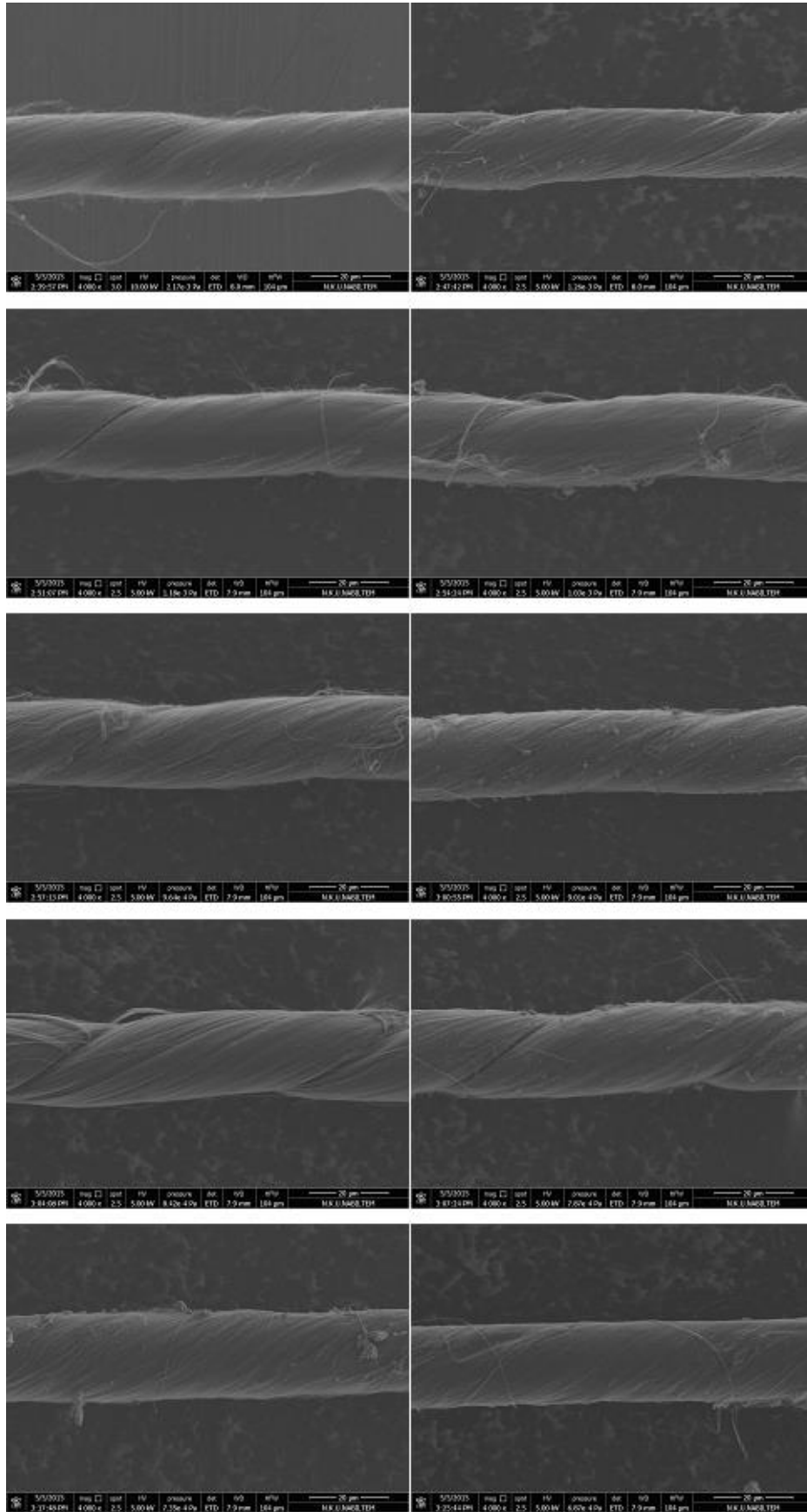
B) Yöntem 1 İle Elde Edilen İpliklere Ait Yüzey Görüntüleri (10000 t/m)



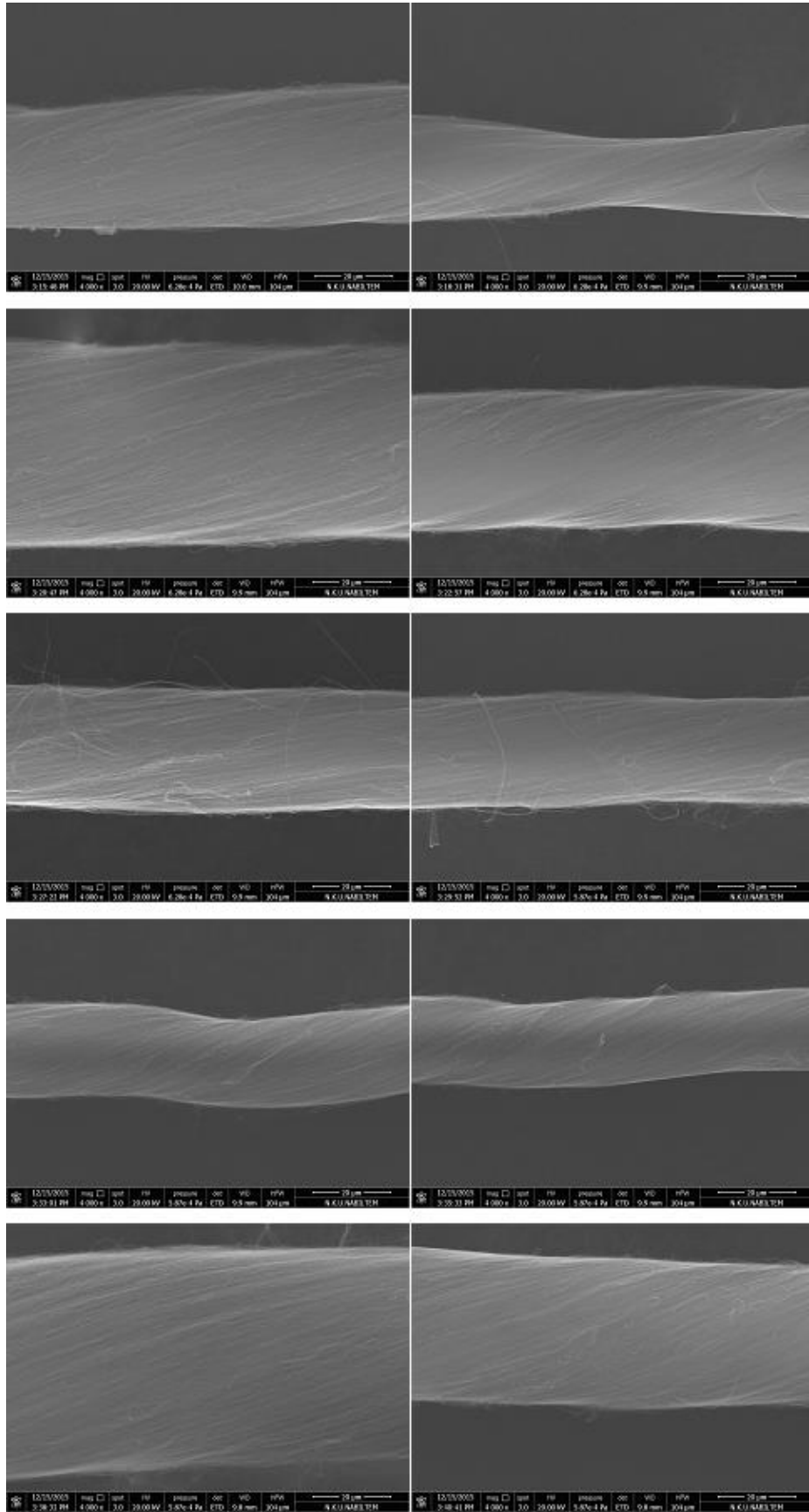
C) Yöntem 1 İle Elde Edilen İpliklere Ait Yüzey Görüntüleri (15000 t/m)



