



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ KARBON
ELYAF/EPOKSİ NANOKOMPOZİT
MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE DELME
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

Halil Burak KAYBAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2015
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Halil Burak KAYBAL tarafından hazırlanan “Karbon Nanotüp Takviyeli Karbon Elyaf/Epoksi Nanokompozit Malzemelerin Üretilmesi Ve Delme Parametrelerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 27/01/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU

Danışman

Prof. Dr. Ahmet AVCI

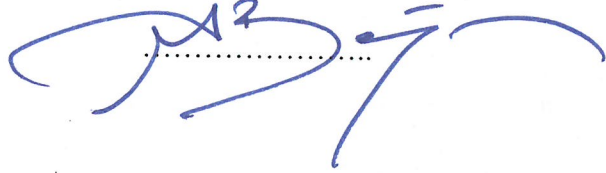
Üye

Yrd. Doç. Dr. Mehmet BAĞCI

İmza







Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Aşır GENÇ
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Halil Burak KAYBAL

Tarih: 27/01.2015

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ KARBON ELYAF/EPOKSİ NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE DELME PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Halil Burak KAYBAL

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof.Dr. Ahmet AVCI

2015, 83 Sayfa

Jüri

**Jüri: Doç. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Yrd. Doç. Dr. Mehmet BAĞCI**

Kompozit malzemeler uzay, havacılık, taşımacılık ve inşaat gibi birçok alanda üstün özelliklerinden dolayı önem arz etmektedir. Delme işlemi kompozit malzemelerin montajında en önemli son işleme prosesi olarak kullanılmakta ve savunma, havacılık ve otomobil endüstrilerinde oldukça yaygındır. Bu çalışma, karbon elyaf kompozit malzemelerin delme performansı ve delik kalitesini belirlemek için farklı kesme parametrelerinde, kaplamasız sinterlenmiş karbür uç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Delme işlemi 50 m/dk, 67 m/dk ve 90 m/dk kesme hızlarında ve 0.005 mm/dev, 0.05 mm/dev, 0.1 mm/dev, 0.2 mm/dev ve 0.4 mm/dev ilerleme oranlarında yapılan kuru delme deneyinde, iş parçası olarak saf ve nanopartikül katkılı nanokompozit malzeme kullanılmıştır. Kesme parametreleri itme kuvveti, deformasyon faktörü ve yüzey pürüzlülüğü ile ilişkilendirilmiştir. Nanopartikül katkılı kompozit malzemelerde deformasyon faktörü ve yüzey pürüzlülüğü açısından daha iyi sonuçlar alınmıştır. Ayrıca delik yüzeyleri Elektron Taramalı Mikroskop ile görüntülenmiş ve yüzey morfolojileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: CNT, Deformasyon Faktörü, Delme İşlemi, İtme Kuvveti, Nanokompozit, Nanopartikül, Yüzey Pürüzlülüğü

ABSTRACT

MS THESIS

PRODUCTION OF CNT ADDED CARBON FIBER REINFORCED EPOXY NANOCOMPOSITES AND EXAMINATION OF DRILLING PARAMETERS

Halil Burak KAYBAL

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof.Dr. Ahmet AVCI

2015, 83 Pages

**Jury
Assoc. Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Assis. Prof. Dr. Mehmet BAĞCI**

Composite materials are attractive for many applications (such as aerospace and aircraft structural components, transporting and structure areas) due to their superior properties. Mechanical drilling operation is an important final machining process for components made of composite materials. The drilling process has generally been used in defending, aeronautic and automotive industry. In this study, drilling performance and hole quality were investigated in drilling cutting parameters which contains cutting speed and feed rate by using uncoated cemented carbide drill bit on the machining of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites. The drilling process was performed in 50, 57, 90 m/min cutting speeds, and 0.005, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4 mm/rev feed rates. The pure and nanoparticles added nanocomposite materials were used as work piece material in the experiments. Effect of cutting parameters are associated thrust force, deformation factor and surface roughness. The results taken from view of deformation factor and surface roughness by nanoparticles added nanocomposite materials were higher efficient. In addition, the photographs of hole surfaces were taken under the Scanning Electron Microscope (SEM) and surface morphology were examined on these photographs.

Keywords: CNT, Deformation Factor, Drilling, Nanocomposite, Nanoparticle, Surface Roughness, Thrust Force

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde beni yönlendiren, bilimsel katkılarını ve tecrübelerini esirgemeyen, tez çalışmalarım boyunca bilgi ve desteğini hep yanımda bulduğum değerli danışman hocalarım Prof. Dr. Ahmet AVCI 'ya ve Prof. Dr. Ali ÜNÜVAR 'a en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca fikirleriyle katkıda bulunan değerli hocam Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR 'e, deneylerimde bana yardımcı olan Arş. Gör. Dr. Murat KOYUNBAKAN 'a, Arş.Gör. Okan DEMİR 'e, Arş. Gör. Sezer PIÇAK 'a, Arş. Gör. Osman ÖZTÜRK 'e, Makina Mühendisi Tugay ÜSTÜN 'e, Kimya Mühendisi Gülşen KAYBAL 'a teşekkür ederim.

Son olarak bugünlere gelmemde gösterdikleri anlayış, sabır ve desteklerinden dolayı hiç şüphesiz ki en büyük emeği olan annem Nuriye KAYBAL 'a, babam İhsan KAYBAL 'a ve kardeşim A.Kübra KAYBAL 'a, ayrıca tüm sevdiklerime canı gönülden teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Halil Burak KAYBAL
KONYA-2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1. Nanoteknoloji.....	7
2.1.1. Nanoteknoloji Çalışmalarından Beklentiler.....	8
2.1.2. Nanoteknolojinin Avantajları	9
2.1.3. Nanoteknolojiyi Uygulama Yöntemleri.....	9
2.2. Kompozit Malzemeler	10
2.2.1. Takviyeler ve Dolgu Malzemeleri	11
2.2.2. Polimer Reçineler	14
2.2.3. Kürleştiriciler	16
2.2.4. Fiberler.....	17
2.2.5. Polimerik Nanokompozit Malzemeler.....	20
2.2.6. Karbon Nanotüpler (CNT).....	21
2.3. Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Kompozit Malzeme Üretimi	23
2.3.1. Vakum İnfüzyon Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	25
2.4. İşlenebilirlik	26
2.5. Delik Delme İşlemi	30
2.5.1. Delme İşlemlerinin Kesme Değerleri	32
2.5.2. Delme İşleminde Kesme Kuvvetleri ve Moment Oluşumu.....	33
2.5.3. Kompozit Malzemelerin Delme İşlemi.....	36
2.6. Yüzey Pürüzlülüğü	36
2.6.1. Yüzey Pürüzlülüğünü Etkileyen Faktörler	37
2.6.2. Yüzey Pürüzlülük Parametreleri	38
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	40
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Temini	40
3.2. Numunelerin Hazırlanması	40
3.2.1. Karbon Nanotüpün Polimer İçerisine Dağıtılması.....	40
3.3. Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Kompozitlerin Üretimi	41
3.4. Delik Delme Süreci.....	44
3.5. Deformasyon Oluşumu ve Deformasyon Faktörü Hesabı	46
3.6. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi	48
3.7. Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntü Analizleri (SEM)	49

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	51
4.1. Kesme Parametrelerinin İtme kuvveti Üzerindeki Etkisi	51
4.2. Kesme Parametrelerinin Deformasyon Üzerindeki Etkisi.....	57
4.3. Kesme Parametrelerinin İş Parçası İşleme Hızına Etkisi.....	62
4.4. Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisi.....	64
4.4.1. Kesme Hızının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	65
4.4.2. İlerleme Oranının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.....	66
4.5. SEM Görüntü Analizleri.....	68
4.5.1. Karbon Elyaf/Epoksi Kompozit Malzeme.....	68
4.5.2. CNT + Karbon Elyaf/Epoksi Nanokompozit Malzeme.....	70
4.6. Takım Ucunun İncelenmesi	71
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	73
5.1 Sonuçlar	73
5.2 Öneriler	75
KAYNAKLAR	76

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

D	:	mm	Takım çapı
D_{maks}	:	mm	Deformasyonun maksimum çapı
f	:	mm/dev	İlerleme oranı
F_d	:	-	Deformasyon faktörü
F_s	:	N	Kesme Kuvveti
F_z	:	N	İlerleme Kuvveti
K_r	:	-	Yanaşma açısı
K_s	:	Pa	Kesme basıncı
n	:	dev	Fener ilerleme hızı
P_c	:	W	Kesme gücü
Ra	:	μm	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
Rz	:	μm	Ortalama pürüz yüksekliği
V	:	m/dk	Kesme hızı
V_c	:	m/dk	Kesme hızı
V_f	:	mm/dk	İlerleme hızı

Kısaltmalar

CNT	:	Carbon Nano Tube
FTP	:	Fiber takviyeli polimer
HSS	:	High Speed Steel
İHH	:	İş parçası işleme hızı
K10	:	Sinterlenmiş karbür
PAN	:	Poliakrilinitril
RSM	:	Cevap Yüzey Metodu
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskopu
VARTM	:	Vakum infüzyon yöntemi

1. GİRİŞ

Son dönemlerde, nanoparçacık katkılı kompozitlerin geliştirilmek istenmesi ve kullanımının artmasıyla, malzeme alanında yeni ve ilgi çekici bir konu haline gelmiştir. Nanoparçacıklar, elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılabilecek en uygun katkı malzemeleri olarak görülmektedir. Buna ilave olarak, nanoparçacıkların çeşitlerine ve uygulama alanlarına bağlı olarak üretilen elyaf takviyeli nanokompozit malzemelerin elektriksel ve ısı özellikleride iyileştirilebilir.

Günümüzde kompozit malzemeler özellikle uzay ve havacılık, savunma, otomotiv ve gemi endüstrileri gibi oldukça geniş uygulama alanlarına sahiptirler. Bu bahsi geçen endüstri alanlarında ise genellikle elyaf takviyeli polimer kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Bu tür malzemeler genel olarak son şekli verilmiş olarak üretilmelerine rağmen yine de temel işleme operasyonlarında ihtiyaç duyulabilir. Temel işleme operasyonlarından en çok tercih edileni ise delme işlemidir. Çünkü elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin endüstriyel uygulamalarında perçinli ve civatalı birleştirmeler yoğun olarak kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalarda sadece basit bir uçak gövdesinde yüzbinin üzerinde delik olduğu belirtilmektedir. Elyaf takviyeli polimer kompozitlerin delinmesinde delik hasarları gözlemlenmekte ve çoğu zaman delik kalitesi bozulmakta ve malzemenin ıskartaya ayrılması durumları da söz konusu olmaktadır. Kompozit malzemelerin delinmesi sırasında oluşan yüzey hasarları, itme kuvvetleri ve delaminasyon malzemenin kalitesi üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Bu durumu engellemek ve en düşük seviyede tutmak için kesme parametrelerine, takım geometrisine ve kesme kuvvetlerine bağlı olarak sürekli çalışmalar yapılmaktadır.

Gaitonde ve ark. (2008), karbon fiberlerin yüksek hızda delinmesi sırasında oluşan delaminasyona etki eden parametrelerin etkisini araştırmışlardır. Araştırmalarında, giriş yüzeyleri üzerindeki delaminasyon faktörlerini ve buna etkisi olan kesme hızı, ilerleme hızı ve uç açısı gibi parametreleri kullanmışlardır. Herbir işlem parametresi için takım ucu olarak sinterlenmiş karbür (K20) twist (Helisel) matkap ucu kullanmışlardır. Delaminasyon faktörleri ve parametrelerin etkisi matematiksel bir model üzerinde değerlendirilip ayrıca deneysel yöntemle göre kıyaslamışlardır. Araştırmalar delaminasyon eğiliminin kesme hızının artması ile

azaldığını ortaya çıkarmıştır. Ayrıca çalışmada daha düşük ilerleme ve uç açısı kombinasyonu hasarın azalması için önerilmiştir.

Davim ve ark. (2003), kompozit levhaların delinmesinde, kesme kuvvetleri altındaki malzemenin delaminasyon eğilimini önemli bir şekilde etkilediğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında, karbon fiberlerde kesme parametrelerini (kesme hızı ve ilerleme hızı), gücü (P_c), spesifik kesme basıncını (K_s) ve delaminasyonu incelemişlerdir. Taguchi metodu ile deneysel planlar oluşturulup, matkap ucu olarakta sinterlenmiş karbür (K_{10}) uç kullanılmışlardır. Deneyler sonunda kesme hızı , ilerleme hızı, güç (P_c), özgül kesme basıncı (K_s) ve delaminasyon faktörü (F_d) arasındaki ilişkiler kurmuşlardır.

İşbilir ve ark. (2013), çalışmalarında, karbon fiber kompozit malzemeler in delinmesinde üç boyutlu sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Oluşturulan bu model, tabaka içi delaminasyon başlangıcını ve delaminasyon büyümesini de kapsamaktadır. Farklı kademe oranlarına sahip kademeli matkap ve helisel matkap ucu arasında kıyaslama yapmak için geliştirilmiş model ve gerçek takım ucu geometrisini kullanmışlardır. Yüksek kademe oranlı step (kademeli) matkap ucu kullanıldığında itme kuvveti ve tork azaldığını görmüşlerdir. Çalışmalarında, delaminasyonun ve numunedeki kusurların takım geometrisi ile kontrol altına alınabileceğini göstermişlerdir. Sonuç olarak üç boyutlu sonlu elemanlar modelinin, karbon fiberlerin delinmesi sırasında oluşan delaminasyonun minimize edilmesi için bir tasarım aracı olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Rahman ve ark. (1999), karbon elyaf kompozitlerin işlenebilirliği için uygun bir teknik geliştirmek istemişlerdir. Karbon elyaf kompozitlerin işlenmesinde; kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği işlenebilirlik parametrelerini; kaplanmamış tungsten karbür, seramik ve kübik bor nitrür olmak üzere üç farklı kesme takımı ve malzeme olarakta kısa ve uzun fiberli karbon epoksi kompozit kullanmışlardır. Malzeme olarak uzun fiberli karbon epoksi kompozit malzemeler düşük kesme hızlarında, kesme takımı olarakta kübik boron nitrür takımı daha üstün özellikler göstermiştir.

Makhdum ve ark. (2013) karbon/epoksi kompozitlerde, kesme parametrelerinin, itme kuvveti ve tork üzerindeki etkisini hem deneysel hem de nümerik olarak araştırmışlardır. Deneysel ölçümlerde delme sonuçları X-Ray tomografi ile hesaplanmış, geliştirilmiş nümerik model ile kıyaslandığında makul değerler bulunmuş ve böylece optimum delme parametreleri karbon/epoksi malzemeler için tespit etmişlerdir.

Lin ve Chen (1996), karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin 210 m/dk 'dan 850 m/dk 'ya yüksek hızla delinmesinin ortalama itme kuvveti, tork, takım aşınması, delik kalitesi üzerindeki etkisini hem multifacet (çok yüzölçü matkap ucu) hemde twist (helisel) matkap uçlarıyla göstermişlerdir.

Piquet ve ark. (2000), özel bir kesme takımı ve twist (helisel) matkap ucuyla, delme işlemini karbon-epoksi plakalar üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Bu özel takım ucu ve twist (helisel) matkap ucu kullanılarak karşılaştırılmalı deneyler gerçekleştirmişler, giriş ve çıkış hasarları, yuvarlaklık ve çap kusurlarını minimize etmeye çalışmışlardır.

Gaitonde ve ark. (2008), karbon fiberlerin yüksek hızlarda delinmesi sırasında, delaminasyonu etkileyen parametreler üzerinde çalışmışlardır. Kesme hızı, ilerleme hızı ve uç açıları değerlendirilerek delik civarlarında oluşan hasarları delaminasyon faktörü ile ilişkilendirmişlerdir. Aynı zamanda oluşan etkileri Cevap Yüzey Metodu (RSM) ile de analiz etmişlerdir. Kesme hızının artmasıyla delaminasyon eğiliminin azaldığını gözlemlemişlerdir. İlerleme hızı ve uç açısının düşük değerleri hasarı azalttığını çalışmalarında göstermişlerdir. Modelin yeterlilik testi varyans analizi (ANOVA) ile vermişlerdir.

Karnik ve ark. (2008), geliştirdikleri yapay sinir ağı modeli ile yüksek hızda delme işlemi uygulanmış karbon fiberlerdeki delaminasyon davranışını kesme hızı, ilerleme hızı ve uç açısı parametreleri ile incelemişlerdir.

Grilo ve ark. (2012), üç farklı takım geometrisine sahip takımlarla, farklı ilerleme hızı ve kesme hızı parametrelerinin etkisini iki delik üzerindeki delaminasyon faktörlerinden belirlemişlerdir. Görüntü işleme analizine dayanan bir tahribatsız tayin metodu kullanarak hasar bölgesinin maksimum çapını ve delaminasyon alanını ölçmüşlerdir. Sonuç olarak, ağaç matkabı uç geometrisine sahip benzer matkapla (Spur) delme ile elde edilmiş ve bu matkaplarla yüksek üretim hızı, minimum delaminasyona, 2025 mm/dk ilerleme hızı ve 6750 dev/dk devir sayısı ile ulaşıldığını göstermişlerdir.

Phadnis ve ark. (2013), işleme prosesi sırasında, itme kuvveti ve torka etkiyen kesme parametrelerinin etkisini hem deneysel hemde nümerik olarak göstermişlerdir.

Tsao and Hocheng (2007), çalışmalarında karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin Twist Matkap ucu ile delindikten sonraki takım aşınmasından kaynaklanan delaminasyonu analiz etmişlerdir. Sonuç olarak, kritik itme kuvveti artıyor olduğu halde delaminasyon daha da fazla eğim göstermeye başladığı belirlenmiştir.

Abrao ve ark. (2008), takım malzemesi ve geometrisinin, cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin delinmesiyle meydana gelen delaminasyon ve itme kuvvetleri üzerinde etkisini araştırmıştır. İlerlemenin artmasıyla itme kuvvetinin arttığını ve kesme hızı etkisinin itme kuvveti üzerinde ihmal edilebilir olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca takım aşınmasının abrazon ve itme kuvveti seviyesinden kaynaklandığını ilişkilendirmişlerdir.

Budan ve ark. (2011), çalışmalarında cam fiber takviyeli polimerlerde ki takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon faktörü ve delik kalitesini incelemişlerdir. Sonuç olarak takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon faktörü değerlerinde artış, delik kalitesinde ise azalma görülmüştür.

Faria ve ark. (2008), cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerin delinmesinde, itme kuvveti ve takım aşınmasına etki eden delme parametrelerini ve takım malzemelerinin incelenmesini çalışmışlardır. HSS (High Speed Steel) takımlarda aşınma eğilimi fazla olurken, sinterlenmiş karbid uçlar aşınmaya karşı üstün bir direnç göstermiştir. Titanyum nitrit kaplamalı uçların kullanımında ise ne itme kuvvetine ne de takım aşınması direncine önemli bir katkı sunmadığı görülmüştür.

Iliescu ve ark. (2010), karbon kompozit malzemelerin delinmesinde itme kuvvetinin ölçülmesini ve değerlendirmesini yapmışlardır. Takım ömrünü uzatmak ve kaliteli delikler elde etmek amacıyla, kaplamalı ve kaplamasız matkap uçlarını kullanmışlardır. Çalışmalarında itme kuvveti, kesme parametreleri ve takım aşınması arasında fenomenolojik bir modelin gelişimini tarif etmişlerdir. Deneyler sonunda ilerleme oranının, kesme hızının ve takım aşınmasının itme kuvvetini çok önemli bir şekilde etkileyen faktörler olduğunu gösterdiler. Oluşturdıkları modeli takım aşınmasının görüntülenmesi içinde kullandılar.