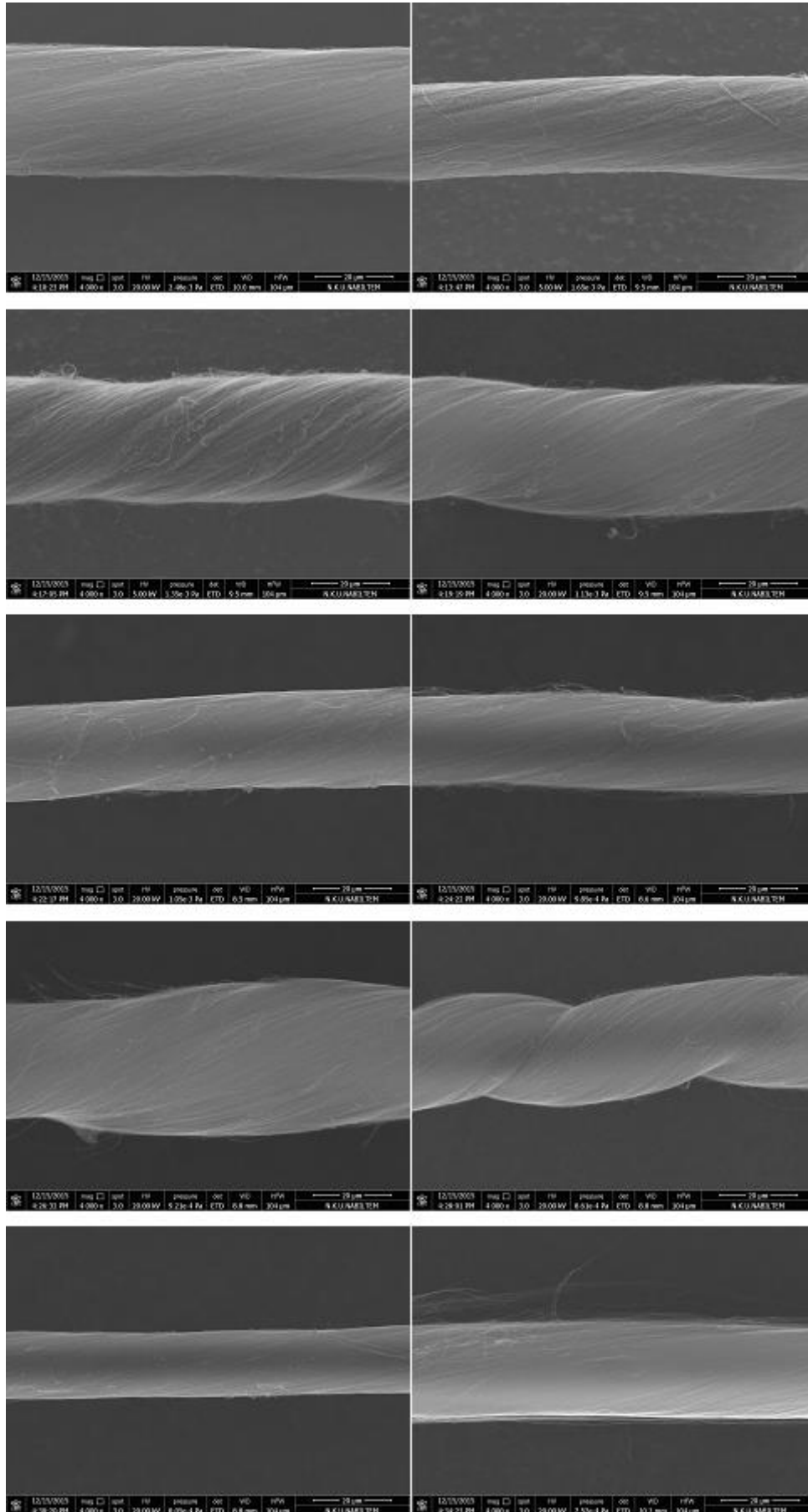
D) Yöntem 1 İle Elde Edilen İpliklere Ait Yüzey Görüntüleri (20000 t/m)



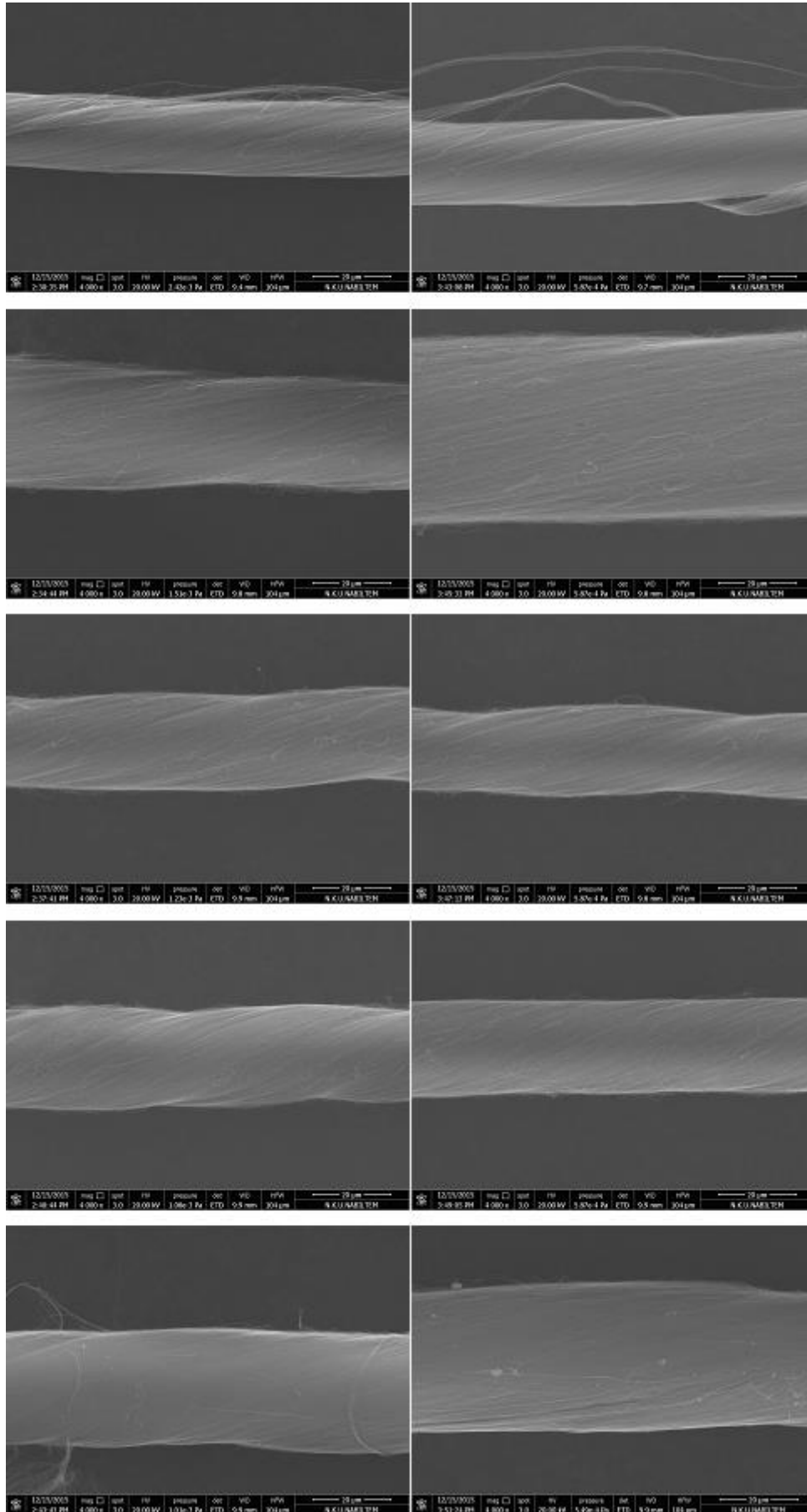
E) Yöntem 2 İle Elde Edilen İpliklere Ait Yüzey Görüntüleri (5000 t/m)



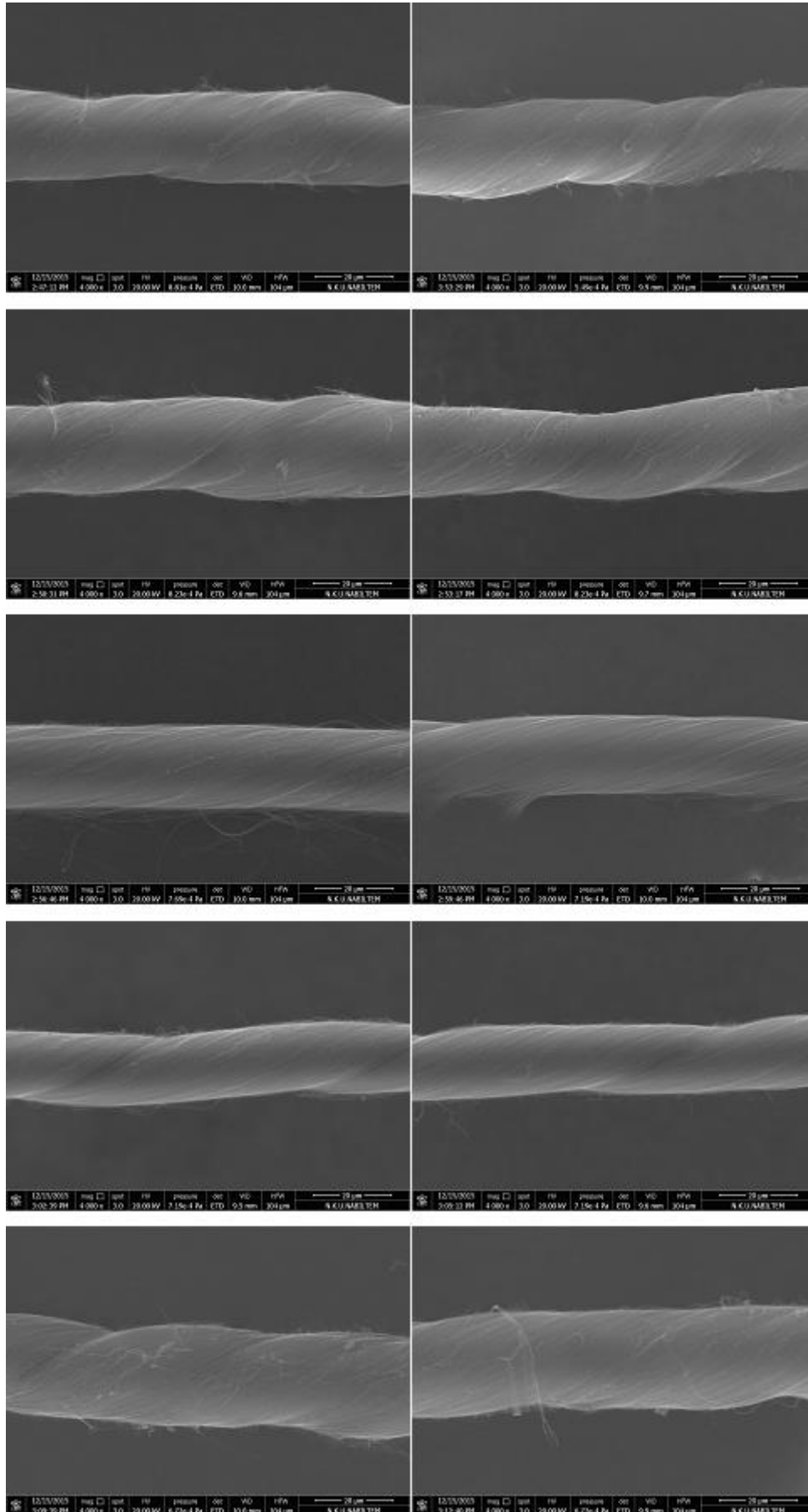
F) Yöntem 2 İle Elde Edilen İpliklere Ait Yüzey Görüntüleri (6000 t/m)