Wen-Chou Chen (1997) çalışmasında, karbon elyaf takviyeli plastik kompozit levhaların delinmesinde delaminasyon faktörünü derecelendirip analiz ve kıyaslama yapılmasını ileri sürmüştür. Yaptığı deneylerde delaminasyon başlangıcına bakmadan kesme kuvvetlerinin değişimlerini araştırmış, delme parametrelerinin ve takım geometrisinin kesme kuvveti üzerindeki etkisini incelemiştir. Deneysel sonuçlar sonucunda uygun takım geometrisi ve delme parametreleri elde edilmiştir. Takım aşınmasının ve delme parametrelerinin delaminasyon faktörü üzerindeki etkisi sunulmuş ve tartışılmıştır.

Nagarajan ve ark. (2012), çalışmalarında delaminasyonu etkin bir biçimde ölçmek için kayma testi ve üç noktada eğme testinden aldıkları sonuçlarla yeni bir

delaminasyon faktörü (F_{dR}) değeri ileri sürmüşlerdir. Hesapladıkları bu delaminasyon faktörünün (F_{dR}) değerinin, sıradan hesaplanan delaminasyon (F_d) ve alan hesabıyla bulunan delaminasyon faktörüne (F_{dA}) göre daha kesin ve doğru sonuçlar aldıklarını ileri sürmüşlerdir.

Kılıçkap (2010) çalışmasında, cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin delinmesi esnasında oluşan delaminasyona etkileyen kesme hızı, ilerleme oranı ve takım uç açısı gibi kesme parametrelerinin etkisini araştırmıştır. Delme sırasında giriş ve çıkışlarda oluşan hasarları minimize etmek için en uygun kesme parametrelerini elde etmeye çalışmıştır. Taguchi metodu ve varyans analizi (ANOVA) ile kesme parametrelerinin ve takım ucu açısının delaminasyona etkisini tayin etmeye çalışmıştır. Sinyal gürültü oranı analizini kullanarak en uygun delme parametreleri kombinasyonunu gözlemlemiştir. Sonuç olarak sırasıyla ilerleme oranını ve kesme hızını delaminasyonu en fazla etkileyen faktörler olarak bulmuş, ayrıca düşük kesme hızı ve ilerlemede en iyi delaminasyon sonucunu almıştır.

Guo ve ark. (2012), kompozit malzemelerin delinmesinde helisel matkap ucu kullanarak, itme kuvvetinin ve torkun tespiti için bir model ileri sürmüşlerdir. Model kesme hızı, ilerleme oranı, delik çapı, takım ucu açısı, köşe radyüsü, radyal köşenin eğim açısı, ağ kalınlığı ve fiber yönü dikkate alınarak geliştirmişlerdir. Kesme kuvvetlerini tatmin edici olarak tayin etmişler, kesme parametreleri ve takım geometrilerini bu modelle optimize etmişlerdir.

Murphy ve ark. (2002), karbon elyaf takviyeli epoksilerin delinmesinde, kaplamanın tungsten karbür matkap ucunun performansına etkisini araştırmışlardır. İtme kuvvetinin ve torkun yanında, aşınmayı, delik toleranslarını, delaminasyonları ve numune üzerindeki dökülme ve kavlamaları da incelemişlerdir. Sonuç olarak kaplamanın ne takım aşınmasını ne de hasarı azalttığını bulamamışlardır.

Rajamurugan ve ark. (2013), cam elyaf takviyeli polyester kompozit malzemelerin delinmesinde cevap yüzey metodunu kullanarak, fiber oryantasyon açısı, kesme hızı, ilerleme oranı ve takım ucu çapı gibi kesme parametreleri arasında ilişki kuran deneyler gerçekleştirmişlerdir. Geliştirdikleri model aracılığıyla delaminasyon faktörünü ve delaminasyonun sınırlarını etkin bir şekilde elde etmişlerdir. Sonuç olarak, artan ilerleme oranı ve delik çapının delaminasyonu arttırdığı, fiber oryantasyon açısının ise buna herhangi bir etkisinin olmadığını gözlemlemiştir. Kesme hızının delaminasyona katkısının da çok az olduğunu göstermişlerdir.

Bu tezin amacı; nanoteknolojinin ileri mühendislik malzemelerine uygulanmasında mükemmel fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip, anahtar malzeme olarak karşımıza çıkan karbon nanotüp ile modifiye edilmiş karbon elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin işlenebilirliğinin araştırılması ve iyi bir delik kalitesi için en uygun işlem parametrelerinin belirlenmesi, katkısız (saf) ve CNT katkılı epoksi polimer kompozitlerde delik kalitesi üzerinde etkilerinin araştırılmasıdır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Nanoteknoloji

Nanoteknoloji; fizik, kimya, biyoloji gibi fen bilimleri dallarıyla, elektronik, endüstri, mekanik, uzay, bilgisayar, inşaat, malzeme gibi birçok mühendislik dallarını birleştiren, tüm disiplinleri kendi alanlarında moleküler düzeyde düşünmeye, tanıyıp anlamaya, tasarlamaya ve bunları ürüne dönüştürmeye yönlendiren disiplinler arası bir bilim dalıdır (Hierold, 2007; Gu, 2007). Bu teknoloji bilinen bütün teknolojilere kıyasla çok daha fazla temel bilime ve kuramsal araştırmalara gereksinim duymaktadır (Birtane, 2010; Çıracı, 2005).

Nanoteknoloji, atomlar ve moleküller seviyesinde 1 ile 100 nm boyut skalasında çalışarak, gelişmiş ve tamamen yeni özelliklere sahip yapılar elde edilmesine imkan sağlamaktadır. Bu teknoloji sayesinde, bu boyutlardaki yapıların, malzeme ve sistemlerin anlaşılması kontrolü ve atomsal seviyede değiştirilip işlenmesi sonucunda ortaya çıkan değişik özellikleri kullanarak yeni teknolojik nano ölçekte aygıtların, malzemelerin, sistemlerin üretilmesi ve bu aygıtların günlük hayatımızda kullanılır hale getirilmesi mümkün olmuştur. Atomsal düzeyde mühendislik olan nanoteknoloji, nanometre (nm) ölçü birimini kullanır. Nano, bilim alanında metrenin milyarda biri anlamına gelen bir ölçü birimi olup, bu ölçü birimi nanometre (kısaca nm) olarak tanımlanmaktadır ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) (Birtane, 2009; Çıracı, 2005).

Bütün maddeler atomlardan oluşmuştur ve özelliklerini de atomlarının dizilişlerinden alırlar. Maddeleri birbirlerinden farklı kılan şey; en küçük birim olan atomların dizilişlerindeki çeşitliliktir. Atomlar veya molekülleri tek tek alıp hassas şekilde birleştirip, istenen her türlü ürünü elde ederek, atomları hareket ettirebilecek boyutlarda aletler geliştirilebildiği takdirde, doğadaki atomik dizilim taklit edilerek herşey kopyalanabilir. Atomları hareket ettirebilecek bir teknoloji de bu çeşitliliğe bir ölçüde ulaşabilir. Örneğin, kömür moleküllerindeki atomları düzenleyebilirsek aynı moleküllerin farklı bir dizilimi olan elması elde edebiliriz (Birtane, 2009).

Nanoteknolojiyi uygulanabilir kılan şey, atomların yapısı ve aralarındaki mükemmel organizasyon özelliği olduğundan, atomların yapısının ve davranış biçimlerinin çok iyi bilinmesi gerekir (Çıracı, 2005).

Nanoteknoloji, benzeri görülmemiş özelliklerdeki yeni aygıtları üretmek için atomların ve moleküllerin bilinen özelliklerini kullanmaktadır. Eğer bilim adamları bağımsız atomları ve molekülleri bir yapılanmada belli ölçülerde ve sürede bir araya

getirebilirlerse, bu buluş programlanabilir kendinden inşa ve türeyen makineler çağının başlangıcı olabileceği konuşulmaktadır (Birtane, 2009; Çıracı, 2005).

Malzemenin büyüklüğü nanometre ölçütlerine inince, kuantum davranışlar, makro dünyanın klasik davranışlarının yerini almakta, üretilen yeni malzemeler klasik metodlar ile elde edilen makro boyutlardaki malzemelere kıyasla daha önce görülmeyen yeni üstün özelliklere sahip olmaktadır. Nanometre boyutlarına inen malzeme daha işlevsel, daha mukavemetli olabilmekte, alabildiğine esnek, çok daha hafif veya daha farklı şekillerde ısı ve elektrik iletme özelliklerine sahip olabilmekte, magnetik ve optik özelliklerinde önemli ölçüde artma veya azalma olabilmekte ve hatta renkleri bile değişebilmektedir. Altının, nano boyutlara indikçe renginin mavi veya kırmızı olması gibi. Mevcut nanoyapıya yabancı bir atomun eklenmesi, o yapının elektronik özelliklerini, örneğin elektrik iletkenliğini fark edilebilir Çekilde değiştirmektedir. Bu yabancı atom, geçiş elementi olduğunda yapıştığı bir nanoyapıya manyetik özellikler kazandırabilmektedir. Kısaca, bir nanoyapının fiziksel özellikleri, bağ yapısı ve dolayısı ile mukavemeti onun büyüklüğüne ve boyutuna bağlı olarak önemli değişimler gösterebilmektedir (Çıracı, 2005). Böylece üretilen nanoteknolojik malzemelerin daha dayanıklı, daha düşük hata seviyeli, daha hafif ve daha hassas özelliklerle donatılmış olması günümüzde nanoteknolojiyi ilgi odağı haline getirmiştir (Birtane, 2009).

2.1.1. Nanoteknoloji Çalışmalarından Beklentiler

Nanoteknolojik araştırmalardan beklentiler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Nanometre ölçekli yapıların analizi,
- Nanometre boyutunda yapıların fiziksel özelliklerinin anlaşılması,
- Nanometre ölçekli yapıların imalatı,
- Nano hassasiyetli cihazların geliştirilmesi,
- Nano ölçekli cihazların geliştirilmesi,
- Uygulama yöntemleri bulunarak nanoskopik ve makroskopik dünya arasındaki bağın kurulması,
- Nano boyutlu toz üretimi,
- Nanokompozit malzeme üretimi. (Birtane, 2009)

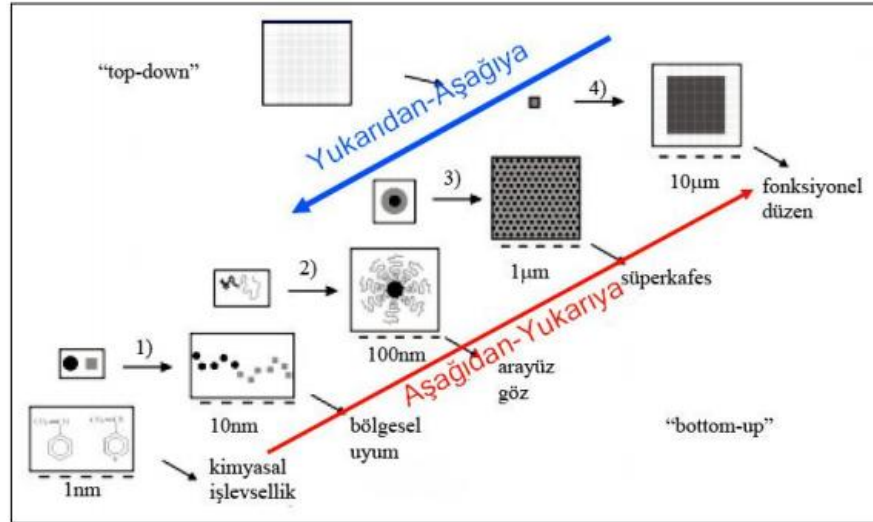
2.1.2. Nanoteknolojinin Avantajları

Nanoteknolojinin önemi, atomlar ve moleküller seviyesinde (1-100 nm) boyut skalasında çalışarak, gelişmiş ve/veya tamamen yeni fiziksel, kimyasal, biyolojik özelliklere sahip yapılar elde edilmesine imkan sağlamasından kaynaklanmaktadır. Teknik açıdan açıklamak gerekirse malzeme özellikleri ve cihazların çalışma prensipleri, genel olarak 100 nm'den büyük boyutları temel alarak yapılan varsayımların sonucunda ortaya çıkarılmış geleneksel modelleme ve teorilere dayanmaktadır. Kritik uzunluklar 100 nm'nin altına indiğinde ise geleneksel teori ve modeller, ortaya çıkan özellikleri açıklamakta çoğu zaman yetersiz kalmaktadır (Tepe, 2007). Nanoteknoloji işte bu noktada devreye girmektedir. Daha sağlam, daha kaliteli, daha uzun ömürlü ve daha ucuz, daha hafif, daha küçük cihazlar geliştirme isteği birçok iş kolunda gözlenen eğilimlerdir. Minyatürizasyon olarak tanımlanabilecek bu eğilim birçok mühendislik çalışmasının temelini oluşturmaktadır. Minyatürizasyonun sadece kullanılan parçaların daha az yer kaplamasından çok daha önemli getirileri vardır. Minyatürizasyon üretimde daha az malzeme, daha az enerji, daha ucuz ve kolay nakliye, daha çok fonksiyon ve kullanımda kolaylık olarak uygulamada kendini göstermektedir (Birtane, 2009; Tepe, 2007).

20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren birçok endüstride kullanılan toleranslar sürekli iyileştirilmiş, üstün kalite anlayışı geliştirilmiştir. Mikro teknoloji ürünü olarak tanımlayabileceğimiz parçalar; otomobil, elektronik, iletişim gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılır olmuştur (Tepe, 2007). Nanoteknoloji sayesinde sanayide, bilişim teknolojilerinde, sağlık sektöründe ve daha birçok alanda yeni ürünler geliştirilecek, günümüzün üretim süreçleri ve yöntemleri değişecektir (Birtane, 2009; Tepe, 2007).

2.1.3. Nanoteknolojiyi Uygulama Yöntemleri

Nanoyapıların elde edilmesinde iki ana yöntem bulunmaktadır. Aşağıdan yukarıya "bottom-up" ve yukarıdan aşağıya "top-down" olarak adlandırılan bu iki yaklaşımı Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Nanoteknolojik boyutlara ulaşma yöntemleri (Birtane, 2009; Plantenberg, 2002)

Bottom-up (aşağıdan-yukarıya) yaklaşımı (küçükten büyüğe), moleküler nanoteknoloji olarak tanımlanabilir. Bu yaklaşım, organik veya inorganik yapıları, maddenin en temel birimi olan atomlardan başlayarak atom atom, molekül molekül inşa edilmesi yöntemini ifade eder.

Top-down (yukarıdan-aşağıya) yaklaşımı (büyükten küçüğe), makineler, asitler ve benzeri mekanik ve kimyasal yöntemler kullanılarak nano yapıların fabrikasyonu ve imal edilmesi yöntemlerini ifade eder. Teknolojinin bugünkü seviyesi nedeni ile yapılan çalışmaların birçoğu yukarıdan aşağıya (top-down) sınıfında değerlendirilebilir (Plantenberg, 2002; Tepe, 2007).

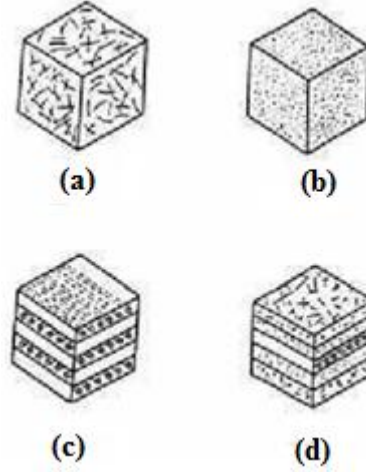
2.2. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler; iki ya da daha fazla malzemenin uygun özelliklerini tek malzemede bir araya toplayarak veya ortaya yeni bir özellik çıkarmak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi sonucu oluşturulan malzemelerdir (Ulucay, 2002).

Kompozit malzemelerin bilinen klasik metal malzemelere göre üstün yanları malzeme kombinasyonunun sonsuz sayıda olmasıdır. Kompozitlerin bu avantajları onlara malzeme özelliklerini istenildiği gibi değiştirme imkanı tanır. Dolayısı ile yapıda var olması istenen hafiflik, yüksek mukavemet, yorulma ve aşınma dayanımı, estetik görünüm, elektriksel iletkenlik, rijitlik, korozyon direnci, termal iletkenlik gibi özellikler kompozit malzemelerle daha iyi elde edilebilir. Rijitlik, mukavemet, yoğunluk, termal ve elektriksel özellikler için istenilen değerler, uygun matris alaşımı, takviye elemanı, takviye şekli ve hacmi, takviyenin yönü ve bu kompozitlerin üretim

metotları ile elde edilir. Bu avantajların yanı sıra üretim güçlüğü, işlenmesinin güç olması yanında maliyetinin yüksek oluşu ve her zaman geri dönüşümünün olmayışı gibi dezavantajları da mevcuttur. Kompozit malzemeler iyi bir şekilde dizayn edildiğinde, genellikle bileşenlerinin en iyi özelliklerini sergiler (Eskizeybek, 2006).

Yapılarında çok sayıda farklı malzeme kullanılabilen kompozitlerin gruplandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olamamakla birlikte, yapıdaki malzemelerin formuna göre bir sınıflandırma yapmak mümkündür. Bu sınıflama Şekil 2.2. 'de verilmektedir (Armatlı, 1999).

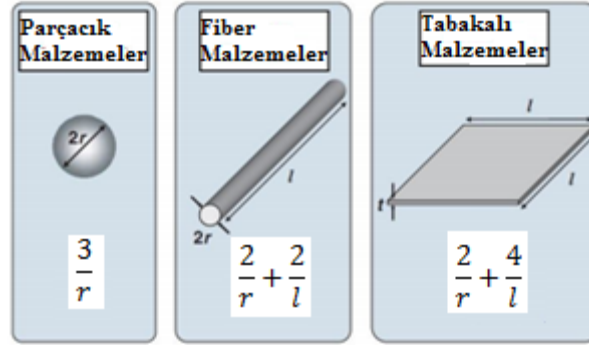


Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması a) Elyafli Kompozitler b) Parçacıklı Kompozitler c) Tabakalı Kompozitler d) Karma Kompozitler (Armatlı, 1999)

2.2.1. Takviyeler ve Dolgu Malzemeleri

Takviye ve dolgu malzemesi olarak kullanılan parçacıklarda boyut makrodan nano boyuta düşürüldükçe fiziksel özelliklerde belirgin değişiklikler gözlenir (Eskizeybek, 2012). Nanoboyuttaki malzemeler hacimlerine oranla oldukça büyük yüzey alanlarına sahiptirler (Luo ve Daniel, 2003). Birçok kimyasal ve fiziksel etkileşim yüzey özellikleri tarafından kontrol edildiğinde, nano yapıdaki bir parçacık daha büyük boyutlarındakinden farklı özelliklere sahip olacaktır (Eskizeybek, 2012). Parçacık ve fiberlerin birim hacim için yüzey alanı malzemenin çapı ile ters orantılı olduğundan, küçük çaplardaki malzemeler birim hacim için büyük yüzey alanlarına sahiptirler (Luo ve Daniel, 2003). Kompozitlerde kullanılan dolgu malzemelerine ait genel geometriler ve yüzey alanı hacim oranları Şekil 2.3. 'de verilmiştir. Genel olarak bu malzemeler geometrilerine göre parçacıklar, fiberler ve tabaka yapıları olarak sınıflandırılırlar (Schmidt ve ark., 2002). Örneğin karbon siyahı ve silika nanoparçacıkları parçacıklar

grubunda sayılabilirken nanofiberler ve karbon nanotüpler fiber malzemeler grubundadır.