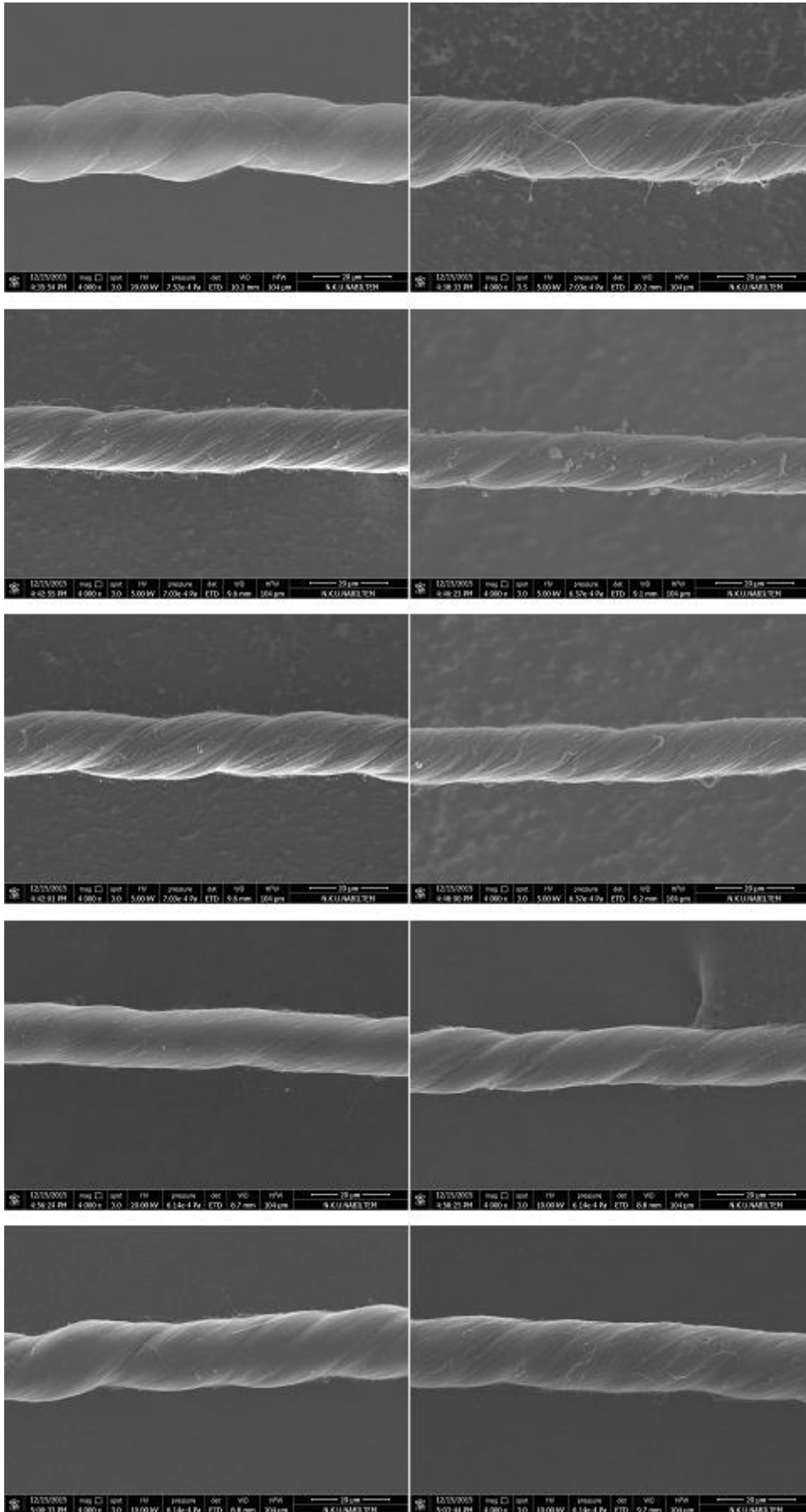
G) Yöntem 2 İle Elde Edilen İpliklere Ait Yüzey Görüntüleri (7000 t/m)



H) Yöntem 2 İle Elde Edilen İpliklere Ait Yüzey Görüntüleri (10000 t/m)



I) Yöntem 2 İle Elde Edilen İpliklere Ait Yüzey Görüntüleri (15000 t/m)



EK 2: İPLİK ÇAPI VE BÜKÜM AÇISI DEĞERLERİ

A) Yöntem 1 İle Elde Edilen İpliklere Ait İplik Çapı Ve Büküm Açısı Değerleri

Büküm(t/m)	1.açı	2.açı	3.açı	4.açı	5.açı	1.çap	2.çap	3.çap	4.çap	5.çap
5000	22,70	20,80	22,70	22,20	19,50	41,28	41,68	41,48	40,81	40,27
	19,50	19,60	19,40	14,90	15,70	42,49	42,83	43,03	44,52	44,38
	22,80	20,10	20,40	27,00	26,20	40,94	38,18	39,66	39,59	37,77
	23,60	21,00	22,70	19,40	24,00	38,78	37,77	36,49	37,03	36,08
	10,40	16,20	14,30	12,50	15,40	33,52	30,42	29,47	32,85	32,98
	17,50	17,50	11,90	13,10	13,50	25,29	25,97	26,31	25,77	27,11
	14,10	13,40	17,60	12,90	12,30	42,16	43,17	44,99	46,61	46,74
	24,30	23,20	17,20	18,70	20,00	39,05	40,27	40,87	41,62	41,48
	23,70	19,40	13,00	19,80	10,70	57,26	57,20	57,47	56,79	56,32
	25,70	31,90	25,40	33,30	23,20	58,34	55,85	58,01	57,33	59,69
10000	30,40	25,60	21,70	29,90	27,30	27,86	26,81	28,36	26,37	27,59
	23,00	21,80	28,20	18,70	30,00	30,39	31,80	29,98	29,88	30,69
	22,70	22,40	20,30	18,00	21,60	28,97	27,92	28,53	27,92	28,63
	29,40	29,50	30,70	28,80	19,70	25,39	25,43	26,00	26,27	26,00
	19,30	20,60	14,60	19,40	16,40	29,95	29,31	30,45	29,78	30,25
	16,80	24,60	21,30	21,30	22,80	29,44	30,18	29,81	29,34	29,41
	31,30	27,60	25,90	26,60	23,30	26,20	26,07	25,66	24,52	25,19
	26,90	17,40	33,40	26,20	27,60	28,53	24,79	26,07	26,00	24,35
	28,50	26,60	32,00	22,80	24,10	21,28	22,19	22,06	22,26	23,78
	29,00	35,80	31,00	34,00	29,40	23,44	22,56	22,66	23,00	22,93
15000	25,60	24,60	18,40	20,10	21,20	28,97	30,08	28,53	30,01	29,61
	24,00	28,70	22,70	24,10	26,60	27,75	30,22	25,77	27,86	29,31
	33,40	28,10	28,50	29,90	22,00	28,63	28,33	26,57	27,92	24,55
	34,20	32,50	18,40	29,50	31,30	28,90	29,98	27,38	28,16	27,35
	34,20	27,40	28,70	25,60	31,00	25,80	26,61	25,33	25,09	25,50
	33,90	28,60	23,30	22,90	28,70	25,16	25,02	24,72	25,29	24,21
	18,80	24,60	27,60	21,20	27,50	26,27	25,90	26,47	25,12	27,45
	36,20	29,00	39,00	36,20	29,30	27,62	27,89	25,97	25,36	27,05
	23,60	20,40	27,00	26,60	23,90	22,09	21,38	23,03	22,26	22,83
	20,60	26,10	26,90	21,70	25,40	24,62	24,58	25,33	23,91	26,17
20000	25,30	27,70	22,16	26,57	22,52	21,52	21,18	20,98	21,28	20,89
	21,50	26,30	24,44	26,57	21,97	18,89	18,01	16,66	18,53	16,13
	22,90	26,40	22,75	19,29	23,96	20,30	21,45	21,31	21,33	21,53
	24,50	16,00	20,22	16,70	22,52	22,33	21,99	21,04	21,33	22,67
	22,30	24,00	23,50	21,99	22,20	21,52	21,31	21,38	21,07	21,20
	24,50	27,90	29,93	25,97	22,54	21,85	20,98	21,79	21,33	20,80
	24,90	27,70	22,99	25,64	21,99	21,52	22,26	23,41	21,07	20,53
	29,60	28,40	25,96	24,34	26,57	21,18	22,60	22,80	22,80	20,87
	29,70	31,20	28,30	26,08	29,54	21,79	22,33	20,98	22,67	22,60
	30,10	30,80	30,11	30,36	31,61	21,25	20,50	21,05	20,93	20,47

B) Yöntem 2 İle Elde Edilen İpliklere Ait İplik Çapı Değerleri

Büküm Miktarı (t/m)	İplik Çapı Değerleri									
5000	36,22	34,90	29,84	31,57	34,37	33,17	30,77	32,50	32,37	33,44
	26,91	25,44	17,45	19,18	24,91	27,71	28,37	27,97	27,04	26,77
	52,35	51,28	51,42	48,89	48,89	50,75	51,28	52,08	52,62	51,95
	34,90	34,77	34,77	34,63	34,63	62,87	64,47	64,61	64,87	66,60
	30,77	31,57	31,83	31,57	30,37	28,91	26,24	25,84	26,91	27,17
	28,51	27,97	29,84	26,77	26,77	22,24	22,51	22,11	22,11	21,58
	23,84	23,71	23,04	23,31	22,78	23,71	23,58	21,71	23,44	23,31
	22,64	22,51	21,84	21,44	20,38	24,91	23,71	24,11	24,91	23,97
	55,95	55,95	54,35	54,22	53,68	38,10	38,10	39,29	40,10	42,36
	39,03	38,36	37,70	36,76	36,10	34,77	34,63	37,03	34,90	36,76
6000	33,25	34,10	32,90	33,43	33,70	33,70	32,90	33,43	33,30	32,90
	24,38	23,98	24,24	25,71	26,91	36,23	36,37	36,76	35,70	35,16
	32,50	30,77	31,97	30,77	32,23	31,57	29,84	33,03	29,04	32,77
	31,44	31,04	32,77	32,64	31,84	33,17	30,37	29,84	30,24	31,17
	24,11	24,24	23,98	25,44	25,17	23,58	23,18	21,98	22,64	23,84
	23,04	22,38	22,64	24,11	24,51	23,44	23,71	21,98	23,31	23,18
	29,31	30,64	38,63	37,96	33,70	30,37	30,77	31,83	29,57	29,84
	27,17	26,51	26,91	24,11	29,17	33,43	33,03	35,57	35,17	35,57
	17,18	16,78	16,91	16,65	17,05	16,38	17,32	16,65	16,65	17,05
	29,30	29,84	30,50	31,57	35,04	25,17	25,31	25,04	25,17	23,44
7000	20,03	19,31	18,65	19,31	19,85	18,65	19,47	18,33	19,93	19,20
	20,91	22,25	22,11	22,11	21,98	20,25	19,98	20,91	21,44	19,98
	33,03	30,24	26,91	28,64	27,57	37,03	37,83	37,56	37,30	39,56
	46,90	47,15	47,82	46,22	46,35	35,57	36,23	37,43	38,63	38,90
	22,50	23,71	25,04	24,11	23,71	22,38	22,91	23,18	22,25	25,71
	20,91	20,91	23,31	21,44	21,71	20,91	20,25	21,71	21,71	24,38
	25,04	26,77	24,64	25,57	24,77	24,51	24,24	26,11	24,78	26,24
	24,51	24,38	23,58	23,44	23,98	25,31	25,44	26,91	25,84	26,24
	29,31	29,57	29,31	29,31	30,77	37,70	37,70	37,83	37,56	35,97
	35,30	36,50	37,57	37,96	34,50	33,84	34,90	34,77	33,04	34,63
10000	23,34	20,78	20,38	24,11	21,58	21,44	20,51	21,05	21,58	22,64
	22,78	23,31	20,91	20,24	21,31	25,84	20,78	20,25	19,58	21,44
	22,11	23,44	23,18	25,44	25,31	23,31	20,91	24,11	26,64	23,31
	23,58	21,45	21,85	22,64	26,64	23,98	25,31	23,31	22,24	24,24
	21,18	20,78	21,05	21,45	20,78	20,38	20,11	20,64	20,91	18,91
	18,78	20,51	20,11	19,71	19,85	20,38	19,05	20,91	19,18	21,18
	17,32	18,78	17,32	17,05	17,71	17,45	16,25	18,51	17,45	17,18
	17,05	18,51	16,12	17,58	18,91	17,98	18,25	18,38	17,32	18,65
	25,44	25,31	25,84	23,31	25,31	23,98	24,24	25,71	25,04	24,11
	24,33	25,60	23,53	25,46	23,13	23,18	25,97	24,24	26,11	24,64
15000	20,91	20,24	17,71	21,18	18,51	20,51	19,45	19,85	19,85	20,91
	23,44	17,98	18,78	20,11	20,11	18,65	21,44	18,65	21,58	19,05
	15,72	15,05	16,38	15,32	17,05	15,45	15,72	15,45	15,45	16,25
	15,45	16,92	16,25	15,85	16,12	15,18	15,58	16,38	16,25	15,32
	14,12	14,38	14,65	14,78	14,78	14,52	14,12	13,18	14,38	13,72
	13,45	13,98	13,98	13,58	13,72	13,58	14,25	14,38	14,92	14,25
	15,72	15,98	15,32	14,92	15,45	14,65	15,32	14,38	14,38	14,25
	15,45	15,71	14,38	14,91	15,45	14,91	13,85	15,32	14,65	17,31
	17,31	18,78	17,45	17,45	19,58	17,18	17,98	17,85	17,58	17,31
	17,58	17,71	18,11	17,71	17,71	16,91	17,71	17,71	17,71	17,45

C) Yöntem 2 İle Elde Edilen İpliklere Ait Büküm Açısı Değerleri

Büküm Miktarı (t/m)	Büküm Açısı Değerleri									
5000	14,33	20,55	19,38	9,82	14,20	15,31	20,83	20,94	20,25	16,43
	18,43	23,37	15,34	24,82	22,03	20,85	25,14	22,21	17,44	20,67
	22,71	18,85	17,80	17,97	18,07	22,28	18,77	18,43	17,04	20,72
	19,11	23,96	23,96	27,30	24,86	17,40	19,48	19,53	16,76	18,74
	12,17	11,86	13,24	9,86	16,47	12,70	8,74	9,71	20,55	13,67
	9,26	9,56	14,43	13,04	13,88	10,78	5,31	10,09	7,12	7,87
	22,57	28,02	14,74	22,54	26,00	22,45	24,96	18,43	27,12	28,98
	26,04	28,12	25,67	28,91	27,80	18,08	18,15	23,46	23,52	16,88
	17,35	19,13	17,82	27,80	24,34	30,38	20,36	21,95	24,23	15,42
	16,70	18,60	23,20	21,44	22,25	23,31	21,78	23,84	21,22	22,42
6000	12,91	14,53	15,37	13,40	12,14	12,92	10,30	15,12	10,30	13,73
	16,70	17,88	12,04	10,62	18,78	20,66	11,47	18,71	16,53	10,59
	31,56	27,52	32,23	25,24	33,23	29,88	36,08	20,37	28,70	35,91
	28,36	27,07	29,83	25,60	18,97	25,90	37,45	34,90	27,80	24,52
	18,20	21,12	22,13	20,74	18,03	23,35	20,08	20,92	15,60	18,76
	16,77	15,94	13,84	13,45	18,21	26,56	25,34	22,02	23,96	20,72
	29,74	21,04	23,50	34,11	24,52	28,84	27,09	30,46	30,96	26,03
	27,70	30,07	40,48	38,99	19,48	24,65	25,34	26,88	21,37	27,01
	17,65	12,52	15,52	12,68	14,44	14,49	12,42	18,94	12,13	10,62
	7,69	11,31	10,16	9,18	14,21	7,76	15,71	13,36	23,20	19,40
7000	13,70	12,11	10,90	17,97	17,65	12,99	15,16	11,84	13,05	8,57
	14,31	14,93	12,15	15,16	14,23	18,67	16,88	20,95	14,03	8,69
	8,82	17,60	17,10	7,54	17,76	9,80	9,25	15,57	14,03	8,13
	19,33	13,07	13,24	18,43	16,22	10,20	16,26	9,13	9,60	8,91
	15,68	21,52	16,33	12,99	14,03	18,03	15,25	18,82	16,07	18,00
	25,60	18,06	10,54	20,32	21,80	14,38	15,04	16,86	19,44	11,60
	27,10	22,38	25,82	24,84	15,72	27,76	21,04	18,43	20,90	20,28
	14,19	27,93	27,01	20,81	15,94	25,64	17,35	29,93	36,87	22,71
	20,22	27,22	16,70	22,07	14,04	20,70	20,70	10,05	19,60	21,64
	20,97	22,96	11,62	11,57	13,77	11,60	12,62	18,80	10,89	10,23
10000	38,09	43,53	36,00	18,80	30,17	31,16	27,90	28,12	25,08	17,85
	30,11	24,84	31,47	36,25	30,46	28,52	20,97	30,78	32,20	25,60
	32,34	25,34	29,31	12,94	25,97	32,90	41,63	25,46	23,35	22,67
	25,46	36,87	35,27	40,71	33,27	34,44	30,78	41,99	36,65	29,87
	23,20	23,57	25,20	24,19	25,64	23,50	18,63	19,53	22,48	22,30
	22,16	21,12	20,37	21,52	22,28	20,63	19,98	18,70	21,14	19,40
	25,71	24,34	22,71	26,56	28,44	27,64	26,99	26,95	23,83	23,46
	26,95	27,01	25,34	24,07	24,84	22,75	27,70	23,96	27,21	22,04
	24,78	25,74	30,32	18,77	27,90	29,05	32,27	30,54	27,12	33,18
	28,95	30,07	31,86	30,19	29,87	30,80	31,21	30,76	29,98	25,97
15000	44,40	41,18	34,16	39,64	36,19	45,00	29,60	43,50	40,60	34,28
	33,64	41,53	32,00	45,00	39,80	32,47	40,76	40,08	45,00	41,90
	31,21	36,38	28,07	32,85	27,18	31,47	32,38	25,14	28,97	31,26
	31,18	36,63	34,04	26,56	37,18	37,69	33,03	31,37	30,37	29,19
	21,19	34,87	25,30	36,70	32,35	33,69	36,25	30,34	34,56	39,89
	26,56	24,96	27,09	24,44	30,58	27,37	30,07	27,95	45,00	23,75
	20,28	28,81	20,55	31,09	22,01	28,70	24,34	25,34	28,76	22,83
	23,96	29,29	27,59	30,17	32,66	26,07	28,39	39,66	33,02	24,34
	36,02	35,53	39,40	30,57	36,32	38,99	29,57	41,82	40,48	33,96
	31,43	31,66	30,17	26,56	27,09	31,86	33,38	37,11	28,44	31,13