Şekil 2.3. Kompozitlerde kullanılan genel takviye türleri/geometrileri ve yüzey alanı/hacim oranları (Thostenson ve ark., 2005)

Polimer matrislerde nanoparçacıkların katkı malzemesi olarak kullanılması üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda ivme kazanmıştır. Nanometre boyutundaki parçacıkların yüzey alanları $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ bulabilmektedir (Gonjy ve ark., 2005). Bu büyük yüzey alanları nedeni ile yükün matrisin nanoparçacığı transferi kolaylaşacak ve sonuçta matrisin mekanik özellikleri artırılmış olacaktır (Njuguna ve ark., 2007).

Parçacık takviyeli kompozitler bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilen izotrop yapılardır. Genellikle ısı ve elektriksel iletkenliği, yüksek sıcaklık dayanımını, aşınma dayanımını, işlenebilirliği, yüzey sertliğini geliştirmek için kullanılan parçacıkların yapının mukavemetine etkisi parçacıkların mukavemetine ve takviyenin boyutlarına bağlıdır (Ulus, 2014).

Parçacık takviyeli malzemede performansı etkileyen çok fazla unsur vardır. Parçacık boyutları boyut dağılımları, yapışma etkisinden dolayı yüzey enerjileri, hacimsel oranlar, homojen dağılım, parçacık eksen uzunluğu oranı bunlardan başlıca olanlarıdır.

Elyafli kompozitler, boyu kesit çapına göre önemli derecede uzun ince elyafların bir matris yapı içerisine yerleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Bu kompozitlerde elyaflar sürekli, süreksiz (kısa), rastgele veya belirli bir düzende yapı içerisine yerleştirilebilmektedir. Sürekli elyafların birbirine paralel olarak yerleştirilmesi ile elyaflar doğrultusunda yüksek mekanik özellikler sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda düşük mekanik özellikler elde edilmektedir. Elyafların belirli doğrultularda yönlendirilmesinden dolayı yapı anizotropdur. Elyaflar doğrultusunda mukavemet, elastik modül gibi değerler yüksek olduğundan, gerekli yönlerde bu özellikleri artırmak için elyaflar açılı olarak yerleştirilmektedir (Sahin, 2000).

Kompozit malzemeyi meydana getiren bileşenlerden takviye malzemesi olarak kullanılan çeşitli formlardaki fiberler matris malzemesinden daha rijit ve güçlüdürler. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirleyen önemli parametreler fiberlerin uzunluğu, şekli, yönlenmesi ve kompozisyonudur. Bu parametrelerden en önemli yönlenme faktörüdür. Fiberlerin yönelimi mukavemetlenmenin sağlanacağı eksenini belirler. Üç türlü fiber takviyesi vardır. Bunlar tek yönde, düzlemsel ve üç boyutlu takviyedir. Bunlardan tek yönde takviye yönlenme doğrultusunda en yüksek mukavemet ve elastisiteye sahiptir. Düzlemsel takviye her yönde aynı veya farklı mukavemet gösterebilmektedir. Bir yöndeki mukavemet o yöndeki fiber sayısı ile orantılıdır. Fiberler kendi uzunluk doğrultusundaki eksenini boyunca yük taşımaya elverişli olduğu için, yönlenmesi rastgele olursa herhangi bir yönde mekanik özellikleri zayıflayacaktır (Ulus, 2014).

Uzun fiberler teorik olarak uygulanan gerilme ya da kuvveti kesintisiz olarak iletirler. Ancak bu durum iki sebepten dolayı pratikte gerçekleşemez. İmalat faktörleri fiber boyunca optimum çekme gerilmesi elde edilmesi imkansız kılar. İdeal sürekli fiber yapısında fiberlerde hiç gerilme olmadığı ya da eşit miktarda gerilme taşıdığı kabul edilir. Ancak gerçekte bu durum hiçbir zaman elde edilemez. İmalat neticesinde farklı iç gerilmelere sahip olan fiberlerden daha fazla ön gerilmeli fiberler uygulanan dış gerilmeleri destekler (Ulus, 2014).

Kısa fiberlerden imal edilmiş kompozitlerde fiberler eğer yeterince düzgün yönlenmişse uzun fiberleri olan kompozitlerden daha büyük mukavemete sahiptir. Buna en iyi örnek viskerlerdir. Viskerler, 10.3 GPa gibi yüksek çekme mukavemetine sahip olabilirler. Zira kısa fiberler daha az yüzey hatasına sahip bir biçimde imal edilebilirler. Kısa fiberlerden üretilmiş kompozitler düzlem ya da düzensiz şekiller elde etmek için kullanılır (Eskizeybek, 2012).

Pratikte bütün fiberler dairesel kesitli olarak kullanılır. Dairesel kesitli fiberler daha kolay üretilirler. Cam, plastik ve metal fiberler farklı boyutlarda üretilirler. Genel bir fiber ne kadar ince ise o kadar büyük mukavemete sahip olur. Bunun sebebi çap küçüldükçe muhtemel yüzey hatalarının elenmesidir. Karesel fiberler daha iyi bir paketleme faktörüne sahiptir. Hegzagonal yapıya tek kristal fiberler daha iyi mukavemet sağlamalarına rağmen üretilmeleri ve yapıya yerleştirilmeleri zordur (Ulus, 2014).

Fiber takviyeli kompozitler için hem organik hem de inorganik fiberler mevcuttur. Organik fiberlerin genel karakteristikleri hafiflikleri, esneklikleri ve ısıya duyarlılıklarıdır. İnorganik fiberler ise çok yüksek mukavemet, ısı direnci, rijitlik, ve

düşük enerji absorpsiyonu ile tanınırlar. Cam fiber, grafit fiber, bor fiber, kevlar fiber, organik fiberler, seramik fiberler gibi çeşitleri mevcuttur. Bunlardan en yaygını ve çok kullanılanı cam, grafit ve organik fiberlerdir (Eskizeybek, 2006).

2.2.2. Polimer Reçineler

Kompozit malzemelerin matrisini oluşturan polimer reçineler elyafların yapısal bütünlüğü oluşturmalarını, uygulanan yükün elyaflar arasında dağılmasını, elyafların aşınma gibi mekanik hasardan ve kimyasal etkilerden korunmasını sağlar. Uygun matris malzemesi seçimiyle reçinenin özelliklerine bağlı olarak, kompozit süneklik, darbe direnci gibi performans karakteristikleri de belirlenebilir. Ayrıca kullanılan polimer reçinenin özellikleri ve fiberle uygunluğu, meydana gelen hasar mekanizmalarını önemli ölçüde etkiler (Ulus, 2014).

Polimerler yüksek moleküler ağırlığa sahip organik bileşikler olup monomer adı verilen birimin sürekli tekrarlanması ile oluşurlar. 103 ila 106 monomer kimyasal reaksiyonlar sonucu bir araya gelerek polimerleri oluştururlar (Eskizeybek, 2012).

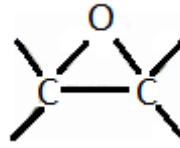
Polimer reçineler, polimer zincirlerini birbirine bağlayan bağ yapılarındaki farklılıklarından dolayı termoplastikler ve termosetler olarak sınıflandırılırlar. Uzun hidrokarbon zincirlerinden oluşan, molekülleri birbirine kovalent bağlara nazaran oldukça zayıf Van der Waals bağları ve mekanik kilitlenmeler ile bağlı olan termoplastikler, sıcaklığın artması halinde mekanik kilitlenme etkisinin azalması sebebiyle viskoziteleri kolaylıkla azaltılabilir ve zayıf bağ yapıları dolayısıyla sıcaklıkla eritilerek tekrar şekillendirilebilirler. Aynı şekilde uzun hidrokarbon zincirlerinden oluşmuş termosetler üç boyutlu karmaşık katı yapıya sahip olup, termoplastiklere göre daha rijit, dayanıklı ve daha az süneklik özelliği gösteren yapılardır (Ahmad, 2009).

Termoplastiklerin matris malzemesi olarak kullanımları az olmasına rağmen üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Oda sıcaklığında katı halde bulunan termoplastik soğutucu içinde bekletilmeden depolanabilir. Termoplastikler yüksek sertlik ve çarpma dayanımı özelliğine sahiptirler. Oda sıcaklığında düşük işleme kalitesi sağlarlar, bu onların üretimde zaman kaybına yol açmasına neden olur. Çoğu termoset matris setleşmemeleri için dondurulmuş olarak depolanmak zorundadır. Dondurucudan çıkarılıp oda sıcaklığında bir müddet (1-4 hafta arası) bekletildiğinde

sertleşmeye başlar ve özelliklerini kaybederek biçim verilmesi zor bir hal alır ve kullanılamaz duruma gelir. Dondurucu içinde olmak şartıyla raf ömürleri ise 6 ila 18 ay arasında değişmektedir. Termoset reçineler kimyasal etkiler altında çözülmez ve olağan dışı hava koşullarında dahi uzun ömürlü olmaktadır (Şahin, 2000).

En çok kullanılan termosetler epoksi, polyester ve fenolik reçinelerdir (Sinha, 2006). Bu çalışmada, üstün termomekanik, elektriksel ve kimyasal direnç özellikleri yanı sıra daha dayanıklı ve daha rijit olması sebebiyle epoksi reçine kullanılmıştır. Bu reçineler katılar kürleştirici miktarına bağlı olarak 5° ile 150°C arasındaki sıcaklıklarda hızlı ve kolay bir şekilde kürleştirilebilirler (Memiş, 2009). Epoksi reçineler katılaşma esnasında büzülme eğilimleri düşük olduğundan iç gerilme oluşumunu minimize ederler (Biron, 2004).

Epoksi reçineleri adını yapısında bulunan Şekil 2.4. 'de gösterilen epoksi fonksiyonel gruplarından almaktadır. Epoksi reçinelerinin her bir molekülünde bir veya daha fazla epoksi grubu vardır ve oksijen bağlarına sahip eteri yapısında bulundurur. Ticari epoksi reçineleri alifatik, sikloalifatik veya aromatik arka bağlar içerir (Joseph, 1996).



Şekil 2.4. Epoksi fonksiyonel grubu (Ulus, 2014)

Epoksi reçinesi ilk olarak 1930 yılının sonunda bilim adamları tarafından sentezlenmiş ve birçok endüstriyel uygulamalar için kullanılmıştır. Bu uygulama alanları; yapı malzemeleri, kaplamalar, kompozit malzemeler, havacılık, laminantlar, yapıştırıcılardır (Joseph, 1996).

Epoksi diğer polimer matrislere göre pahalı olmasına rağmen, kompozitler için en çok tercih edilen polimer matris malzemedir. Epoksilerin en çok kullanılan polimer matris malzemeleri olmasının başlıca sebepleri (Kaw, 1997);

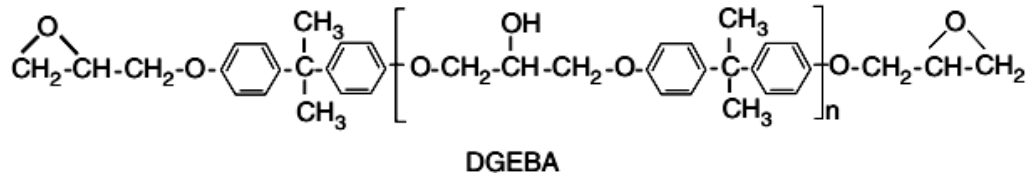
- Çekme ve darbe dayanımları oldukça yüksektir.
- Aşınmaya karşı çok dayanıklıdır.
- Yüksek sıcaklıkta iyi mekanik ve fiziksel performans gösterirler.
- Hangi düzgünlük ve dokuda olursa olsun, herhangi bir yüzeye yapıştırılabilir.
- Oda sıcaklığında katılaşabilirler.
- Düşük viskozite ve düşük akış hızına sahiptirler.

- Kürleşme süresince uçuculukları düşüktür.
- Yüksek elektriksel ve kimyasal dirence sahiptirler.

Epoksilerin çapraz bağlanmaları sırasında uçucu madde oluşmaz ve çapraz bağlanmaları sonrası büzülme oranları da (%1-5) düşüktür. Ancak fiyatları yüksek ve kürleme süreleri uzundur. Kür süresini azaltmak amacıyla hızlandırıcılar kullanılarak çapraz bağlanma tepkimeleri hızlandırılır. Kullanım sıcaklıkları polimer özelliklerine bağlı olarak 150 °C ye çıkar (Velde, 1992).

Epoksiler, epoksi gruplarının kendi aralarında homopolimerizasyonu veya anhidrid, amin, novalak, gibi maddelerle reaksiyona girmesiyle elde edilir. En yaygın olarak kullanılan epoksi reçineleri alkali katalizör eşliğinde epikloroanhidrin ile bisfenol-A ‘nın reaksiyonu ile elde edilen diglisidil eter bisfenol-A (DGEBA) ‘dır (Ulus, 2014).

Şekil 2.5 ‘de bu çalışmada kullanılan doymamış bir epoksi türü olan diglisidil ether bisfenol A ‘nın moleküler yapısı verilmektedir.



Şekil 2.5. Epoksi diglisidil ether bisfenol A’nın moleküler yapısı (Kim ve ark., 2009)

Epoksiler çoğunlukla mekanik özellikler ve çevresel bozulmaya karşı dirençleri açısından birçok reçine türünden üstünlüğü ile havacılık sanayisinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Yüksek yapışma özellikleri ve su ile ayrılmaya karşı direnci, bu reçinenin gemi inşaatında kullanılmasında yaygın hale getirmiştir. Epoksiler yapıştırıcı, mühürleyici birleşen, döküm bileşeni, cila, boya ve birçok endüstriyel uygulama için lamine edici reçine olarak kullanılmaktadır (Memiş, 2009).

2.2.3. Kürleştiriciler

Epoksi reçineleri kolaylıkla sıvı halden sert termoset katı hale geçerek hal değiştirebilirler. Bu sertleşme kimyasal bir katkının (kürleştirici) eklenmesi ile gerçekleşir (Lee ve Neville, 1967).

Epoksi reçineler üç tür reaksiyon sonucunda kürleşerek termoset bir yapı oluşturabilir:

1. Epoksi gruplarının birbirlerine direkt olarak bağlanması,

Fiberler genellikle bir çözelti veya eriyiğin eğilmesi yöntemi ile cam, karbon ve polimerlerden üretilmektedirler. Sürekli fiber veya kırılmış fiber olarak ikiye ayrılırlar. Kırılmış elyaflar içeren kompozitler elyafların boy/çap oranına bağlı olarak kısa fiber veya uzun fiber takviyeli olarak sınıflandırılır. Eğer boy/çap oranı 100 'den küçük ise kısa fiber takviyeli, büyük ise uzun fiber takviyeli kompozitler olarak adlandırılır. Sürekli fiberler içeren kompozitlerde, fiberler fitil, iplik, demet veya tel şekillerinde kullanılır. Kumaşlar, sürekli fiber ağlarından elde edilir. Demetler genellikle eliptik kesite sahip olup 100 ila 48000 adet fiberin bir araya gelmesi ile oluşur. Demetlerin istenilen şekilde örülmesi veya dokunması ile de kumaşlar üretilir (Eskizeybek, 2012).

Fiber kumaşlar, fiberlerin oryantasyonuna ve fiberleri bir arada tutmak için kullanılan çeşitli yapılandırma metotlarına göre tek yönlü, 0/90°, çok eksenli ve diğer/rastgele şeklinde dört temel oryantasyonla sınıflandırılır (Memiş, 2009).

Cam, kevlar, karbon ve boron gibi çok sayıda ve farklı özelliklere sahip elyaf malzemesi vardır. Havacılık endüstrisinde birinci derecede gerilmeye maruz uçak parçalarında en yaygın kullanılan elyaf malzemeleri karbon elyaflardır (Baker, 2004).

Karbon ve grafit sürekli birbirinin yerine kullanılan terimler olmalarına rağmen grafit elyaflar; 1600 °C üzerinde bir ısıtma işlemine tabi tutulmakta, %99 dan fazla karbon içermekte ve 345 GPa dan yüksek elastik modüle sahiptirler. Karbon elyaflar ise daha düşük sıcaklıklarda ısıtma işlemine tabi tutulmakta, %93-95 karbon içermekte ve 345 GPa da küçük elastik modüle sahiptir (Campbell, 2004).

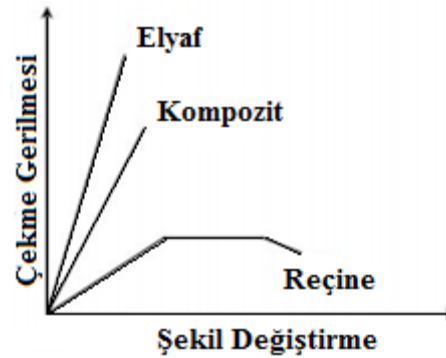
Ticari olarak karbon elyaflar, poliakrilinitril (PAN) ve zift (petrol veya kömürden üretilen) hammaddelerinden üretilmektedir (Middleton, 1990). Karbon elyaf üretim metotları termal oksidasyon, karbonlaştırma, grafitleştirme ve yüzey işlemlerini içermektedir. Yüzey işlemleri, elyaf bütünlüğünün sağlanması ve elyaf-matris arasında iyi bağ oluşması için yapılmaktadır. Bu işlemten sonra eğer elyaflar dokuma işlemine tabi tutulacaksa mekanik hasarlardan elyafı korumak için genellikle epoksi kullanılarak kaplanmaktadır. Yaklaşık 7-8 µm çapında üretilen karbon elyafların en önemli özelliği düşük yoğunluğunun yanı sıra yüksek mukavemet ve rijitlik değerleridir (Campbell, 2004; Koşan, 2006).

Şekil 2.8. 'de gösterildiği gibi elyaflar, tekstil teknolojileri kullanılarak üretim kolaylığı ve kompozit malzemenin hasar toleransını arttıran farklı koruma teknikleri ile kumaş haline getirilerek kullanılabilir (Campbell, 2004).



Şekil 2.8. İki boyutlu dokuma tipleri (Campell, 2004)

Parçaya gelen yükü taşıyan elyaflar, Şekil 2.9. 'de görüldüğü gibi matrisin mukavemet ve rijitliğini artırarak kompozitin temel yapısal özelliklerini sağlamaktadır. Elyafalarda aranan temel özellikler, yüksek elastik modül ve mukavemet, düşük yoğunluk, kimyasal uyumluluk ve üretim kolaylığıdır. Kompozit üretilirken elyaf seçimi, üretim tekniği, üretim esnasında elyafların matris tarafından ısıtılabilmesi, yönlendirilmeleri ve elyaf hacmi kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerinde etkilidir. Elyafların ince çaplı olarak üretilmesinin bir sonucu olarak yapısal hata olasılıkları en aza indirildiğinden büyük kütsel yapılara göre mukavemet ve elastik modülleri daha yüksektir (Şahin, 2000)



Şekil 2.9. Reçine, elyaf ve kompozitin çekme gerilmesi-şekil değişimi şematik gösterim (Şahin, 2000)

Elyafların ince çaplı olarak üretilmeleri ile büyük kütsel yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Bu nedenle üstün mekanik özellikler gösterirler (Ulus, 2014).

Bu çalışmada örgü karbon fiberler takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Karbon fiber takviyeli yapılmış kompozitler, 1020 çelik konstruksiyonlardan beş kat daha dayanıklı ve 1/5 'i ağırlığında, 6061 alüminyum konstruksiyonlardan da yedi kat daha dayanıklı, iki kat daha sert ve 1,5 kat daha hafiftirler. Ayrıca karbon fiberlerin yorulma davranışı bilinen tüm metallerden daha iyidir. Uygun reçine ile kapladığı zaman korozyona karşı iyi bir kompozit yapı olmaktadır (Waslh, 2001).

Karbon lif üretimi için yapılan araştırmalar sonucu en uygun hammaddelerin rayon, lifleri, katran ve zift olduğu belirlenmiştir (Matsumoto, 1985).

Karbon fiberlerin özellikleri kristallerin mikroyapıdaki dikey ve yatay yerleşiminden etkilenmektedir. Bu kristallerin uzunluğu ve düzlüğü (eksene paralelliği) lif modülünü etkilemektedir. Çoklu tabakalardan oluşmuş kristalin her bir tabakası grafen denilen hegzagonal karbon atomlarından meydana gelmektedir. Tabaka içerisindeki güçlü C-C bağları fibere yüksek dayanım ve sertlik verirken, tabakalar arasındaki zayıf Van der Waals bağları da kayma direncinin artmasına sebep olarak iyi ısı ve elektrik iletkenliği sergilemesine neden olmaktadır. Kristallerin kalınlığı ve uzunluğu karbon fiberlerin elektriksel, ısı özelliklerini ve modülünü etkilemektedir. Karbon liflerinden önemli özelliklerinden birisi de çok iyi yorulma direncine sahip olmasıdır. 2200 °C altındaki sıcaklıklarda karbon liflerinde büzülme davranışı gözlenmemektedir (Ulus, 2014).

İnorganik bir metal olan karbon lifleri nem, açık hava, baz ve zayıf asitlerden oda sıcaklığında etkilenmemekte fakat, yüksek sıcaklıklarda oksidasyondan oldukça fazla etkilenmektedirler (Walsh, 2001).

2.2.5. Polimerik Nanokompozit Malzemeler

Nanoteknoloji temelde, moleküler boyutta çalışarak, moleküler yapısı yenilenmiş büyük yapılar elde etmektir. Malzemelerin nanometrik boyuttaki özellikleri ile aynı malzemenin makro boyuttaki özellikleri değişiklik göstermektedir. Nano kompozitler, bir matris içerisinde nanometre büyüklüğünde parçacıkların dağılması ile oluşan maddelerdir. Nanometrik boydaki taneciklerin dispersiyonu ile elde edilen nano kompozitlerin mekanik, termal, optik ve fiziko kimyasal özelliklerinin saf polimerlere ve konvansiyonel kompozitlere oranla daha üstün olması sağlamaktadır. Nano kompozitlerin malzameye getirdiği diğer üstünlüklerde modülünün artması, yapıyı güçlendirmesi, ısı direncinin artması, malzemenin gaz geçirgenliğinin engellenmesi, yanıcılığının azaltılması olarak sıralanabilir (Kornmann, 2001).

Polimer kompozitler konusunda çalışma ilk defa Toyota araştırma laboratuvarlarında yapılmış ve üstün mekanik ve termal özellikler elde edilmiştir. (İşçi, 2007). Yapılan bir çok çalışma sonucunda, polimerik nano kompozitler günümüzde otomobillerde kullanılmaya başlanmıştır. Çok düşük dolgu maddesi içerikli malzemelerde geleneksel talk dolgulu kompozitlere göre 10 kat daha hafif ve 10 kat

daha mukavemetli durumdadır. Bu önemli özellik bu malzemeleri otomotiv için çok uygun kılmaktadır (Yurdagül, 2007).

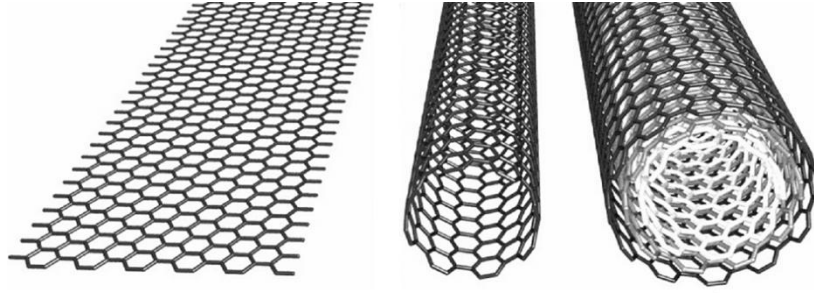
Polimer nano kompozit olarak adlandırılan malzemeler; polimer içerisinde dağıtılmış nano boyutlu organik ya da anorganik, doğal ya da sentetik ikinci bir faz veya katkı maddesi içeren yapıları tanımlamakta ve nano dolgulu polimer kompozitler ya da anorganik-organik hibrit malzemeler olarakta adlandırılmaktadırlar (Le Baron ve ark., 1999).

Polimer nanokompozitlerin takviyesinde kullanılan nano dolgu maddeleri farklı türde, yapıda ve geometride olabilmektedirler. Bunlardan en çok kullanılanlar doğal ve sentetik killer, karbon malzemeler (nanoboyutlu karbon siyahı, tek ya da çok duvarlı karbon nanotüpler, exfoliated grafit tabakaları vs.), nano boyutlu çeşitli metaller, metal tuzları ve metal oksitler, amorf silika, polihedral silisyum bileşikler ve selüloz lifleri olarak sıralanabilir (Alexandre ve Dubois, 2000).

Nanokompozit çeşitleri içerisinde kolay bulunabilen doğal kil ve silikat tabakasına dayanan çeşitler en çok kullanılan türlerdir. Kil metaryelleri ve araya girme kimyası uzun zamandır çalışılan bir konudur. Dispersiyon ile elde edilen nano boyutlardaki taneciklere sahip olan bu nano kompozitler mekanik, termal, optik ve fiziko kimyasal özelliklerinin polimerlere ve konvensiyonel kompozitlere oranla daha üstündürler. Nanokompozitlerin malzemeye getirdiği diğer üstünlükler modülü arttırması, güçlendirmesi, ısı direncini arttırması, malzemeye gaz sızmasını engellemesi, yanıcılığını azaltması olarak sıralanabilir (Kornmann, 2001).

2.2.6. Karbon Nanotüpler (CNT)

Karbon nanotüplerin şekli Şekil 2.10 'daki gibi tüp şeklinde yuvarlatılmış bir levha olarak düşünülebilir. C-C sp² bağ yapısı ile elmasın sahip olduğu C-C sp³ bağ yapısından daha güçlüdür. Çünkü karbon nanotüpün sahip olduğu bağ daha kısadır. Ayrıca grafit tabakaları arasındaki nispeten çok zayıf olan Van der Waals bağları, grafit tabakalarının kolaylıkla birbirleri üzerinde kaymasını sağlar. Literatürde üç çeşit karbon nanotüp vardır; tek cidarlı karbon nanotüp, iki cidarlı karbon nanotüp ve çok cidarlı karbon nanotüp. Tek cidarlı karbon nanotüpler diğerlerine göre daha dayanıklıdır çünkü sadece bir grafit tabakasının yuvarlatılması sonucu oluşur (Fan,2007). Çok cidarlı karbon nano tüpler ise iç içe geçmiş eş merkezli tüpler olup bu tüplerin birbirleri içinde kayabilme ihtimalleri dayanımlarını düşürür (Lordi ve Yao, 1999).



Şekil 2.10. Grafit tabakanın yuvarlanması ile oluşan karbon nanotüp yapısı (Kreupl, 2004)

Karbon nanotüpler hafif, dayanıklı, yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahip ve boy/çap oranları büyük olan nanomalzemelerdir. CNT'lerin özellikleri çaplarına, boylarına, yönlenmelerine, yüzeysel özelliklerine bağlıdır (Fan, 2007).

Günümüzde, CNT 'lerin büyük miktarlarda üretimi için ark-deşarj, lazer buharlaştırma ve kimyasal buhar yağışturma (CVD) gibi yöntemler tercih edilir. Bu yöntemlerin çoğu vakum altında veya çeşitli gaz ortamlarında gerçekleştirilmektedir. İlk büyük miktarda CNT üretimi ark deşarj yöntemi ile gerçekleştirilmiştir (Ebbesen ve Ajayan, 1992). Halen günümüzde CNT üretiminde en çok tercih edilen yöntemdir. Grafit elektrotlar arasında gerçekleşen ark boşalması ile açığa çıkan yüksek sıcaklıklar nedeniyle grafit elektrot buharlaşır. Yeniden oluşan yapılarda CNT içeriği ağırlıkça % 30 civarındadır (Collins, 2000). Lazer buharlaştırma yönteminde, yüksek sıcaklıklarla ısıtılan ve asal gaz ile doldurulmuş bir reaktör içerisine yerleştirilen grafit kaynağı lazer ile buharlaştırılır. CNT 'lerin toplanabilmesi için reaktör cidarlarının su ile soğutulması gerekir. Kobalt ve nikel gibi katalizörler kullanılarak CNT üretimi gerçekleştirilebilir (Guo ve ark., 1995). CVD (Kimyasal Buhar Biriktirme) günümüzde ticari amaçlı CNT üretiminde tercih edilen bir yöntemdir. Kobalt, nikel ve demir gibi katalizörler ile kaplanmış yüzeyler kuartz bir tüp fırın içerisinde ön ısıtma ile yaklaşık 700 °C civarına ısıtılır. Tüp fırın içerisinde amonyak, azot veya hidrojen gibi taşıyıcı gazlar ile birlikte karbon kaynağı içeren asetilen, etanol, etilen ve metilen gibi gazlar geçirilir. Nanotüpler metal katalizler üzerinde karbon içeren gazın bozunması ile büyütülürler (Pinila ve ark., 2007).

CNT 'ler mükemmel mekanik özelliklere sahip olsalar da, bu özelliklerinden takviye elamanı olarak etkin bir şekilde yararlanabilmek için bazı zorlukların üstesinden gelmek gerekir. CNT 'lerin polimer matriks içerisinde homojen bir şekilde dağıtılması, nanotüplerin matriks tarafından ıslatılabilmesi, adezyon gibi etkenler, karbon

nanotüplerin takviye elemanı olarak göstereceği performansı etkileyen en önemli konulardır (Njuguna ve ark., 2007).

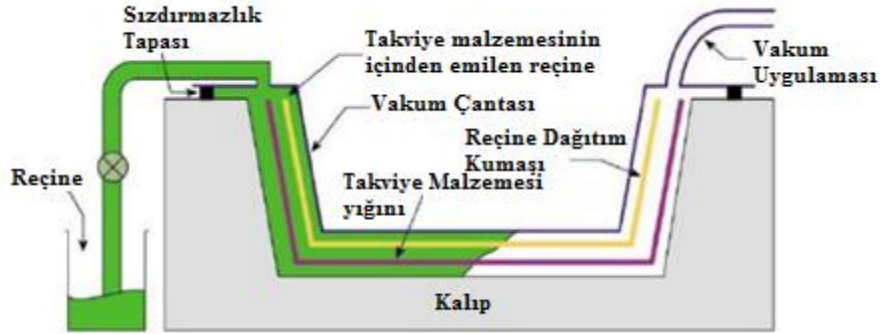
CNT 'lerin matriks içinde homojen bir şekilde dağıtılması matriks ile karbon nanotüp ağı arasında etkin olarak yük aktarımının yapılabilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Karbon nanotüplerin matriks içerisinde iyi bir şekilde dağıtılmış olması ile ayrıca homojen gerilme dağılımı elde edilir ve gerilme konsantrasyonu oluşturan bölgelerin azalmasını sağlar (Coleman ve ark., 2006). Saf CNT 'leri matriks içerisinde homojen olarak dağıtmanın zorluğu, büyük yüzey alanlarından kaynaklanan Van der Waals kuvvetlerinin CNT 'leri bir arada tutmasından ileri gelmektedir. CNT 'ler matriks içerisinde kümelenmesi ve yetersiz dağılım, karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemelerde mekanik özelliklerin iyileştirilememesi sonucunu meydana getiren en önemli etkenler olarak karşımıza çıkmaktadır (Andrews ve Weisenberger, 2004; Song ve Youn, 2005). Bu dağılım problemini çözmek için birçok fiziksel ve kimyasal yöntem geliştirilmiştir. Bunlar, ultrasonikasyon (Shaffer ve Windle, 1999), kayma etkisi ile karıştırma, yüzey aktive eden madde (surfactant) kullanma (Gong ve ark., 2000), karbon nanotüp yüzeylerinin fonksiyonelleştirilmesi (Olek ve ark., 2005), plazma polimerizasyon (Shi ve ark., 2005) olarak örnek verilebilir. CNT 'lerin polimerin içinde dağıtılmasında kullanılacak yöntem temel olarak kullanılan polimerin türüne ve viskozitesine bağlıdır.

2.3. Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Kompozit Malzeme Üretimi

Vakum yardımlı reçine transferi yöntemi (VARTM), sıvı reçinenin fiber yığınları arasına vakum etkisi yardımıyla kalıp içerisine çekilmesi prensibine dayanan sıvı kalıplama yöntemi olup tabakalı kompozitlerin üretiminde son zamanlarda sıkça tercih edilen bir yöntemdir (Gören ve Ataş, 2008).

Bir vakum infüzyon prosesin amacı reçineyi mümkün olduğunca hızlı olarak nihai konumuna getirmek ve az boşluk içeriğine sahip bir parça üretmektir (Reinforced Plastics, 2004). Üretim maliyeti düşük, zaman tasarrufu sağlayan, tek yüzeyli bir kalıp ile gerçekleştirilebilen bu yöntem hızlı ve temiz üretimin önemli olduğu, denizcilik endüstrisinin yanı sıra büyük ve kompleks uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca bu yöntem, kompozit yapının içerdiği hava kabarcığını en aza indirerek üretim tekniğinden kaynaklanan hatalarıda azaltmaktadır (Khattab, 2005; Reinforced Plastics, 2004). Bu yöntemin amacı, fiberler arasındaki boşlukların sıvı reçine katılaşmadan önce reçine ile

doldurulmasıdır (Advani ve Sozer, 2003). Şekil 2.11 'de VARTM yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.11. VARTM yöntemi şematik gösterimi

Vakum infüzyon yönteminde ilk olarak kalıp hazırlanır ve fiberlerin kalıp üzerine serilir. Kalıp vakum çantası ile kaplanır ve vakum oluşturulduktan sonra reçine kalıp içerisine vakumlanır. Üretilen parçaların kürlenmesi ile proses sonlanır (Chandrasekaran, 2011).

Reçine Transfer Kalıplama (RTM) ve Vakum Reçine Transfer Kalıplama (VARTM) metodu geliştirilmiş fiber takviyeli kompozit üretiminde sıvı kalıplama prosesinin yaygın biçimde kullanılan iki sınıfıdır. RTM yönteminde fiber preformlar rijit kalıp çevrelemektedir. Reçine fiberler arası bölgeyi iyice doldurmak için giriş olarak adlandırılan kalıptaki açıklıklardan enjekte edilir (Jeffrey ve ark., 2004). VARTM imalatı seri üretimde çekici ve uygun bir yöntemdir. Sistem çıkış delikleri yoluyla vakuma tabidir (Johnson ve Pitchuman, 2007). Vakum basıncı reçinenin kalıp içerisindeki giriş kanallarından geçerek kalıba çekilmesini sağlar (Jeffrey ve ark., 2004; Johnson ve Pitchuman, 2007). İki üretim yaklaşımında da son ürünün elde edilmesi, fiber yataklarının reçine akışı ile tamamen doyurulmasını içerir (Jeffrey ve ark., 2004).

RTM yönteminde reçine rijit kalıp ile preformlara basınç altında enjekte edilir. Reçine ve preformlara uygulanan basınca dayanacak kadar sert olan kalıp preformun şekil değişimini önleyebilir ve bu yüzden boyut değişiklikleri göz ardı edilebilir. Böylece hacim oranı parça boyunca sabit kalır. VARTM de reçineyi esnek bir kalıba çekmek için vakum kullanılır ve bu metotta preformların şekil değişimi kısıtlanmaz. Reçine kalıba doldurulurken preformlara uygulanan vakum basıncı parça kalınlığının ve dolum süresinin fonksiyonudur (Jeffrey ve ark., 2004).

2.3.1. Vakum İnfüzyon Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Vakum infüzyon yöntemi ile üretilen kompozit tabakanın kalitesi operatörün çalışma becerisine bağlı olmadığından parça kalitesi istikrarlıdır. Lamineler arasına sıkışmış hava kabarcığının oluşturduğu hatalar oldukça azaltıldığından lamine yapı mükemmel bir biçimde birleştirilmiş ve et kalınlığı sabit olmaktadır. Kaburga, öz ve dirsek benzeri karmaşık yapıları bulunan parçaların imalatı, bir bütün olarak tek bir adımda gerçekleştirilebilmektedir. Üretilen parça net boyda hazırlanarak son (talaşlı) işlem süresini azaltmakta ve parçanın kalıplanmamış yüzeyinde bir iç kalıp kullanılmasıyla yüzey kalitesi oldukça iyi olan parçalar çıkarılabilir. Bu yöntemle iyi bir takviye reçine oranı sağlanarak yüksek mukavemetli ve düşük ağırlıklı parçalar üretilmesine olanak sağlar. Ayrıca bu yöntemin çevre açısından önemli bir avantajı buharlaşan organik bileşenlerin havayı kirletmemesidir (Memiş, 2008).

Yöntemin dezavantajları ise, malzeme tedarik masrafları ve talaşlı işlem masrafları yüksektir. Her ürün kendine has bazı süreç geliştirmelerine ihtiyaç duymaktadır (Memiş, 2008).

Geleneksel kompozitlerde, mekanik özellikler açısından yapılan malzeme tasarımında fiber doğrultuları değiştirilerek istenilen doğrultularda yüksek mekanik özellikler elde edilir. Nanoparçacık ve fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitlerin takviye edilmesi konusu detaylı olarak düşünüldüğünde, FRP kompozitlerin zayıf halkası olarak bilinen tabakalar arası bölgenin takviye edilmesi önem kazanmaktadır. FRP kompozitlerde tabakalar arası bölge fiber takviyesinin olmadığı bölge olup, kompozit malzemenin servis ömrü sırasında tabaka ayrılması veya matris çatlaması gibi çeşitli mekanizmalar ile hasara uğrayarak kompozit malzemenin işlevinin yitirmesine sebep olabilir (Wicks ve ark., 2010). Nispeten zayıf tabakalar arası bölge özellikleri, tabakalı kompozit sistemlerin genel performansını sınırlandırır.