EK 3: İPLİK ÇAPI VE BÜKÜM AÇISI DEĞERLERİNİN ANOVA TESTİ SONUÇLARI

A) Yöntem 1 İle Üretilen İplikler için Büküm Miktarının, Büküm Açısına Etkisinin ANOVA Yöntemi İle Analizi

ANOVA

Aci

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1617,511	3	539,170	23,876	,000
Within Groups	4426,008	196	22,582		
Total	6043,520	199			

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Aci

Tukey HSD

(I) Bukum	(J) Bukum	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
5000	10000	-5,79800*	,95040	,000	-8,2607	-3,3353
	15000	-7,46800*	,95040	,000	-9,9307	-5,0053
	20000	-5,89380*	,95040	,000	-8,3565	-3,4311
10000	5000	5,79800*	,95040	,000	3,3353	8,2607
	15000	-1,67000	,95040	,297	-4,1327	,7927
	20000	-,09580	,95040	1,000	-2,5585	2,3669
15000	5000	7,46800*	,95040	,000	5,0053	9,9307
	10000	1,67000	,95040	,297	-,7927	4,1327
	20000	1,57420	,95040	,350	-,8885	4,0369
20000	5000	5,89380*	,95040	,000	3,4311	8,3565
	10000	,09580	,95040	1,000	-2,3669	2,5585
	15000	-1,57420	,95040	,350	-4,0369	,8885

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

B) Yöntem 1 İle Üretilen İplikler için Büküm Miktarının, İplik Çapına Etkisinin ANOVA Yöntemi İle Analizi

ANOVA

Cap					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	12016,915	3	4005,638	152,161	,000
Within Groups	5159,699	196	26,325		
Total	17176,614	199			

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Cap

Tukey HSD

(I) Bukum	(J) Bukum	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
5000	10000	15,07440*	1,02616	,000	12,4154	17,7334
	15000	15,52120*	1,02616	,000	12,8622	18,1802
	20000	20,79560*	1,02616	,000	18,1366	23,4546
10000	5000	-15,07440*	1,02616	,000	-17,7334	-12,4154
	15000	,44680	1,02616	,972	-2,2122	3,1058
	20000	5,72120*	1,02616	,000	3,0622	8,3802
15000	5000	-15,52120*	1,02616	,000	-18,1802	-12,8622
	10000	-,44680	1,02616	,972	-3,1058	2,2122
	20000	5,27440*	1,02616	,000	2,6154	7,9334
20000	5000	-20,79560*	1,02616	,000	-23,4546	-18,1366
	10000	-5,72120*	1,02616	,000	-8,3802	-3,0622
	15000	-5,27440*	1,02616	,000	-7,9334	-2,6154

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

C) Yöntem 2 İle Üretilen İplikler için Büküm Miktarının, İplik Çapına Etkisinin Analizi

ANOVA

Cap

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	18620,626	4	4655,157	92,512	,000
Within Groups	24908,093	495	50,319		
Total	43528,719	499			

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Cap

Tukey HSD

(I) Bukum	(J) Bukum	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
5000	6000	6,15330*	1,00319	,000	3,4067	8,8999
	7000	6,27510*	1,00319	,000	3,5285	9,0217
	10000	12,71160*	1,00319	,000	9,9650	15,4582
	15000	17,76250*	1,00319	,000	15,0159	20,5091
6000	5000	-6,15330*	1,00319	,000	-8,8999	-3,4067
	7000	,12180	1,00319	1,000	-2,6248	2,8684
	10000	6,55830*	1,00319	,000	3,8117	9,3049
	15000	11,60920*	1,00319	,000	8,8626	14,3558
7000	5000	-6,27510*	1,00319	,000	-9,0217	-3,5285
	6000	-,12180	1,00319	1,000	-2,8684	2,6248
	10000	6,43650*	1,00319	,000	3,6899	9,1831
	15000	11,48740*	1,00319	,000	8,7408	14,2340
10000	5000	-12,71160*	1,00319	,000	-15,4582	-9,9650
	6000	-6,55830*	1,00319	,000	-9,3049	-3,8117
	7000	-6,43650*	1,00319	,000	-9,1831	-3,6899
	15000	5,05090*	1,00319	,000	2,3043	7,7975
15000	5000	-17,76250*	1,00319	,000	-20,5091	-15,0159
	6000	-11,60920*	1,00319	,000	-14,3558	-8,8626
	7000	-11,48740*	1,00319	,000	-14,2340	-8,7408
	10000	-5,05090*	1,00319	,000	-7,7975	-2,3043

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

D) Yöntem 2 İle Üretilen İplikler için Büküm Miktarının, Büküm Açısına Etkisinin Analizi

ANOVA

Aci

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	16345,320	4	4086,330	106,409	,000
Within Groups	19008,986	495	38,402		
Total	35354,306	499			