Tabakalar arası dayanımının artırılması için bazı yöntemler geliştirilmiştir: 3-D fiber kumaş kullanımı, dikme ve z-pinleme (Eskizeybek, 2012). Bu yöntemlerin hepsi tabakalı kompozitlerde kalınlık yönündeki mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde kullanılır. Ancak bu yöntemlerin hepsinde, uygulamada tabakalı kompozitler tahrip edildiği için henüz tabaka yönündeki mekanik özelliklerin düşmesindeki etkileri tam olarak ortaya koyulamamıştır (Eskizeybek, 2012). Bu bağlamda, yukarıda bahsedilen özellikleri sayesinde bor nitrür nanoparçacık takviyesi, tabakalı kompozit malzemelerin zayıf halkası olarak adlandırılan tabakalar arası dayanımının iyileştirilmesi ve tabakalı

kompozit malzemeleri hasara uğratmadan servis performansının artırılması konusunda önemli bir katkı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır (Ulus, 2014).

2.4. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik evrensel olarak tanımlanmış, standart bir özellik değildir. Genellikle işlenebilirlik, iş parçalarının kesici takım ile şekillendirebilmesinin ne kadar kolay veya zor olduğu olarak adlandırılır. Orta karbonlu çelik ısı dirençli bir alaşıma göre, gri dökme demir, kır dökme demire göre daha kolay işlenir. Kesici takımlardaki gelişmeler, değişen koşullar ve metotlar nedeniyle, işlenebilirlik kavramı karşılaştırmalı değerler cinsinden ifade edilmesi zor olan bir kavramdır. İşlenebilirliği etkileyecek tüm faktörlerin ayrıntılı olarak incelenmesi zor bir çalışma gerektirmektedir. En geniş tanımıyla işlenebilirlik kesici takım ve iş parçasına ait takım ömrü, talaş oluşumu, yüzey kalitesi, talaş debisi, kesme kuvveti/güç gibi kriterlerce tanımlanan bir özellik olarak adlandırılabilir (Aztekin, 2010; Çakır, 1999).

Uygun bir iş parçası için gerçekleştirilen işlenebilirlik testleri sonucunda bazı işlenebilirlik verileri belirlenebilir. Ancak bir grup işlem için iyi olarak kabul edilen işlenebilirlik değerleri başka gruplar için uygun olmayabilir. Bir iş parçasının mukavemeti ve sertliği tek başına işlenebilirlik için belirleyici bir unsur teşkil emeyebilir. Yapı içerisindeki kalıntılar, işlemeyi kolaylaştıran katkı maddeleri, mikro yapı, sert ve aşındırıcı bileşenler, talaşın sıvanma eğilimi gibi diğer faktörler de işlenebilirliğe etki eder (Çakır, 1999).

İyi bir işlenebilirlik ve talaş kaldırma koşullarının optimizasyonu için en yaygın olarak kullanılan iş parçası malzemeleri araştırırken malzemenin özelliklerine bu özelliklerin talaş kaldırma işlemini nasıl etkilediğine çok dikkat edilmelidir (Aztekin, 2010).

Malzemelerin genellikle düşük sertlik ve mukavemet değerlerine sahip olması arzu edilir. Ancak çok sünek malzemeler kesici kenarda yığılma oluşumu nedeniyle bu kurala bir istisna teşkil ederler. Bu durumda soğuk çekme ile sertliğin artırılması işleminin olumlu bir etkisi vardır (Çakır, 1999).

Genellikle düşük süneklik değerleri daha uygundur. Bu durumda talaş oluşumu avantajlı ve kesme işlemi enerji açısından verimlidir. Düşük süneklik ise yüksek sertlik demektir. İyi bir işlenebilirlik için genellikle sertlikle süneklik arasında bir ara değer bulunması gerekir (Çakır, 1999).

Yüksek ısı iletkenlik kesme işlemi esnasında oluşan ısının derhal kesme bölgesinde uzaklaştırılması anlamına gelmektedir. Talaş kaldırma açısından bakıldığında yüksek bir ısı iletkenlik açısından önemli bir rol oynamasına karşın belirli alaşım grupları için ne yazık ki iyileştirilemeyen bir özelliktir (Çakır, 1999).

Metaller plastik deformasyona uğradıkları zaman mukavemetleri artar. Mukavemetteki artış hızına ve malzemenin deformasyon sertleşmesi kabiliyetine bağlıdır. Yüksek bir deformasyon sertleşme hızı deformasyon hızındaki artışa bağlı olarak mukavemetteki ani artış demektir. Çelik bir malzemenin işlenmesi esnasında deformasyon hızı genellikle kesici kenara yakın bir bölgede çok yüksektir. Karbon çelikleri çok düşük deformasyon sertleşmesi hızına sahip malzemelere örnektir. Yüksek deformasyon sertleşmesi hızı talaş oluşumu için gerekli enerjinin yüksek olması (yüksek özgül kesme kuvveti) demektir. İşlenen yüzeyde ince bir tabakada sertlikte büyük bir artışta gözlenecektir. Deformasyon nedeniyle sertleşmiş tabakanın kalınlığı ilerleme değerine eşit olduğu takdirde kesici kenar yüksek gerilmelere maruz kalır. Bu tabakanın kalınlığı ve sertlik seviyesi kesici kenarın deformasyon hızıyla orantılıdır (Çakır, 1999).

Büyük bir talaş açısına sahip keskin bir kesici kenarda deformasyon hızı düşüktür. Bu nedenle pozitif bir geometri deformasyon nedeniyle sertleşmiş tabaka kalınlığının, bunun sonucunda da kenar üzerindeki gerilmenin azaltılmasına yardımcı olacaktır. Ancak deformasyon sertleşmesinin kesici kenarda yığılma oluşumunu azaltıcı bir etkisi de mevcuttur (Çakır, 1999).

Makro kalıntılar 150 μm 'den daha büyük boyutlara sahip kalıntılardır. Genellikle çok sert ve aşındırıcıdır. Bu nedenle bu gibi kalıntıları içermeyen bir malzemenin kullanılması son derece önemlidir. Makro kalıntılar imalat yöntemlerine bağlı olarak düşük kaliteli çeliklerde söz konusudur. Birçok ani takım kırılmasının nedeni bu tip kalıntılardır. Mikro kalıntılar çelik içerisinde belirli oranlarda her zaman mevcuttur. Bu kalıntılardan alümina (Al_2O_3) sert ve aşındırıcıdır. Daha az zararlı demir ve mangan oksitleri (FeO ve MnO), biraz daha kolay deforme olurlar ve talaş akışına katılırlar. Silisyumun yeterince yüksek kesme sıcaklıklarında yumuşaması ve kesme bölgesinde takımın aşınmasını engelleyici bir tabaka oluşturması nedeniyle yüksek kesme hızlarında aranan kalıntılar arasındadır (Çakır, 1999).

İşlemeyi kolaylaştırmak için çeliğe kükürt ilavesi yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bir otomat çeliğinin içerisindeki S oranı işlenebilirliği iyileştirilmiş çeliklerin içerisinde bulunan oranın yaklaşık on katıdır. Çeliğin içerisinde yeterince Mn

bulunması halinde Mn ve S mangan sülfat oluşturacaktır. Talaş oluşumu esn asında plastik deformasyona uğrayan sülfat kalıntıları düşük mukavemetli düzlemler oluştururlar ki bu düzlemler boyunca çatlak başlangıcı ve yayılması için gerekli enerji miktarı azalır. Yaygın olarak kullanılan bir başka katkı malzemesi mangan sülfat ile benzer etkileri olan kurşundur. Kükürt ve kurşun birlikte kullanımı bir başka yaygın uygulamadır. Selenyumda kükürtle beraber kullanıldığında uygun bir katkı malzemesini oluşturur. Yaygın olarak kullanılan kükürt ve selenyum katkılı çelikler arasında karbon çelikleri ve ferritik, martenzitik ve östentirik paslanmaz çelikler sayılabilir. Pb katkılı veya kükürtlü ve kurşunlu çelikler ise sadece karbon çelikler arasında bulunur (Çakır, 1999).

Malzeme yapısının işlenebilirlik üzerinde etkisi vardır. Bu, bazı malzeme yapılarının aşındırıcı özelliklerinin olması ve malzemeye mukavemetinin malzeme yapısına bağlı olarak değişmesi nedeniyle ortaya çıkan bir ekidir. Çelik içerisindeki karbon ve diğer alaşım elemanlarının miktarı da yapıyı etkiler (Çakır, 1999).

Sıcak haddelenmiş iş parçası homojen olmayan ve kaba bir yapıya sahiptir. İşlenebilirlik açısından homojen olmayan bir yapı malzemesi sıkıntı demektir. Normalizasyonun amacı esas itibarıyla malzemenin tokluğunu iyileştirmektir. Elde edilen daha homojen yapı nedeniyle daha iyi bir işlenebilirlik seviyesi elde edilir (Çakır, 1999).

Tavlama birçok durumda malzemenin yumuşatılması için yapılan yumuşatma tavlama şeklidir. Bu işlemde perlitin sementit lamelleri küreselleştirilmiş sementite dönüşür ve ferrit yapısı içerisinde homojen dağılmış küreselleştirilmiş sementit bulunduran, sertliği oldukça azaltılmış bir yapı elde edilir. Sementitin küresel şekli sayesinde işleme esnasında kesici kenar, sert ve aşındırıcı sementit ile tavllanmış malzemedekine göre çok kısa süre temasta olacaktır (Çarkır, 1999).

Yumuşatma tavlama gerilme giderme tavlama ile karıştırılmamalıdır. Adından da anlaşıldığı gibi gerilme giderme tavlama soğutma veya soğuk çekme işlemlerinde malzeme içerisinde biriken gerilmenin giderilmesini amaçlar. Bu gerilmenin giderilmemesi halinde bu gerilmeler talaş kaldırma işlemi esnasında ortaya çıkacak geometrik toleransları etkilerler. Düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen gerilme giderme tavlama malzeme yapısını etkilemez. Dolayısıyla işlenebilirlik üzerinde etkisi yoktur (Çakır, 1999).

Soğuk çekilmiş bir malzeme normalizasyon veya yumuşatma tavlama gereksinim gösterir. Soğuk çekme işlemi genellikle oldukça küçük boyutlardaki

hammadde veya iş parçalarına uygulanır. Genellikle küçük boyutlardaki iş parçalarında homojen bir yapı oluşturmak daha kolaydır (Çakır, 1999).

İstenilen malzemenin yüzey dokusu makro kalıntılarda bahsedildiği gibi talaş kaldırma işleminin sonucuna etki eder ve kötü yüzey kalitesi, takımın ani aşınması veya kırılması gibi olumsuzluklara neden olur. Bir ön işleme yapılmış iş parçaları birçok durumda çok daha iyi sonuç verirler. Kütük malzemede bırakılan büyük işleme payları ilave talaş kaldırma işlemleri demektir. Büyük işleme payları arzu edilen boyut ve yüzey kalitesinin sağlanması için daha çok çaba gerektirmektedir (Çakır, 1999).

Yukarıda bahsedilen kriterler ışığında sünek metaller işleme kabiliyetini iyileştirmez. Sünek malzemenin talaşı takıma yapışır ve körlenmesine neden olur. Diğer taraftan sertlik takımın aşınmasına sebep olur. Dolayısıyla sertlik ile süneklik arası bir yapı olması gerekir. Bunun en iyi örneği çelikte görülür. % 2 'den az C içeren çelikler zor sünek olduğu için iyi işlenmez. % 2 'den fazla C içeren çelikler ise sert olduğu için takımı aşındırır. % 2 C içeren çelikler süneklik sertlik arası bir yapı sergilerler ve işlenirler. Demir olmayan hafif metaller genellikle kolay işlenirler (Çakır, 1999).

Kompozitlerin işlenmeleri zordur. Bu durumun kesici takımlar açısından seçici olmayı gerektirir. Bu malzemelere en fazla uygulanan talaş kaldırma işlemleri delme ve parmak frezeleme işlemlerdir (Çakır, 1999).

Metal matrisli kompozit malzemelerden alüminyum esaslı SiC (silisyum karbür) veya Al₂O₃ (alumina) elyaf takviyeli kompozitlerin işlenebilirliği takviye elemanlarının zaten seramik takımlarda da kullanılıyor olmasından dolayı işlenebilmeleri zordur. SiC 'ün kendiliğinden gelen abrasifliği nedeniyle hızlı takım aşınması olmaktadır. Bu da maliyeti arttırmaktadır. Parçacık takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin az kullanılmasının önemli sebeplerinden birisi de bu malzemelerin kötü işlenebilirliğidir. Çünkü geleneksel malzeme için gerekli bilgi ve tecrübe bu malzemelerde uygulanmaz. Hangi kesici takımın uygun olduğu konusunda yapılan araştırmalar da birbiriyle çelişmektedir (Şahin, 2000).

SiC takviyeli metal matrisli kompozitler için sert metal (K10) grubu ve çok kristalli elmas (PCD) takımlar önerilmektedir. Sert metalle talaş kaldırma işleminde çabuk takım aşınması meydana gelmektedir. PCD takımlar ile taşlama işlemine yakın kaliteli yüzeyler elde edilebilmektedir. Yüksek kesme hızlarında SiC takviye elemanlarının oluklaşma etkisinden dolayı yüzey kalitesi bozulabilmektedir. PCD takımlarla işlemede kesme kuvvetleri düşük ve sabit kalmaktadır (Şahin, 2000).

Karbon lifli kompozitlerin işlenmesinde takım ömrü doğrudan kesme hızıyla alakalıdır. Yüksek hızlar düşük takım ömrü demektir. Aramid lifli kompozitlerde ilerleme iyi ayarlanırsa yüksek hızlar elde edilebilir. Cam elyafli kompozitlerin işlenebilirliği karbon lifli kompozitlere yakındır. Yapı içerisinde elyaf hacim oranının artması işlenebilirliği azaltır. İşlenebilirlik açısından sadece kompozit tipinin değil elyaf/matris hacim oranında dikkate alınmalıdır (Çakır, 1999).

Plastik matrisli fiber takviyeli kompozitlerde kullanılan takviye elemanı ile ilerleme miktarı takım aşınmasını büyük ölçüde etkilemektedir. Genellikle yanak aşınması oluşmaktadır. Karbon fiberler yüksek elastik modülü nedeniyle cam fiberlere göre daha fazla takım aşınmasına neden olmaktadır. PCD takımlar da bu malzemelerin işlenmesinde kullanılabilmektedir (Şahin, 2000).

Parçacık takviyeli plastik esaslı kompozitler hakkında ise çok az çalışma vardır ve bunlar yeterli değildir. Özellikle tornalama konusunda çok az olan çalışmalar genellikle delme işlemi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu durum kaynak araştırmalarında açıkça görülmektedir (Aztekin, 2010).

Kısaca özetlemek gerekirse kompozitlerin işlenmesi zordur. Bu durum kesici takımlar açısından seçici olmayı gerektirir. Kompozitler keskin bir kesici uç ile işlenmelidirler. Takımın aşırı aşınması halinde fiber kesilmeyip kopacak bu da tabakaların ayrılmasına neden olacaktır. Çok ince taneli sert metal ve çok kristalli elmas takımların kullanılması gerekmektedir. Karbon fiberli kompozitlerde takım ömrü kesme hızıyla doğrudan alakalıdır. Aramid (kevlar) fiberlerde ise ilerleme düzgün ayarlanırsa yüksek kesme hızları elde edilmektedir. Cam fiberler karbon fiberlere yakın özellik gösterirler. Malzeme içerisinde takviye oranının artması işlenebilirliği azaltmaktadır. İşlenebilirlik açısından sadece kompozit tipinin değil elyaf hacim oranının da dikkate alınması gerekmektedir (Çakır, 1999).

2.5. Delik Delme İşlemi

Dövme, dökme, haddelme vb. yöntemlerle üretilen metal parçaların % 80 'ninden fazlası son biçim ve boyutlarına talaşlı üretim yöntemleriyle getirilirler. Talaşlı üretim esnasında uygun seçilmeyen işleme parametreleri, kesici takımların kırılması, hızlı aşınması ve deformasyonu gibi sebeplerle kısa sürede kullanılamaz duruma gelmelerine neden olmaktadır. Bu durum; tezgâh boş zamanının artması, iş parçası boyutlarının bozulması veya işin yüzey kalitesinin ikinci bir işlem gerektirecek

derecede yetersizliği gibi bir dizi ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Malzemenin işlenebilirlik özelliklerini önceden iyi tespit edilmemişse yukarıdaki kayıplar kaçınılmazdır (Kılıçlı, 2004).

Talaşlı imalat endüstrisinde çözülmeye çalışılan başlıca problemlerden biriside işlenebilirliktir. Her iyi imalatçı üretmek istediği ürünü nasıl daha hızlı, daha ucuz ve daha kaliteli üretebilir sorularına cevap aramaya çalışır. Bir üretim sürecinde işlenebilirlik; kesici takımın iş parçasını kesebilme ve iş parçasının da kesilebilme yeteneklerinin bileşimidir (Çini, 2010).

İşlenebilirliğin standardize edilmiş bazı özelliklere göre tanımlanması oldukça zordur. İşlenebilirliğin genellikle iş parçası malzemesinin, kesici bir takım ile istenilen biçime getirilmesindeki işlenebilme yeteneği olarak tanımlanır. Metal bir malzemenin metalürjisi, ısı işleme, katkı elemanları, kalıntı gerilmeler, yüzey tabakası vb. malzeme özelliklerinin yanı sıra; kullanılan kesici takımın kesici kenar özellikleri, takım bağlama biçimi, kullanılan takım tezgâhı ve tezgâhın rijitliği, işleme yöntemi, işleme şartları da önemli etkiye sahiptir. Talaşlı işlenebilirlik, bir malzemeyi nihai ürün haline getirilmesi esnasında malzemeden talaş kaldırma kolaylığı veya zorluğudur (Güral, 1998).

Değişik özellikteki çok çeşitli malzemeler üzerinde kesici takımların geometrik performanslarının ölçümü, takım tasarımı ve geliştirilmesi açısından çok önemlidir. Modern işleme metodları, takım değiştirme zamanını ve maliyetini en aza indirmeyi ve seri üretim alanlarında çok yönlü kullanmayı gerektirmektedir. Deneysel testlerin büyük bir bölümü bu hedefe ulaşmak için gerçekleştirilmekte ve işlenebilirlik deneyleri ile olay anlaşılmasına çalışılmaktadır. Bu testler; iş parçası malzemelerini, kesici takımları ve onların karakteristiklerini kapsamaktadır (Mills ve Redford, 1983).

İşlenebilirlik uygun kesici takım ve kesme parametreleri kullanılarak, bir malzemeyi (genellikle metal) talaşlı imalat yöntemleriyle şekillendirebilmenin nispi kolaylığı veya zorluğudur (Sandvik, 1996).

İşlenebilirlik çoğunlukla malzemenin özgül bir özelliği olarak algılansa da, sadece işlenen malzemeye bağlı olmayıp aynı zamanda işleme yöntemi ve işleme parametrelerine de bağlıdır (De Garmo, 1997).

En geniş anlamda işlenebilirlik aşağıdaki kriterlere göre tanımlanır:

1. Talaş oluşumu
2. Kesme kuvvetleri
3. Takım ömrü (veya takım aşınması)
4. Yüzey kalitesi

5. Kaldırılan talaş miktarı

6. Yığıntı talaş (BUE Built Up Edge) eğilimi (Bağcı, 2014)

Delme işlemi en önemli talaş kaldırma işlemlerinden biridir ve çoğunlukla talaş kaldırma işlemlerinin sonuncusudur. İlke olarak matkapla talaş kaldırma olayı ile tek ağızlı takım (tornalama, planyalama) talaş kaldırma olayı arasında bir fark yoktur. Ancak delik delme işleminde, talaşın tahliyesi ve kesme sıvısının verilmesi çok daha zor olduğu, talaş ile helis kanalların ve matkap ile işlenen yüzeyler arasında sürtünmenin çok daha büyük olduğu, talaş açısının ağız boyunca değişmesi ve bundan dolayı ağız boyunca farklı kesme şartlarının olduğu göz önünde tutulursa, matkapla talaş kaldırma, tek ağızlı takıma göre çok daha karışık ve ağır koşullarda meydana geldiği sonucuna varılır (Şeker, 2009).

Delik delme, kesici takımlarla bir iş parçası üzerine silindirik delik açma işlemidir. Delik delme işlemi birçok değişik iş parçasına ve malzemeye uygulanabilir. Bazen civata, vida ve diğer birleşenler için delinmesi gereken delikte yüksek derecede tolerans doğruluğuna gerek olmayabilir. Fakat aynı zamanda, kama deliği veya kalıp pimleri gibi hassas deliklerde ise tolerans doğruluğu önem arz etmektedir (Kaplan, 2010; Krar, 1998).

Delik delme işlemi bazı yönleri ile tornalama ve frezeleme işlemleri ile karşılaştırılabilir de delik delmede talaş kırma ve talaşın boşaltılması kritik öneme sahiptir. İşleme delikle sınırlıdır, yani delik derinliği ne kadar büyükse işlemi kontrol etmek ve talaş kaldırmak o kadar zor olur. Birçok parçada kısa delikler bulunur ve yüksek malzeme kaldırma oranı, kalite ve güvenilirliğe ilaveten önemi artan bir önceliğe sahiptir. Delik delme işlemleri; doluya delik delme, delik büyütme, fatura açma (kademeli delik delme) ve raybalama olmak üzere yapmak mümkündür (Kaplan, 2010; Korucu, 2007).

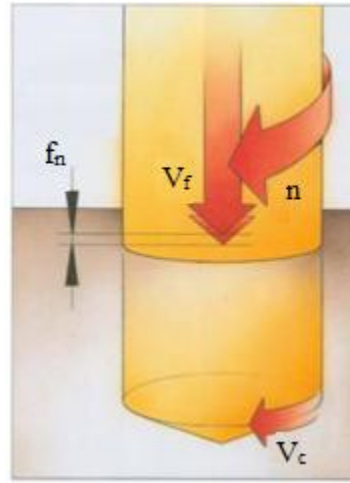
2.5.1. Delme İşlemlerinin Kesme Değerleri

Delme işleminde iki farklı kesme değeri mevcuttur; kesme hızı (V_c , m/dk) ve ilerleme oranı (f , mm/dev). Çevre hızı olarak bilinen kesme hızı fener mili hızından faydalanılarak hesaplanır. Fener mili hızı (n), dakikadaki devir sayısı olarak ifade edilir. Bir devir boyunca $\pi \cdot D$ olan bir çemberi tanımlar. Burada D ifadesi takım çapını belirtir. Kesme hızı, kesme kenarının hangi matkap yüzeyi boyunca çalışacağına bağlı olarak da değişir. Delik delme takımları için işlemedeki zorluk, matkabın çevresinden merkezine

doğru kesme hızının düşmesi ve merkezde sıfır olmasıdır. Tavsiye edilen kesme hızları çevredeki en yüksek hız içindir (Şeker, 2009).

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \quad (1)$$

Devir başına ilerleme bir devir süresince takımın yaptığı aksel hareketi belirtir. Bu ifade giriş oranını belirlemede kullanılır ve matkabın ilerleme kapasitesini belirler. Giriş oranı veya ilerleme hızı (V_f mm/dk) birim zamandaki uzunluk cinsinden takımın iş parçasına bağlı olarak ilerlemesidir. Bu ifade tezgah ilerlemesi veya tabla ilerlemesi olarak da bilinir. Devir başına ilerleme ve fener mili hızının çarpımları matkabın iş parçasına giriş hızını verir. Delik işlemi sırasında meydana gelen temel parametreler Şekil 2.12 'deki gibidir.



Şekil 2.12. Delik işleminin temel faktörleri

2.5.2. Delme İşleminde Kesme Kuvvetleri ve Moment Oluşumu

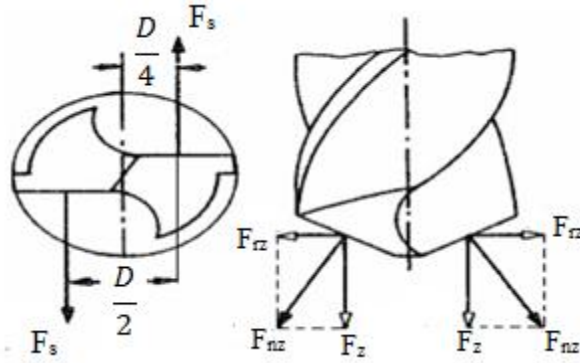
Delik delme işlemi için belli bir miktarda enerjiye ihtiyaç vardır. Matkap, iş parçasının içine girerek talaş kaldırırken kesme kuvvetleri matkaba etki eder ve bu da belli bir miktarda güç gerektirir (Yağmur, 2011). Öncelikle, delik açmak için gerekli olan güç, iş parçası malzemesinin cinsine göre farklılık gösterir ve bu güç hesaplanırken, malzeme için gerekli özgül bir kesme kuvveti göz önüne alınmalıdır (Yağmur, 2011; Palmer, 1959).

Özgül kesme kuvveti ($k_c - \text{N/mm}^2$) gerekli olan gücün, momentin ilerleme kuvvetinin hesaplanmasında önem taşır. Özgül kesme kuvveti belirli bir talaş açısı ve talaş kalınlığı için belirli bir malzemenin işlenebilirlik ölçüsüdür. Özgül kesme kuvveti, 1 mm^2 'lik bir talaş kesit alanını kesme için gerekli teğetsel kuvvet veya efektif kesme

kuvvetinin teorik talaş alanına oranı olarak tanımlanır. Karbon çeliği (%8 C) için bu değer 2700 N/mm^2 , normal bir alüminyum alaşımı için ise 750 N/mm^2 'dir (Yağmur, 2011).

Özgül kesme kuvveti efektif talaş açısı, ortalama talaş kalınlığı ve iş parçası malzemesine bağlı olarak hazırlanmış tablolardan elde edilir. Özgül kesme kuvveti pozitif talaş açısı ve ortalama talaş kalınlığı arttıkça azalma gösterir. Talaş açısının her bir derecelik artışı için özgül kesme kuvveti değerindeki azalma %1-1,5 civarındadır (Yağmur, 2011; Kaynak, 2006).

Delme sırasında bir kesici ağıza karşılık gelen talaş kaldırma kuvvetlerinin bileşenleri, yani kesme kuvveti (F_{nz}) bileşenleri, yani kesme kuvveti (F_s), ilerleme kuvveti (F_z) ve radyal kuvveti (F_{rz}) Şekil 2.12. 'de gösterilmiştir. Ağızların konumu itibarıyla her kesici ağızda oluşan radyal kuvvetler birbirini dengelemektedir. Bu nedenle delme işlemini sadece F_s ve F_z kuvvetleri etkimektedir (Uzun, 2011; Kıvak, 2007).



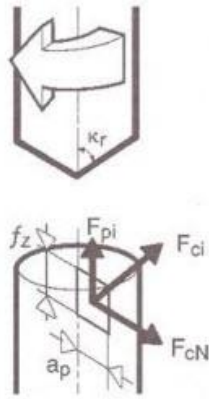
Şekil 2.13. Delme işleminde oluşan kesme kuvveti (Kıvak, 2007)

Teorik talaş alanının merkezine etkilediği kabul edilen kesme kuvveti; teğetsel, radyal ve eksenel yönlerde etkiyen üç bileşenden oluşur (Şekil 2.13). Bu bileşenler iş parçası malzemesi, talaş derinliği, ilerleme ve takım geometrisi gibi faktörlere bağlı olarak değişim gösterirler. Kesici kenar sayısı ile kesici kenar başına eksenel kuvvetin (F_p) çarpımına eşit olan toplam eksenel kuvvet ilerleme kuvvetine veya delme basıncına eşittir. Tezgah ana milinin işlem için çok yetersiz kalıp kalmadığı ve ilerleme mekanizmasının işlem için uygun olup olmadığı ilerleme kuvvetine bağlıdır (Yağmur,2011; Akkurt, 1998).

$$F_p = 0,5 \times k_c \times a_p \times f_r \times \sin K_r \quad (2.2.)$$

$$F_c = k_c \times a_p \times f_r \quad (2.3.)$$

Bağıntı 2.2. 'de anlaşılaçağı üzere K_r yanaşma açısının artmasıyla ilerleme kuvvetide artar.



Şekil 2.14. Kesme kuvvetinin bileşenleri (Tonshoff ve ark., 1994)

İlerleme kuvveti gibi ana kesme kuvvetide kesici kenar ile kenar başına teğetsel kesme kuvvetinin (F_{ci}) çarpımına eşittir. Moment, her bir kesici kenardaki momentlerin toplamıdır. Bu ise matkabın maruz kaldığı toplam delme momentinin teğetsel kesme kuvveti ile talaş alanının merkezine olan yarıçapın (r_A) çarpımına eşit olması demektir (Şekil 2.14). Bağıntı 2.6. 'da delik çapı (D) ve daha önceden delinmiş deliğin çapı (d) mm cinsinden ifade edilmişlerdir. İlerlemenin (mm/dev) cinsinden verilmesi halinde momentin (Nm) cinsinden ifade edilmesi için ise çarpımın sonucu 1000'e bölünür.

$$M = f_c \times r_A \text{ (Nm)} \quad (2.4.)$$

$$r_A = \frac{d}{2} + \frac{a_p}{2} = \frac{D+d}{4} \text{ (mm)} \quad (2.5.)$$

$$M = \frac{k_c \times f}{1000} \times \frac{(D^2 - d^2)}{8} \text{ (Nm)} \quad (2.6.)$$

İlerlemedeki artış talaş kalınlığının artmasına, buna bağlı olarak daha küçük bir özgül kesme kuvvetinin oluşmasına neden olur. Ancak o zamanda talaş alanı artar, dolayısıyla artan ilerleme toplamda daha büyük bir teğetsel kuvvet ve moment oluşumuna yol açar. Bununla beraber, uç açısı arttırılırsa (bu talaş kalınlığını da arttıracaktır) daha küçük bir k_c değeri sayesinde teğetsel kuvvet ve moment azaltılabilir.

2.5.3. Kompozit Malzemelerin Delme İşlemi

Kompozit malzemelerden yapılan parçalar hernekadar son şekline yakın olarak üretilmekte ise de bazı ek talaş kaldırma işlemleri de gerekebilmektedir. Delme işlemi, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde kullanılan kompozit yapıların civatalı ve perçinli birleştirilmesinde kullanılan öncelikli işlemlerdir. Örneğin küçük bir motorlu uçakta 100000 üzerinde delik olduğu belirtilmektedir (El Sonbaty, 2004). Bu örnekte delme işleminin ne kadar önemli olduğunu vurgulamaktadır.

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin delinmesinde fiber ve matriks özellikleri, fiber yönleri, malzemenin homojen olup olmaması, yüksek elyaf-hacim oranı gibi farklılıklarından ötürü zorluklar yaşanmaktadır. Bu farklılıklardan dolayı yaşanan sıkıntıyı en aza indirmek için araştırmacılar, kompozitlerin delinmesinde konvensiyonel delme işleminin etkisini incelemişlerdir (Sivasankaran, 2008).

Havacılık ve otomotiv sanayilerinde kompozit elemanlarının montajının günümüzde matkapla konvensiyonel delme işlemi en ekonomik ve etkili işlem prosesi olarak karşımıza çıkmaktadır (Tsao, 2008).

Kompozit malzemelerin delinmesi esnasında birçok problemler ortaya çıkmaktadır. Fiber sıyrılması, tabaka ayrılması beyazlaşma (matriks deformasyonu) vb. gibi problemler, kompozit malzemelerin delinmesi esnasında sıkça karşılaşılan problemlerdir. Bu problemler kompozit malzemenin anizotropik yapısından dolayı ortaya çıkabilmektedir. Fiber takviyeli kompozitleri oluşturan bileşenler yumuşak matriks ve sert fiberler olması nedeniyle anizotropik davranış açığa çıkmaktadır. Herhangi bir kompozitin işlenmesi durumunda kesme prosesinin doğru ve etkin bir şekilde anlaşılması büyük önem arz etmektedir (Lubin, 1982).

Karbon fiber takviyeli kompozitlerin pratik olarak işlenebilmesi sırasında düşük itme kuvveti iyi bir delik yüzeyi ve düşük tabaka ayrılması hasarının ortaya çıkabilmesi için optimum işleme parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yüksek kalitede delme işleminin yapılabilmesi için proses parametrelerinin optimizasyonu önemli bir kriterdir.

2.6. Yüzey Pürüzlülüğü

Makine parçalarının işlenmesi sırasında en çok talep edilen müşteri isteklerinden biri de, işlenmiş parçanın yüzey kalitesinin iyi olmasıdır. Pürüzlülük ve yüzey dokusunun ölçüm uygulamaları, otomobil ve diğer metal işleme endüstrileri gibi

geleneksel alanlarda kullanılır. İmal edilen parçaların yüzeyleri, tepeler ve çukurlar ile düzensiz bir yüzey profiline sahiptir; yani düz değildir (Arafat, 2009; Polak, 1999).

İşlenmiş bir yüzeyin pürüzlülüğü üç ana kusurdan ve hatadan oluşmuştur. Bunlar;

1. Pürüzlülük; takım hareketinin ve şeklinin bitmesiyle oluşan
2. Dalgalanma; işlem mekanizmasındaki değişim nedeniyle
3. Form; yerleştirmedeki kaba hatalar (Barnes ve ark., 1999)

Yüzey pürüzlülüğü, parçanın şekillendirilmesinden sonra genellikle parça yüzeyinde meydana gelen girinti ve çıkıntılar, yani bozuklukların ortalama değeri olarak tanımlanır (Davim ve ark., 2001).

Yüzey pürüzlülüğünün başlıca önemi; yataklar, dişliler vb. sürtünen makine parçaları üzerindeki etkisidir. Özellikle birbiriyle temas halindeki bir parça çiftinin en sert olanının yüzeyi çok pürüzlü ise, çok yüksek aşınma oranı meydana gelecektir (Arafat, 2009; Polak, 1999). Bu durumun sonucunda parça ömrünün kısalmasına ve verimli çalışmamlarına sebep olmaktadır.

Konvansiyonel ve konvansiyonel olmayan imalat yöntemlerinde yüzey pürüzlülüğünü etkileyen birçok faktör vardır. Bunlar; malzemenin cinsi, kesici takımın cinsi, kesme hızı ve ilerleme oranı, kesme derinliği, sıcaklık, soğutma sıvısı ve tezgahın konstrüksiyonu gibi faktörlerdir (Özel ve ark., 2003). Ancak değişmeye neden olan faktörlerin etkileri birbirinden farklı ve bağımsız olabilecekleri gibi birbirleri ile ilişkili de olabilirler (Özler ve ark., 2000). Genelde pürüzlülük, üretim işleminden kaynaklanan çok küçük düzensizliklerden oluşur (Drozda, 1983).

Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi standartlarda belirtilmiş kriterlere göre yapılmaktadır. Bu kriterlere göre pürüzler, yüzeye dik olan bir kesitte, belirli bir numune uzunluğu boyunca, belirli bir referans profiline ve profil ortalama çizgisine göre tayin edilir (Akkurt, 1998). Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından yüzey pürüzlülüğü parametreleri ve pürüzlülük tespit kuralları belirlenmiştir.

2.6.1. Yüzey Pürüzlülüğünü Etkileyen Faktörler

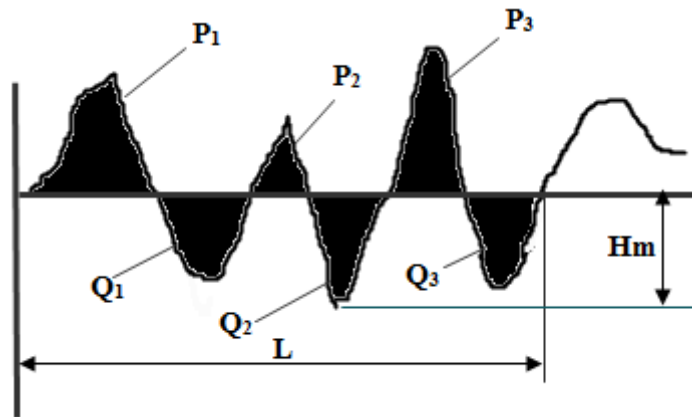
Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. En önemlileri aşağıda listelenmiştir.

- İşlenen malzemede bağlamadan dolayı oluşan deformasyon,
- İlerleme mekanizmasındaki düzensizlikler,

- İşlenen malzemedeki yapı bozuklukları,
- Kırılgan malzemelerin işlenmesi sırasında düzensiz talaş akışı,
- Kolay şekillendirilebilir malzemeler düşük kesme hızlarında işlendiği zaman, işlenen malzeme yüzeyindeki yırtılmalar,
- Talaş akışının sebep olduğu bozukluk,
- Kesme hızında meydana gelen düzensizlikler,
- İlerleme hızında meydana gelen düzensizlikler,
- Kesme esnasındaki talaş derinliği,
- Kesici takımın soğutulma ve yağlanma koşulları,
- İşlenen malzemenin kimyasal bileşimi ve metalurjik (atomik) yapısı,
- Kesicinin tasarımı, geometrisi ve kesme kapasitesi,
- Takım tezgahının tipi, rijitliği, çalışma şartları ve titreşim,
- Kalıp ve bağlama aparatları,
- İşlenen malzemedan talaş kaldırma şekli,
- Yatak ve takımlarda oluşacak geometrik bozukluklar, vb. (Arafat, 2009)

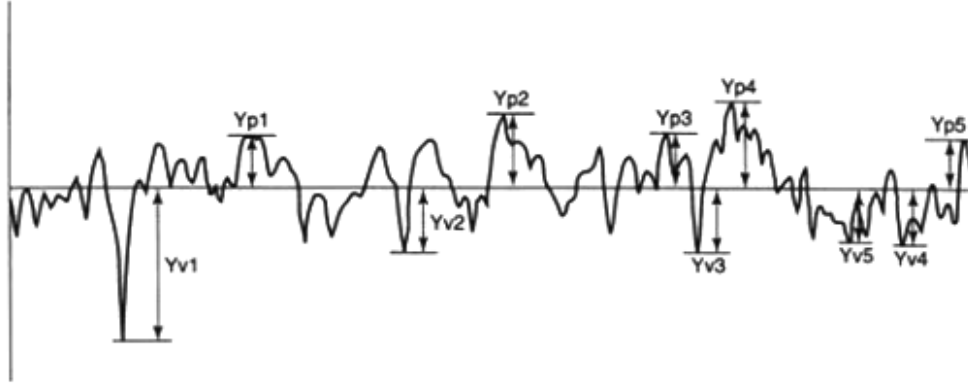
2.6.2. Yüzey Pürüzlülük Parametreleri

Yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde birden fazla parametre mevcuttur. Yüzeyde oluşan girinti ve çıkıntıların alan bakımından eşitlendiği orta eksenin üstünde ve altında kalan alanların aritmetik ortalamasını veren çizgiler arası mesafe R_a olarak adlandırılmaktadır. Ortalama yüzey pürüzlülüğünü veren grafik Şekil 2.15 'deki gibidir.