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Aci

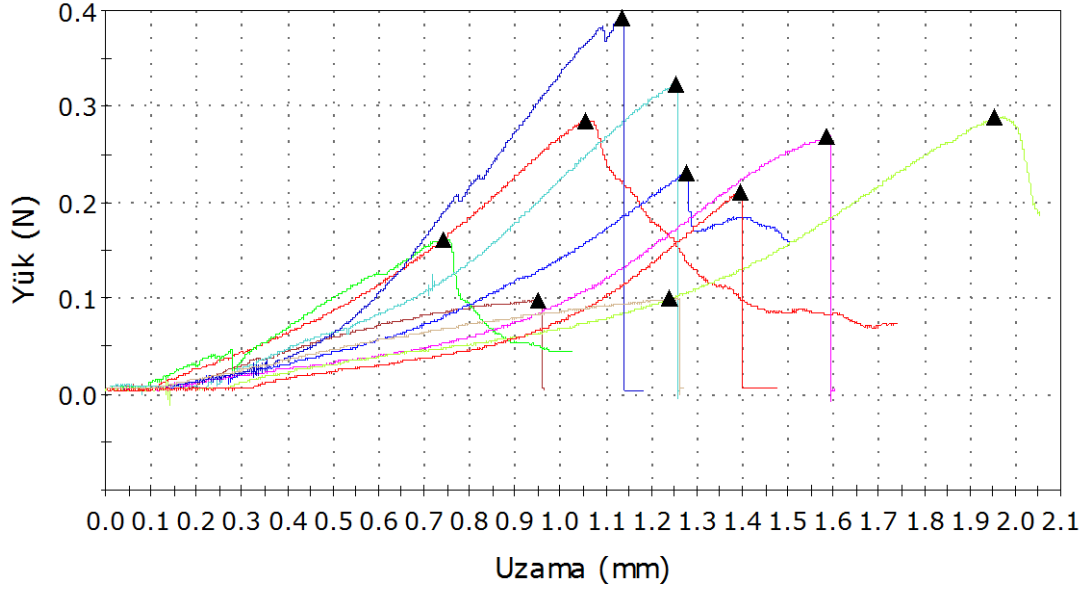
Tukey HSD

(I) Bukum	(J) Bukum	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
5000	6000	-1,70840	,87638	,293	-4,1078	,6910
	7000	2,37460	,87638	,054	-,0248	4,7740
	10000	-8,06120*	,87638	,000	-10,4606	-5,6618
	15000	-13,22770*	,87638	,000	-15,6271	-10,8283
6000	5000	1,70840	,87638	,293	-,6910	4,1078
	7000	4,08300*	,87638	,000	1,6836	6,4824
	10000	-6,35280*	,87638	,000	-8,7522	-3,9534
	15000	-11,51930*	,87638	,000	-13,9187	-9,1199
7000	5000	-2,37460	,87638	,054	-4,7740	,0248
	6000	-4,08300*	,87638	,000	-6,4824	-1,6836
	10000	-10,43580*	,87638	,000	-12,8352	-8,0364
	15000	-15,60230*	,87638	,000	-18,0017	-13,2029
10000	5000	8,06120*	,87638	,000	5,6618	10,4606
	6000	6,35280*	,87638	,000	3,9534	8,7522
	7000	10,43580*	,87638	,000	8,0364	12,8352
	15000	-5,16650*	,87638	,000	-7,5659	-2,7671
15000	5000	13,22770*	,87638	,000	10,8283	15,6271
	6000	11,51930*	,87638	,000	9,1199	13,9187
	7000	15,60230*	,87638	,000	13,2029	18,0017
	10000	5,16650*	,87638	,000	2,7671	7,5659

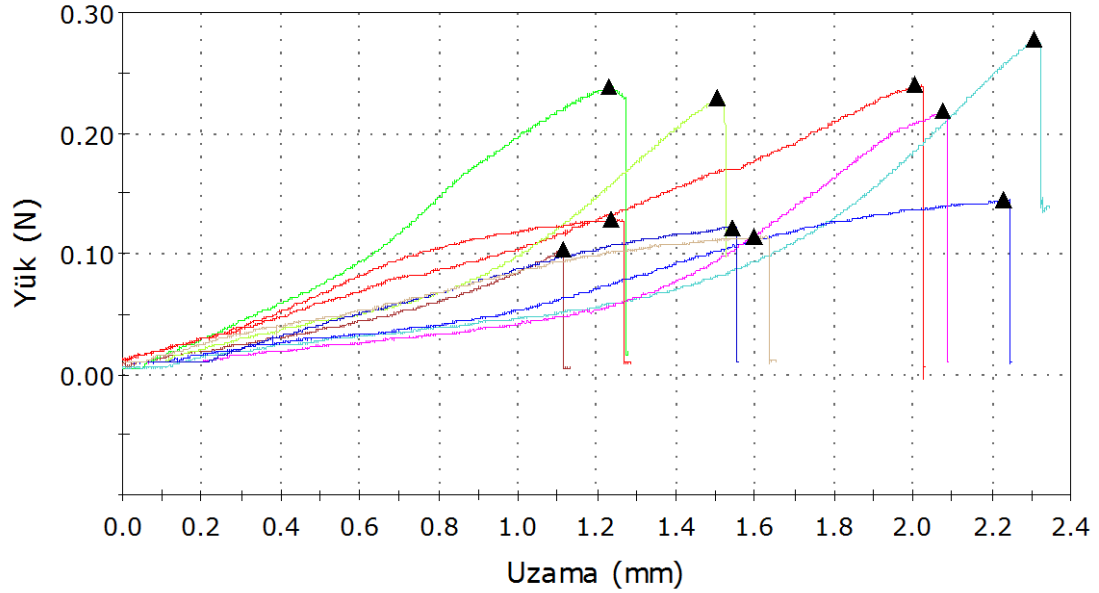
*, The mean difference is significant at the 0.05 level.

EK 4: YÖNTEM 1 İLE EĞRİLEN İPLİKLERE AİT MUKAVEMET ANALİZİ SONUÇLARI

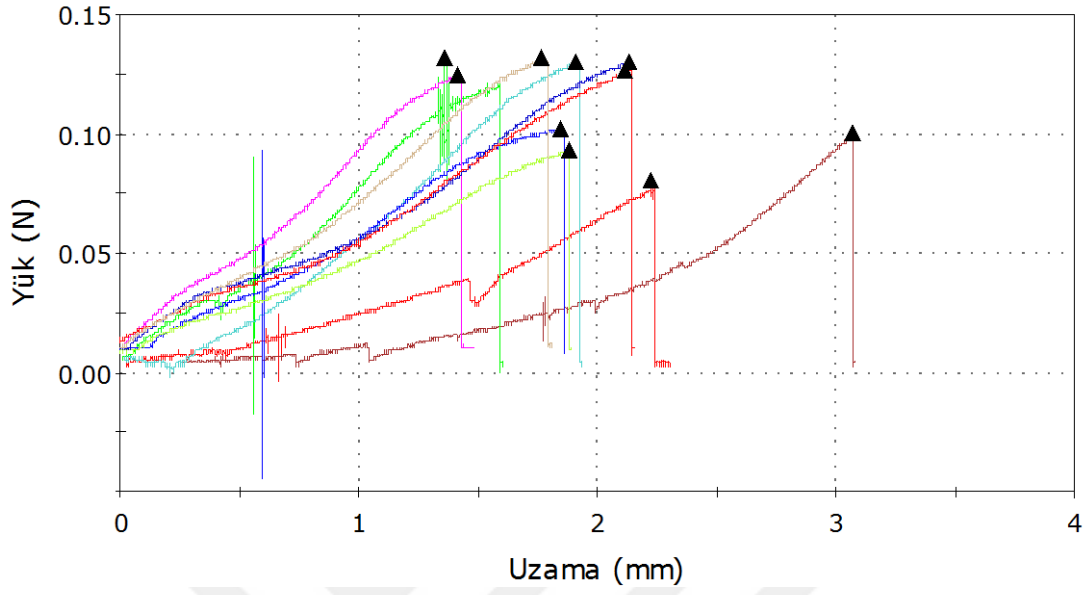
A) 5000 t/m Teorik Büküme Sahip İpliklerin Kuvvet-Uzama Grafikleri



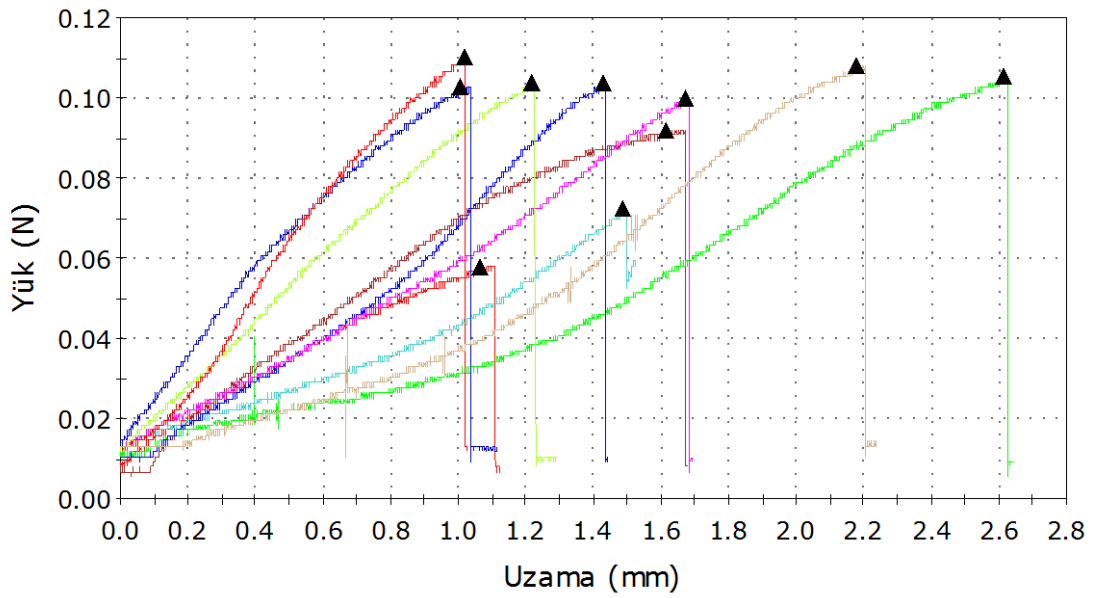
B) 10000 t/m Teorik Büküme Sahip İpliklerin Kuvvet-Uzama Grafikleri



C) 15000 t/m Teorik Büküme Sahip İpliklerin Kuvvet-Uzama Grafikleri



D) 20000 t/m Teorik Büküme Sahip İpliklerin Kuvvet-Uzama Grafikleri



E) Kopma Mukavemeti ve % Uzama Değerleri

	Kopma Mukavemeti (MPa)			
Numune	5000 t/m	10000 t/m	15000 t/m	20000 t/m
1	206,91	425,37	146,55	165,16
2	71,48	183,59	182,74	262,84
3	117,31	420,69	240,43	300,37
4	234,62	490,49	237,91	206,58
5	167,83	255,65	187,40	296,72
6	194,55	385,88	228,41	285,53
7	209,82	404,43	170,74	296,72
8	285,14	216,16	237,91	292,81
9	153,55	227,76	230,75	315,47
10	72,48	202,12	240,43	307,91
ort	171,37	321,21	210,33	273,01
SS	69,31	114,36	34,96	48,98
%CV	40,44	35,60	16,62	17,94