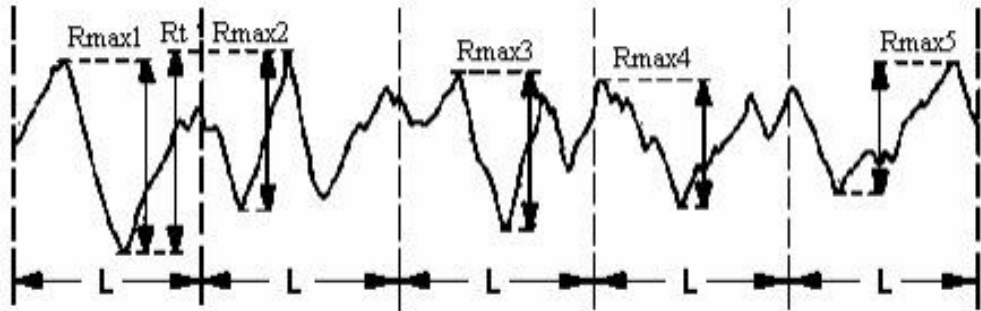
Şekil 2.15. Ortalama yüzey pürüzlülüğün tanımlanması (R_a)

Şekil 2.16 'da değerlendirme aralıklarındaki en yüksek beş çıkıntı ile en derin beş girintinin mutlak değerlerinin ortalaması R_z olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.16. Ortalama pürüz yüksekliğinin tanımlanması (R_z)

Şekil 2.17 'de eğri aralığındaki filtre edilmemiş pürüzlülüğün en yüksek çıkıntısı ile en derin girintisi arasındaki mesafe R_{max} parametresi olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.17. Maksimum yükseklik değerinin tayini (R_{max})

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzemeler ve Temini

Bu çalışmada kullanılan epoksi reçine ticari olarak bulunan ve Momentive firması tarafından sağlanmış olan MGS-L285 laminasyon reçinesidir. Bu reçine düşük viskoziteli ve iki fazlı olup (%80-90 diglisidil eter bisfenol A ve %10-20 alifabit diglisidil eter karışımı) kürleştiricisi ise yine Momentive firması tarafından sağlanan MGS-H285 (%70-80 sikloalifatik amin ve %10-30 polioksil alkil amin karışımı) dir. Kürleşme işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilir ve jelleşme zamanı firmanın belirttiği oranlarda (Ağırlıkça %25) yaklaşık 3-4 saattir. Bu reçine vakum infüzyon yöntemi ile fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde tercih edilen reçine grubundandır.

Tez çalışmalarında kullanılan CNT 'ler düşük maliyetleri ve epoksi reçineler içerisindeki homojen dağıtılabilişliğinin kolay olması sebebiyle tercih edilmiştir. CNT 'ler NanoCyl firmasından tedarik edilmiş olup 50 nm dış çapta ve 10-30 µm uzunluğundadır.

Örgü karbon fiberler Türkiye 'den Dost Kimya A.Ş. firmasından temin edilmiş olup alana bağlı yoğunlukları 200 gr/m² 'dir. Özellikleri Çizelge 3.1 'deki gibidir.

Çizelge 3.1. Karbon Fiber Kumaşın Özellikleri

	Elyaf Çapı (µm)	Yoğunluk(g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Örgü Karbon Fiber	7	1.76	3950	238

3.2. Numunelerin Hazırlanması

3.2.1. Karbon Nanotüpün Polimer İçerisine Dağıtılması

CNT 'lerin epoksi içinde homojen bir şekilde dağıtılabilmesi için uçlu sonikatör kullanılmıştır. İlk olarak, epoksi reçine miktarı üretimi gerçekleştirilmek istenen nanokompozit plakalarının hacimsel oranına göre hesaplanmış daha sonrada CNT 'ler epoksi reçinenin ağırlıkça % 0.3 'ü olması için uygun miktarda tartılmıştır. Karışım 15 dakikalık periyotlarla 1 saat Şekil 3.1 'deki uçlu sonikatörde ve 1 saat ultrasonik banyoda karıştırılmıştır. Karışma sonunda karışım oda sıcaklığında su banyosu içinde

bekletilmiştir. Karışım en sonunda ağırlıkça % 25 kürleştirici ile mekanik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra elyafa emdirilmeye hazır hale getirilmiştir.



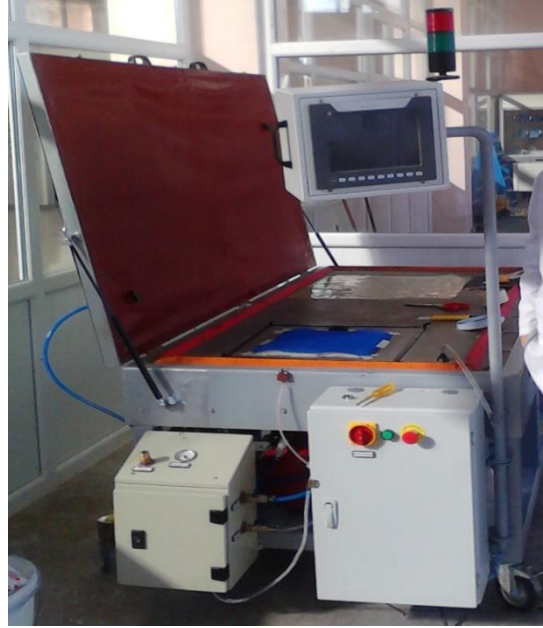
Şekil 3.1. CNT 'nin epoksi içerisinde dağıtılmasını sağlayan sonikatör

3.3. Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Kompozitlerin Üretimi

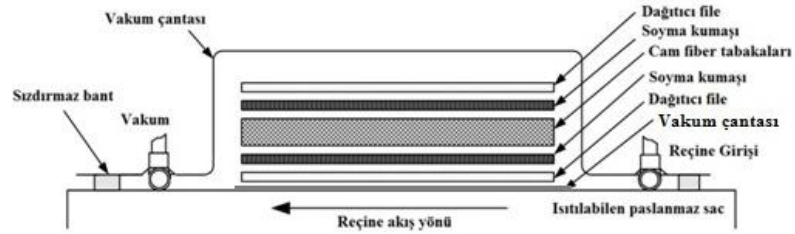
Vakum infüzyon yöntemi tabakalı kompozitlerin üretiminde son yıllarda yaygın olarak tercih edilen bir metottur (Gören ve Ataş, 2008). Literatürde farklı adlar ile bulunabilen bu yöntem (Ragondet, 2005), birbirinden küçük farklılıklar ile ayrılrsa da temelde kuru fiber yığınının vakum etkisi altında sıvı reçine tarafından ıslatılması prensibine dayanmaktadır (Eskizeybek, 2012). Vakum infüzyon yöntemi maliyet ucuzluğu, farklı büyüklüklerde kompozit üretiminde imkan sağlaması sebebiyle tercih edilmektedir. Ayrıca, kompozit tabakaların içerdiği hava kabarcığı hatalarını en aza indirir ve imalatdan kaynaklanan hurda oluşumunu azaltır (Khattab, 2005). Bu bölümde vakum infüzyon yöntemi ile karbon elyaf/epoksi, CNT-karbon elyaf/epoksi nanokompozit levhaların üretimi anlatılacaktır. Üretimde kullanılan vakum infüzyon ünitesi Şekil 3.2. de gösterilmiştir.

Vakum infüzyon ünitesi basit olarak sıcaklığı ve vakum basıncı kontrol edilebilen paslanmaz çelik saç ve vakum pompasından oluşmaktadır. Paslanmaz çelik yüzeyi öncelikle tinerle temizlendi. Malzemelerin tezgah üzerinde yerleri belirlenerek kenarlarından sızdırmazlık bantları çekildi. Bu belirlenen bölge içerisindeki yüzeye ince ve yüksek sıcaklığa dayanıklı vakum poşeti yerleştirildi. Vakum poşetinin üzerine ilk kat olarak epoksinin kılcal kanallarda ilerlemesini sağlayan dağıtıcı file ve onun üzerine kompozit levhadan ayrılmasını sağlayan soyma kumaşı serildi. Bu tabakaların üzerine 200x350 mm olarak kesilmiş 12 tabaka örgü karbon fiber kumaş yerleştirildi. Elyafların üzerine tekrar filenin ve vakum poşetinin kolay ayrılması için soyma kumaşı ve son

olarak dağıtıcı filenin serilmesiyle üzeri son aşamaya getirilmiştir. Burada hem alta hemde üst kısma dağıtıcı filenin kullanılması fiber tabakalarının tamamının ıslanması ve epoksinin homojen olarak dağılmasını sağlayacaktır. Epoksinin elyaf lar üzerine nüfus etmesini sağlayacak giriş ve vakum işleminin yapılacağı çıkış spiralleri elyafların etrafına elyaf uzunluğunda kesilerek yerleştirildi.



Şekil 3.2. Vakum infüzyon ünitesi



Şekil 3.3. Vakum İnfüzyon üretim işleminde malzeme üretiminde kullanılan yardımcı bileşenlerin yerleşiminin şematik gösterimi (Gören ve Ataş, 2008)

Son olarak çift vakum poşetleme oluşturularak karbon elyaf katmanlarına epoksi gönderilmesine hazır hale getirildi. Numune boyutlarının büyük olmasından kaçınılarak CNT/epoksi karışımının karbon fiberler tarafından filtrelene etkisi azaltılmıştır. İşlemlerin şematik gösterimi Şekil 3.3 'te gösterilmiştir.

Burada ağırlıkça % 0,3 CNT içeren epoksi karışımını hazırlamak için yeterli miktarda katmanları ıslatmaya yetecek kadar epoksi reçine (150 gr) tartıldıktan sonra nanopartiküllerin reçine içinde dağıtma işlemi önceki bölümlerde anlatıldığı gibi gerçekleşmiştir.

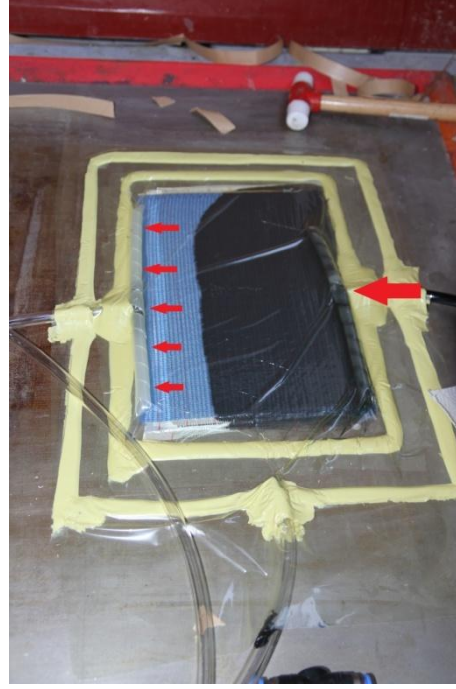
Epoksi, CNT/epoksi karışımı karbon elyafların içine gönderilmeden önce ağırlıkça % 25 kürleştirici katılarak 5 dk boyunca mekanik karıştırıcı ile karıştırıldı. Üretimde içinde nanopartikül olan karışımların partiküllerin elyaf üzerine daha homojen dağılmasını sağlamak için çift vakum yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde yaygın olarak kullanılan metottan farklı olarak ilk vakum poşetleme bittikten sonra bir kat daha vakum poşeti geçirilerek sızdırmazlık sağlanmıştır. Şekil 3.4 CNT katkılı ve katkısız vakum bölgelerini göstermektedir.



Şekil 3.4. Katkılı ve katkısız kompozit malzeme üretim şekli

Reçine elyaflar üzerine salınmadan önce dış vakum torbası içindeki hava 0.8 bar vakum uygulanarak çekildi. İlk vakum torbasındaki iç vakum ise 0.3 bar değerinde tutuldu. Daha sonra, emme girişi açılarak sırasıyla karışımlar elyafların içerisine gönderildi. Oluşturulan dış vakum ile karbon fiber tabakalarının rahatlamasına ve dolayısıyla tabakalar arasındaki mesafenin açılmasına imkan tanıyarak karışımların tabakalar arasına nüfuziyetinin artması sağlandı. İç vakum kademeli olarak 0.8 bar 'a kadar yükseltildi ve saf epoksinin ve diğer partiküllü karışımların yavaş ve kontrollü bir şekilde ilerlemesi ile fiberlerin tam olarak ıslatılması sağlandı. Bu aşamadan sonra dış vakum boşaltılarak sadece iç vakum etkisiyle fiberler sıkıştırıldı. Epoksi karışımının elyaflara nüfuz etmesi Şekil 3.5 'te görülmektedir. Üretilen nanokompozit levhalar oda

sıcaklığında k rlenmesiyle proses tamamlandı. Vakum infüzyon yöntemiyle üretim sonucunda kompozit malzemeler hazır hale gelmiştir.



şekil 3.5. Epoksinin Elyafırları İslatması

3.4. Delik Delme Süreci

Çalışmada, delik delme işlemine başlamadan önce $2,4\pm0,1$ mm kalınlığında 200x350 mm boyutlarında olan kompozit malzemeler, CNC tezgah üzerine yerleştirilmeleri için 65x115 mm boyutlarında kesilmiştir. Her malzeme, şekil 3.6 (a) 'da üzerine 12 tane delik açabilecek imkan sağlayan  elik destekleme blokları arasında sıkıştırılmıştır. Deneyler aynı kesme parametreleri değerinde aynı parça levha üzerinde üçer tekrarlı olacak şekilde yapılmıştır. Delme işleminin gerçekleşmesinde Selçuk Üniversitesi Araştırma ve Uygulama Merkezinde ( SOMER) yer alan şekil 3.6 (b) 'deki Mazak Variaxis 500 CNC işleme merkezinde gerçekleşmiştir. Kesme parametrelerinin ölçülmesinde Kistler model 9257B dinamometre ve Dynoware yazılımı kullanılmıştır. Dinamometre sistemi bağlama aparatı yardımıyla destekleme bloklarının hemen altına sabitlenmiştir. Böyle bir dinamometre sisteminde kesici takım iş parçası malzemesini kestiğinde kuvvet takım boyunca dinamometreye uygulanır.



Şekil 3.6. a) Dinamometre ve destekleme bloğu b) Mazak CNC tezgahı

Günümüzde kullanılan matkap ucu geometrileri geleneksel kesme kenarının kesme hareketini büyük miktarda geliştirirken, takım malzemeleri de performansı ve takım ömrünü önemli derecede arttırmıştır. Karbür helis matkaplarda işlem ve tezgaha bağlı olarak, daha düşük kesme hızlarında, daha yüksek ilerlemelerde çalışırlar. Sinterlenmiş karbürün yüksek eğilme direnci sayesinde, rijit koşullarda çapın 8 katına kadar takım uzunluğu kullanmak mümkündür. Bu oran özel imalat halinde 12 ila 14 kata kadar çıkabilir. Sinterlenmiş karbür matkap ucu yüksek işleme verimi, çok yönlülük, uzun ve güvenilir takım ömrü sağlar.



Şekil 3.7. Kaplamasız sinterlenenmiş karbür matkap ucu

Yapılan deneylerde kullanılacak parametreler belirlenirken deneylerin yapıldığı tezgah ve diğer araç gereçlerin kapasitesi sınırları içerisinde kalmak şartıyla; bu konuyla alakalı daha önceden yapılmış deneyler ve literatür çalışmaları ayrıca günümüz endüstrideki imalat malzemeleri üreticilerinin belirlediği değerler dikkate alınmıştır. Böylelikle kullanılan değerler hem literatür hemde sanayi ile senkronize hale gelmiştir.

Deneylerde kullanılan kesici takım ve kesme parametreleri Çizelge 3.2. 'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Deneylerde kullanılan malzeme, kesici takım ve kesme parametreleri

Malzeme	Takım	İlerleme (f)	Kesme Hızı (v)
Karbon Elyaf/Epoksi	Ø6 mm 118° Sinterlenmiş Karbür	0.005 mm/dev	50 m/dk 67 m/dk 90 m/dk
CNT-Karbon Elyaf/Epoksi		0.05 mm/dev	
		0.1 mm/dev	
		0.2 mm/dev	
		0.4 mm/dev	

Çalışmalarda matkap ucu olarak yüksek aşınma ve eğilme direnci, yüksek işleme verimine sahip, uzun ve güvenilir takım ömrü sağlayan Şekil 3.7 'deki 118° uç açılı kaplamasız sinterlenmiş karbür kullanılmış ve herbir kesme parametresi üçer tekrarlı olacak şekilde, 6 mm çapta delinmesiyle proses tamamlanmıştır. Aynı uç aşınma standartlarını aşmadan tekrar tekrar kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kesme hızı ve ilerleme oranı değerleri literatürde yapılan çalışmalar ışığında; yüksek kesme hızlarının termal düzensizlikleri arttırmış olması ve yüksek ilerleme oranlarının malzeme giriş ve çıkış yüzeylerindeki deformasyon bölgelerini genişlettiği sonuçları dikkate alınarak belirlenmiştir.

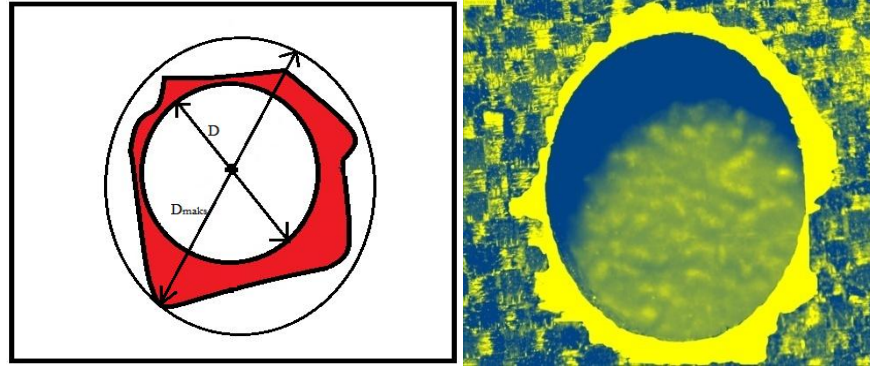
3.5. Deformasyon Oluşumu ve Deformasyon Faktörü Hesabı

Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin delinmesi sırasında iş parçası üzerinde, matkap giriş ve çıkışlarında meydana gelen hasarlara deformasyon denir. Meydana gelen deformasyonun oluşum mekanizması Şekil 3.9 'daki gibidir (Liu ve ark., 2012).

Deformasyon, kompozit levhaların delinmesinde katmanlar arasındaki istenmeyen problemler, karşılaşılan hasarları ve bozulmaları kapsamaktadır. Şekil 3.8 'deki delik etrafında oluşan deformasyon malzemenin sadece yük dayanımını ve montaj toleransını azaltmakla kalmayıp ayrıca yorulma yükleri altında malzemenin uzun ömürlü performansını da etkilemektedir (Mishra ve ark., 2010).

Malzeme üzerindeki deliklerin deformasyon seviyesini ölçmek için çokça kullanılan bir takım metotlar vardır. Bu çalışmada, delme işlemi tamamlandıktan sonra delik ve çevreleri Leica DM2700M model optik mikroskobu ile gözlemlenmiş ve

deformasyon faktörü (F_d) bağıntısı kullanılarak delik etrafındaki hasarların seviyesi belirlenmiştir.