	Maksimum Yükte Uzama (%)			
Numune	5000 t/m	10000 t/m	15000 t/m	20000 t/m
1	10,56	20,04	22,24	10,63
2	9,53	11,14	30,69	16,15
3	7,43	12,33	13,63	26,16
4	12,56	23,08	19,07	14,89
5	12,78	22,30	18,49	14,26
6	15,86	20,75	14,15	16,70
7	19,53	15,05	18,79	12,19
8	11,34	15,46	21,32	10,09
9	13,96	12,38	21,14	10,20
10	12,37	15,99	17,70	21,76
ort	12,59	16,85	19,72	15,30
SS	3,38	4,38	4,79	5,25
%CV	26,81	26,02	24,28	34,33

F) Yöntem 1 ile Eğrilen KNT İpliklerin Maksimum Yük Ortalamalarının ANOVA Testi

ANOVA

MaksimumYük

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	132127,714	3	44042,571	8,193	,000
Within Groups	193520,067	36	5375,557		
Total	325647,782	39			

Multiple Comparisons

Dependent Variable: MaksimumYük

Tukey HSD

(I) Bukum	(J) Bukum	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
5000	10000	-149,84500*	32,78889	,000	-238,1529	-61,5371
	15000	-38,95800	32,78889	,638	-127,2659	49,3499
	20000	-101,64200*	32,78889	,019	-189,9499	-13,3341
10000	5000	149,84500*	32,78889	,000	61,5371	238,1529
	15000	110,88700*	32,78889	,009	22,5791	199,1949
	20000	48,20300	32,78889	,466	-40,1049	136,5109
15000	5000	38,95800	32,78889	,638	-49,3499	127,2659
	10000	-110,88700*	32,78889	,009	-199,1949	-22,5791
	20000	-62,68400	32,78889	,241	-150,9919	25,6239
20000	5000	101,64200*	32,78889	,019	13,3341	189,9499
	10000	-48,20300	32,78889	,466	-136,5109	40,1049
	15000	62,68400	32,78889	,241	-25,6239	150,9919

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

G) Yöntem 1 ile Eğrilen KNT İpliklerin % Uzama Ortalamalarının ANOVA Testi

ANOVA

UzamaYuzdesi

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	266,245	3	88,748	4,378	,010
Within Groups	729,820	36	20,273		
Total	996,064	39			

Multiple Comparisons

Dependent Variable: UzamaYuzdesi

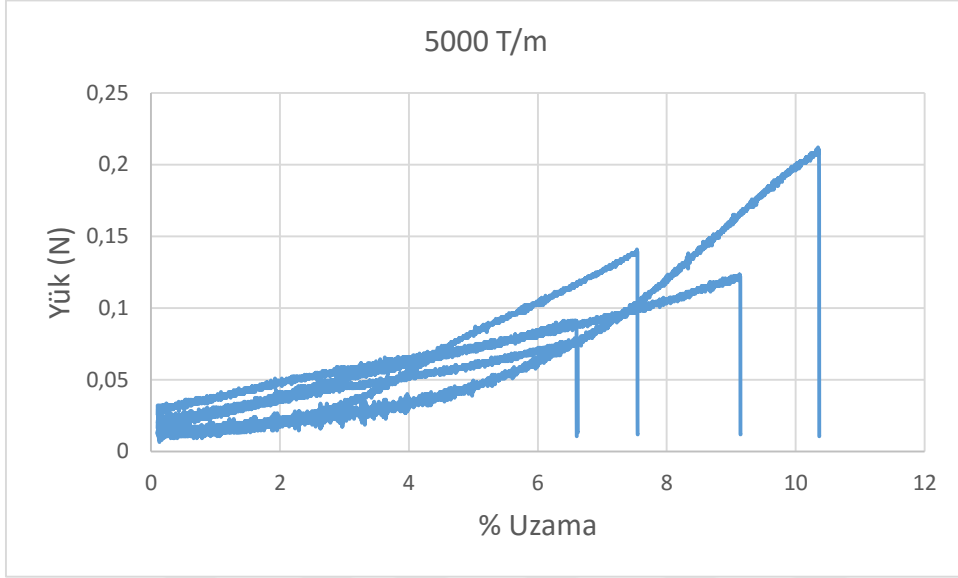
Tukey HSD

(I) Bukum	(J) Bukum	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
5000	10000	-4,26000	2,01359	,168	-9,6831	1,1631
	15000	-7,13000*	2,01359	,006	-12,5531	-1,7069
	20000	-2,71100	2,01359	,540	-8,1341	2,7121
10000	5000	4,26000	2,01359	,168	-1,1631	9,6831
	15000	-2,87000	2,01359	,492	-8,2931	2,5531
	20000	1,54900	2,01359	,868	-3,8741	6,9721
15000	5000	7,13000*	2,01359	,006	1,7069	12,5531
	10000	2,87000	2,01359	,492	-2,5531	8,2931
	20000	4,41900	2,01359	,144	-1,0041	9,8421
20000	5000	2,71100	2,01359	,540	-2,7121	8,1341
	10000	-1,54900	2,01359	,868	-6,9721	3,8741
	15000	-4,41900	2,01359	,144	-9,8421	1,0041

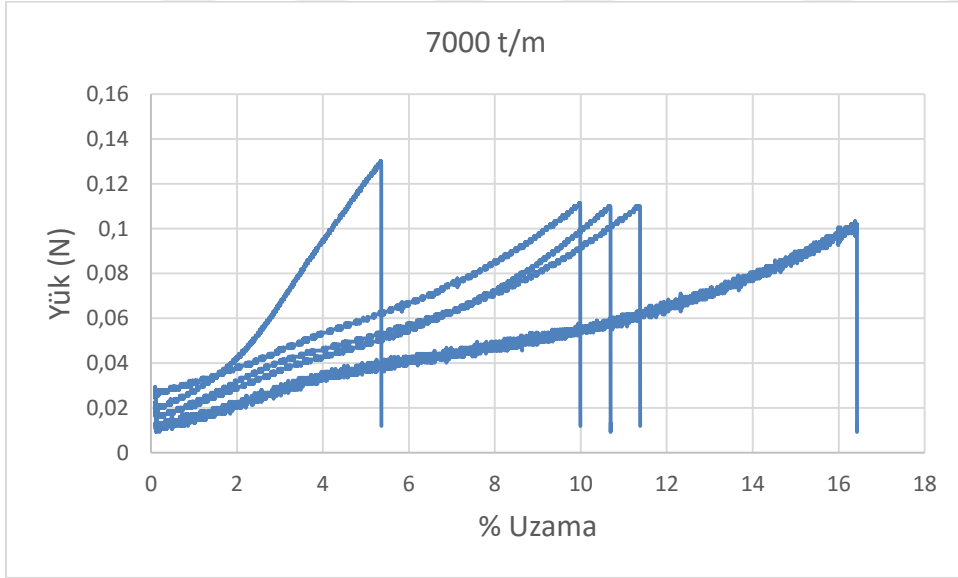
*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

EK 5: YÖNTEM 2 İLE EĞRİLEN İPLİKLERE AİT MUKAVEMET TESTİ SONUÇLARI

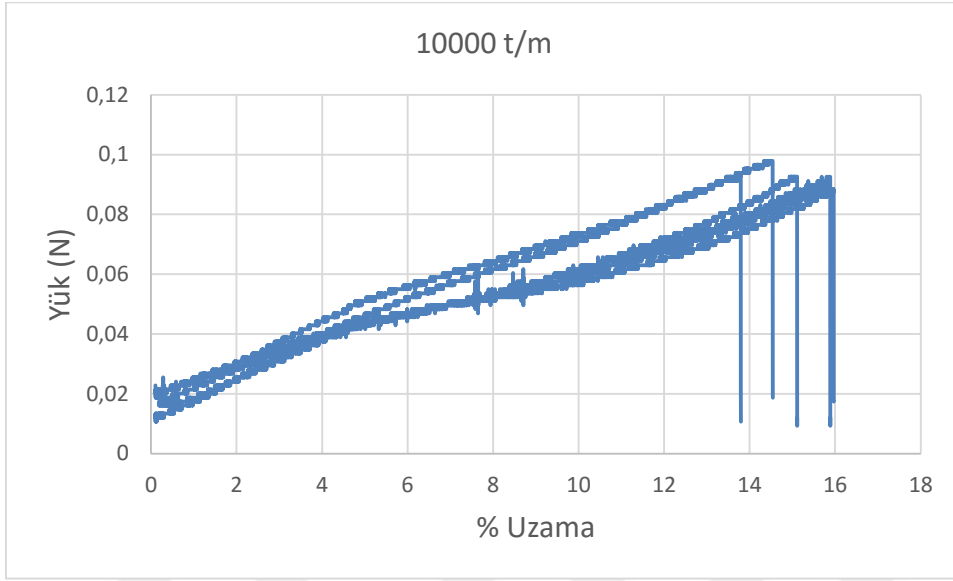
A) 5000 t/m Teorik Büküme Sahip İpliklerin Kuvvet-Uzama Grafikleri



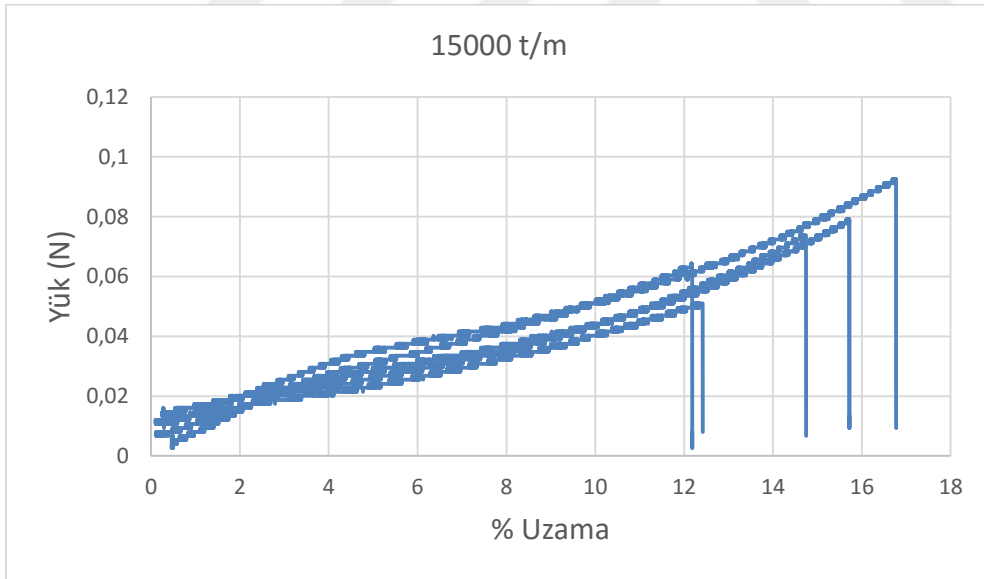
B) 7000 t/m Teorik Büküme Sahip İpliklerin Kuvvet-Uzama Grafikleri



C) 10000 t/m Teorik Büküme Sahip İpliklerin Kuvvet-Uzama Grafikleri



D) 15000 t/m Teorik Büküme Sahip İpliklerin Kuvvet-Uzama Grafikleri



E) Yöntem 2 İle Eğrilen İpliklerde % Kopma Uzama Değerleri

% Uzama	5000 t/m	7000 t/m	10000 t/m	15000 t/m
1. ölçüm	6,60	16,43	13,79	12,17
2. ölçüm	9,13	5,35	15,11	14,74
3. ölçüm	6,61	11,38	15,88	12,42
4. ölçüm	7,54	10,69	15,96	16,77
5. ölçüm	10,35	9,98	14,54	15,72
Ortalama	8,05	10,76	15,06	14,36
Stn. Sapma	1,65	3,95	0,92	2,02
%CV	20,49	36,68	6,10	14,08

E) Yöntem 2 İle Eğrilen İpliklerde Kopma Mukavemeti (MPa) Değerleri

Kopma Mukavemeti (MPa)	5000 t/m	7000 t/m	10000 t/m	15000 t/m
1. ölçüm	96,76	162,01	247,80	293,47
2. ölçüm	130,92	206,80	247,80	336,31
3. ölçüm	82,54	174,71	247,80	232,41
4. ölçüm	149,49	174,71	236,83	421,98
5. ölçüm	224,93	176,94	261,98	360,46
Ortalama (MPa)	136,93	179,03	248,44	328,92
Stn. Sapma	55,92	16,60	8,94	71,20
%CV	40,84	9,27	3,60	21,65

EK 6: ELEKTRİKSEL DİRNC ÖLÇÜMLERİ VE SONUÇLARIN ANALİZİ**A) Yöntem 1 İle Eğrilen İpliklere Ait Direnç Sonuçları**

	5000 t/m	10000 t/m	15000 t/m	20000 t/m
1	0,97	1,046	1,554	1,138
2	0,934	1,05	1,538	1,142
3	0,958	1,166	1,386	1,292
4	1,068	1,164	1,378	1,306
5	0,994	0,988	1,344	1,11
6	1,106	1,018	1,334	1,124
7	1,11	0,83	1,77	1,126
8	0,94	0,86	1,778	1,14
9	0,982	1	1,464	1,184
10	1,084	1,024	1,45	1,224
Ortalama (kΩ)	1,01	1,01	1,50	1,18
Stn. Sapma	0,07	0,11	0,16	0,07
%CV	6,88	10,72	10,85	6,07

B) Yöntem 1 İle Eğrilen İpliklere Ait Direnç Ortalamalarının ANOVA Testi**ANOVA**

Direnc

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1,568	3	,523	43,304	,000
Within Groups	,435	36	,012		
Total	2,003	39			

Dependent Variable: Direnc

Multiple Comparisons

Tukey HSD

(I) Bukum	(J) Bukum	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
5000	10000	,00000	,04914	1,000	-,1323	,1323
	15000	-,48500*	,04914	,000	-,6173	-,3527
	20000	-,16400*	,04914	,010	-,2963	-,0317
10000	5000	,00000	,04914	1,000	-,1323	,1323
	15000	-,48500*	,04914	,000	-,6173	-,3527
	20000	-,16400*	,04914	,010	-,2963	-,0317
15000	5000	,48500*	,04914	,000	,3527	,6173
	10000	,48500*	,04914	,000	,3527	,6173
	20000	,32100*	,04914	,000	,1887	,4533
20000	5000	,16400*	,04914	,010	,0317	,2963
	10000	,16400*	,04914	,010	,0317	,2963
	15000	-,32100*	,04914	,000	-,4533	-,1887

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

C) Yöntem 2 İle Eğrilen İpliklere Ait Direnç Sonuçları

	5000 t/m	6000 t/m	7000 t/m	10000 t/m	15000 t/m
1	0,81	1,06	0,96	1,51	1,08
2	0,86	1,03	0,93	0,95	1,22
3	1,1	0,94	1,13	1,53	1,14
4	1,01	1,07	0,95	0,94	1,13
5	0,94	0,9	1,06	1,56	1,51
6	1,13	1,09	1,06	1,1	1,14
7	1,36	0,87	1,1	1,01	1,29
8	0,92	0,86	1,04	1,19	1,22
9	0,84	0,92	1,21	1,16	1,36
10	0,92	1,01	0,99	1,25	1,37
Ortalama (kΩ)	0,99	0,98	1,04	1,22	1,25
Stn. Sapma	0,17	0,09	0,09	0,24	0,14
%CV	16,96	8,91	8,48	19,53	10,86

D) Yöntem 2 İle Eğrilen İpliklere Ait Direnç Ortalamalarının ANOVA Testi

ANOVA

Direnc

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	,668	4	,167	7,038	,000
Within Groups	1,067	45	,024		
Total	1,735	49			

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Direnc

Tukey HSD

(I) Bukum	(J) Bukum	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
5000	6000	,01400	,06887	1,000	-,1817	,2097
	7000	-,05400	,06887	,934	-,2497	,1417
	10000	-,23100*	,06887	,013	-,4267	-,0353
	15000	-,25700*	,06887	,005	-,4527	-,0613
6000	5000	-,01400	,06887	1,000	-,2097	,1817
	7000	-,06800	,06887	,860	-,2637	,1277
	10000	-,24500*	,06887	,008	-,4407	-,0493
	15000	-,27100*	,06887	,003	-,4667	-,0753
7000	5000	,05400	,06887	,934	-,1417	,2497
	6000	,06800	,06887	,860	-,1277	,2637
	10000	-,17700	,06887	,093	-,3727	,0187
	15000	-,20300*	,06887	,039	-,3987	-,0073
10000	5000	,23100*	,06887	,013	,0353	,4267
	6000	,24500*	,06887	,008	,0493	,4407
	7000	,17700	,06887	,093	-,0187	,3727
	15000	-,02600	,06887	,996	-,2217	,1697
15000	5000	,25700*	,06887	,005	,0613	,4527
	6000	,27100*	,06887	,003	,0753	,4667
	7000	,20300*	,06887	,039	,0073	,3987
	10000	,02600	,06887	,996	-,1697	,2217

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Üsküdar’da doğdu. İlköğrenimini İstanbul Pendik Merkez İlköğretim Okulu ve Pendik Ahmet Kutsi Tecer İlköğretim Okulu’nda, orta öğrenimini Kadıköy Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2010 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Tekstil Mühendisliği Bölümü’nden Tekstil Mühendisi unvanı ile mezun oldu. Aynı yıl Ankara’da başladığı vatani görevini 2011 yılında bitirdi. 2012 yılında okul arkadaşı ve meslektaşı Saliha Sayha AZMAN ile evlendi. 2013 yılında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladığı Namık Kemal Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü’nde görevine ve lisansüstü eğitimine devam etmektedir.