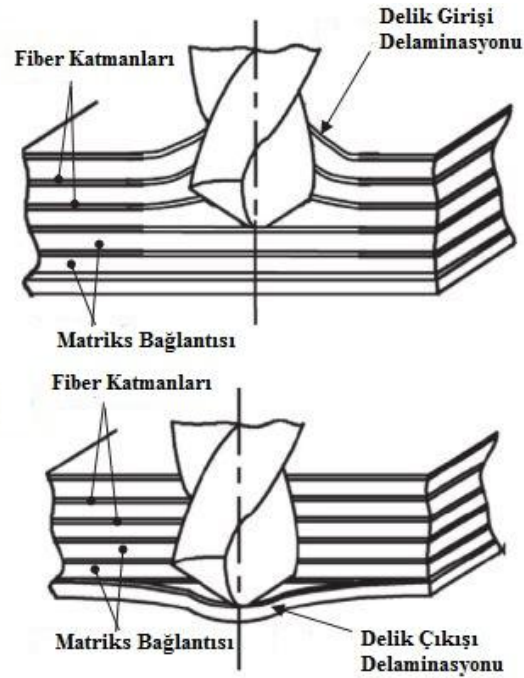
Şekil 3.8. Delik etrafındaki deformasyon

İş parçası üzerindeki deliklerin giriş ve çıkış yüzeylerindeki deformasyon faktörlerini belirlemek için, merkezi delikle eş merkezli, deformasyon bölgesinin en uzağından geçecek olan çemberin maksimum çapının (D_{maks}) bilinmesi gerekmektedir.

Deformasyon Faktörünün (F_d) değeri;

$$F_d = \frac{D_{maks}}{D} \quad (1)$$

Burada D_{maks} deformasyon bölgesindeki maksimum çapı ve D ise matkap çapını ifade etmektedir.



Şekil 3.9. Deformasyon oluşum mekanizması

Deneyisel çalışmalar sonucunda, delme destekli deformasyon oluşumları hem giriş hemde çıkış delik çevrelerinde soyulma ve tasfiye etme (dışarı itme) şeklinde gözlemlenmiştir. Soyulma deformasyonu giriş deliklerinin etrafında meydana gelmektedir. Matkap ucunun kesici kenarları kompozit plakaya temas ettiğinde, matkap ucu geometrisi vasıtasıyla oluşturduğu soyulma kuvveti katmanlar arasında ayrışmaya sebep olur ve giriş deliği etrafında bir deformasyon bölgesi oluşturur. Dışarı itme deformasyonu çıkış deliklerinin etrafında meydana gelmektedir. Matkap ucu çıkış bölgesine yaklaştığında, matkap ucu altındaki kesilmemiş katmanların kalınlığının azalmasından dolayı deformasyona daha duyarlı hale gelir. Sonuç olarak, dışarı itme deformasyonu, kesilmemiş katmanlara uygulanan itme kuvveti katmanlar arasındaki bağlanma gerilmesinden büyük olduğunda çıkış deliklerinin çevrelerinde görünmesine sebep olur (Liu ve ark., 2011). Literatür çalışmalarında, çıkış deliklerindeki deformasyonun giriş deliklerine göre daha şiddetli olduğu çoğu kez bulunmuştur. Birçok çalışmada araştırmacılar çıkış deliklerinin daha fazla önem arzettiğini dile getirmişlerdir. (Wang ve ark., 2004).

3.6. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi

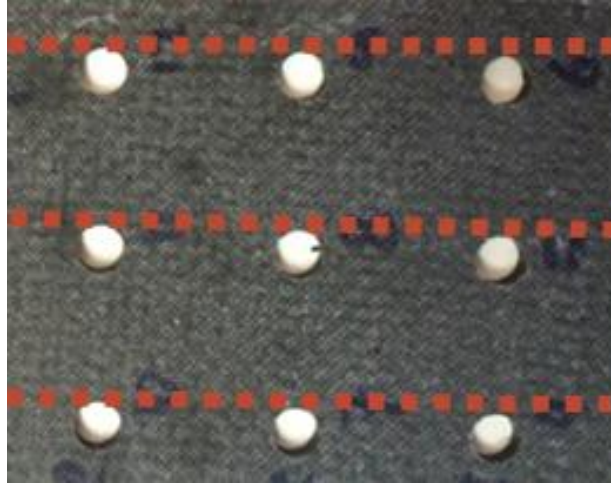
Bu çalışmada, yüzey pürüzlülük ölçme aleti olarak, dokunmalı iğne taramalı Mitutoyo SJ-301 model yüzey pürüzlülük ölçüm test cihazı kullanılmıştır. Bu test cihazı metal ve ahşap malzemelerin yüzey pürüzlülüğünün ölçümünde kullanılmaktadır. Test cihazının kısımları, ana gövde buna bağlı olan iğne uç parçası ve özel dedektörüdür. Şekil 3.10 'da test cihazının resmi görünmektedir.



Şekil 3.10. Yüzey pürüzlülük test cihazı

Yüzey pürüzlülük ölçme aletinde ana gövde içinde bir sürücü bulunmaktadır. İğne uç parçası bu sürücü üzerine monte edilmektedir. Sürücünün ilerleme hızı ölçüm sırasında saniyede 0,5 mm, dönüş sırasında ise saniyede 1 mm 'dir. Test cihazında sınır dalga boyunda farklı değer aralıklarında Ra, Rz ve Rmax parametreleri ölçülmektedir.

Yapılan deneylerde, kompozit plakalar Şekil 3.11 'de gösterildiği şekilde kesilerek delik yüzeylerindeki yüzey pürüzlülük ölçümleri, plaka kalınlığı (delik derinliği) boyunca üçer tekrarlı olacak şekilde alınıp ortalama değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.11. Plaka deliklerinin kesilmesi

Plakalar delik yüzeylerinden iğne ucunun kolay bir şekilde hareket etmesi için sabitlenmiş ve ölçümler gerçekleştirilmiştir.

3.7. Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntü Analizleri (SEM)

Taramalı elektron mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda oluşan etkilerin uygun algılayıcılarla toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar ekranına verilmektedir. Gerek ayırım gücü, gerek odak derinliği, gerekse görüntü ve analizi birleştirebilme özelliği, taramalı elektron mikroskobunun kullanım alanını genişletmektedir. Örneğin 1000x büyütmede optik

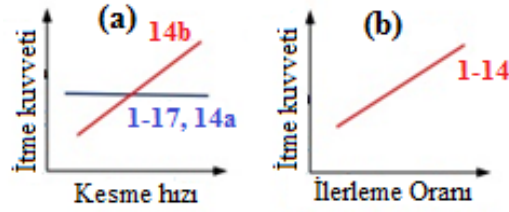
mikroskobun odak derinliği yalnızca 0.1 μm iken taramalı elektron mikroskobunun odak derinliği 0.05 nm/ye kadar inmiştir. Büyütme miktarı ise 5x-300000x arasında değişmektedir.

Yapılan çalışmalarda sadece 90 m/dk kesme hızı 0.1 mm/dev ilerleme oranındaki deliklerin SEM görüntüleri alınmış olup, malzemelerin delik yüzeylerindeki morfolojik incelemeler ZEISS Evo LS marka SEM görüntü cihazı ile incelenmiştir. SEM numunelerinin yüzeyleri, görüntülemeden önce; numune üzerine gönderilen elektronların numune üzerindeki yükünü azalmak için metalik altın ile 5-8 nm kalınlığında sputter kaplama ile kaplanmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Kesme Parametrelerinin İtme kuvveti Üzerindeki Etkisi

Kompozit levhaların delinmesi sırasında oluşan itme kuvveti kesme hızı, ilerleme oranı, takım geometrisi, delik sayısı ve farklı delme operasyonları gibi değişkenlere bağlıdır. Şekil 4.1. de literatürde kesme hızı ve ilerleme oranının itme kuvvetine etkisi özetlenmiştir.



1. Chen 1997
2. El- Sonbaty ve ark. 2004
3. Khashaba 2004
4. Sardinas ve ark. 2006
5. Velayudham ve ark. 2005
6. Singh ve ark. 2008
7. Abrao ve ark. 2008
8. Liu ve ark. 2010
9. Khashaba ve ark. 2010
10. Zhang ve ark. 2001
11. Arul ve ark. 2006
12. Fernandes ve ark. 2006
13. Durao ve ark. 2010
14. Khashaba ve ark. 2010
15. Murphy ve ark. 2002
16. Faraz ve ark. 2009
17. Rawat ve ark. 2009

Şekil 4.1. Literatürde Kesme hızının ve ilerleme oranının itme kuvvetine etkisi (Liu ve ark., 2012)

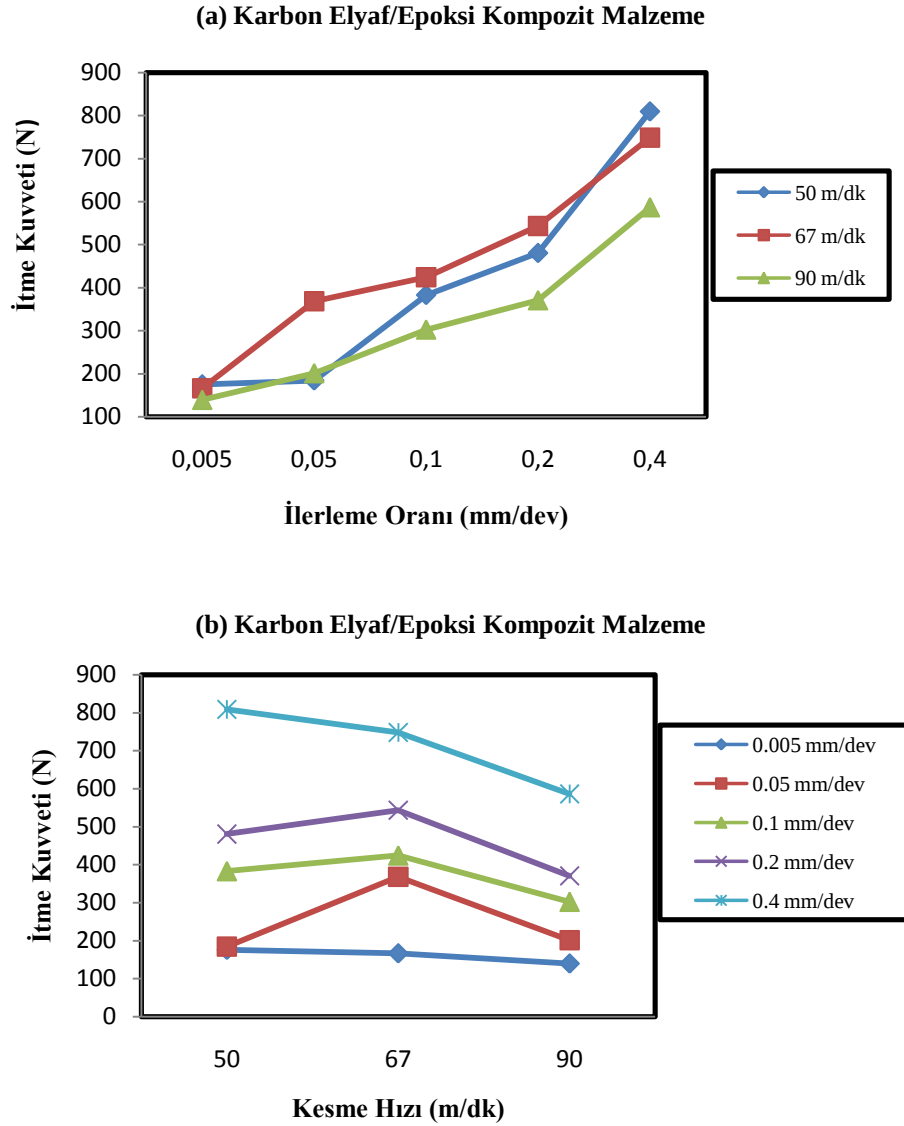
Şekil 4.1. (a) 'ya göre araştırmacıların birçoğu kesme hızının itme kuvvetine etkisinin önemsiz ve çok az etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Fakat Khashaba ve arkadaşları cam fiber kompozit malzemelerin delinmesinde kesme hızının itme kuvvetine etkisinin takım aşınmasıyla beraber değiştiğini göstermişlerdir. (b) Grafiğine göre de ilerleme oranının itme kuvveti üzerine araştırma yapan tüm araştırmacılar ilerleme oranının artmasıyla itme kuvvetinin arttığını göstermişlerdir.

Çalışmamızda sonucunda; Karbon Elyaf/Epoksi, CNT-Karbon Elyaf/Epoksi, nanokompozit levhalar için, 50 m/dk, 67 m/dk, 90 m/dk kesme hızı, 0.005 mm/dev, 0.05 mm/dev, 0.1mm/dev, 0.2 mm/dev, 0.4 mm/dev ilerleme oranı kesme parametreleri değerlerine göre itme kuvveti sonuçları Çizelge 4.1. 'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. İtme kuvveti değerleri

<i>Malzeme</i>	<i>V (m/dk)</i>	<i>f(mm/dev)</i>	<i>İtme Kuvveti (N)</i>
Karbon Elyaf/Epoksi	50	0,005	175,59
	50	0,05	184,81
	50	0,1	383,28
	50	0,2	480,79
	50	0,4	809,58
	67	0,005	166,32
	67	0,05	368,44
	67	0,1	424,53
	67	0,2	543,38
	67	0,4	748,66
	90	0,005	139,44
	90	0,05	201,37
	90	0,1	302,82
	90	0,2	370,87
	90	0,4	586,91
CNT-Karbon Elyaf/Epoksi	50	0,005	175,20
	50	0,05	234,76
	50	0,1	394,83
	50	0,2	495,62
	50	0,4	828,01
	67	0,005	156,80
	67	0,05	386,87
	67	0,1	452,77
	67	0,2	616,52
	67	0,4	756,26
	90	0,005	133,26
	90	0,05	231,09
	90	0,1	394,14
	90	0,2	434,71
	90	0,4	597,87

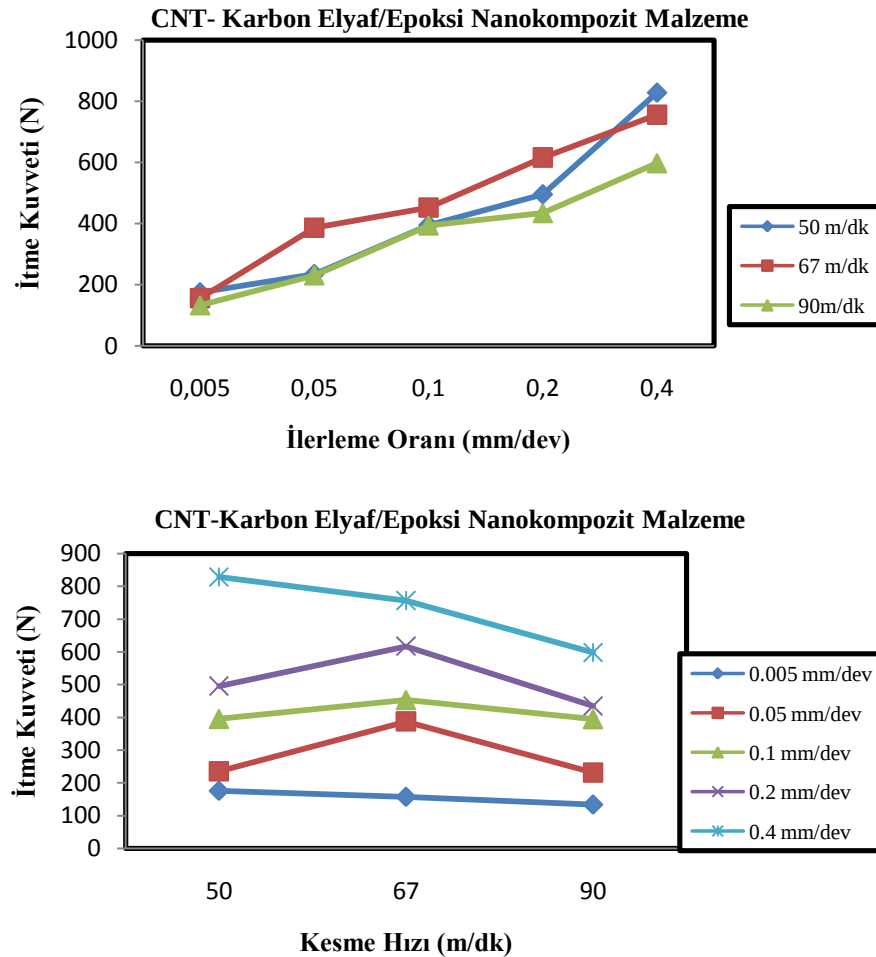
Malzemelerin kesme parametleri olan kesme hızının ve ilerleme oranının itme kuvvetine etkisi aşağıda grafikler ile ifade edilmiştir.



Şekil 4.2. Karbon Elyaf/Epoksi kompozit malzemenin delinmesinde kesme parametrelerinin itme kuvvetine etkisi

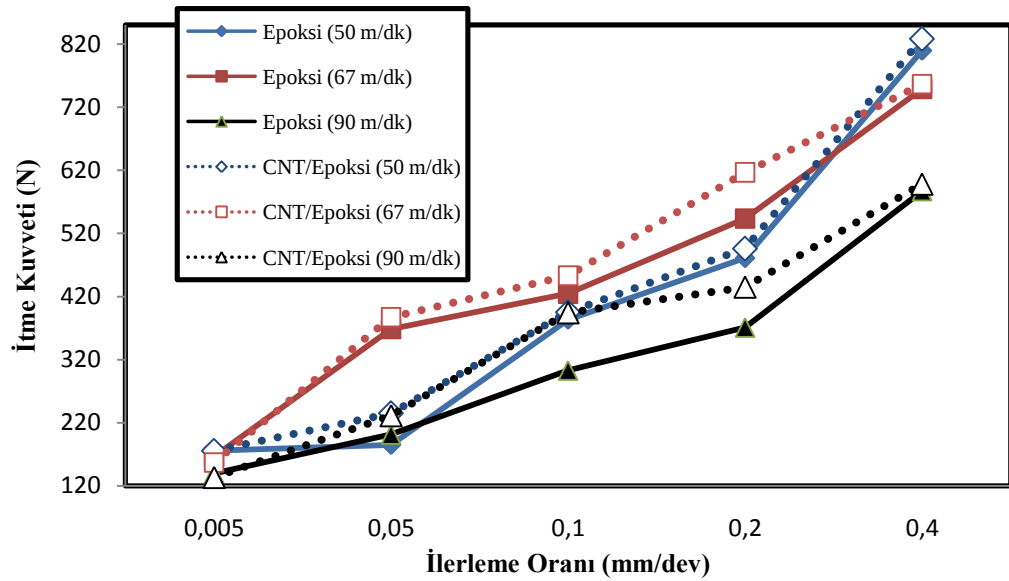
Karbon Elyaf/Epoksi kompozit malzemelerin 50 m/dk, 67 m/dk, 90 m/dk kesme hızı, 0.005 mm/dev, 0.05 mm/dev, 0.1 mm/dev, 0.2 mm/dev, 0.4 mm/dev ilerleme hızı aralıklarındaki itme kuvvetleri (N) değişimi Şekil 4.2. deki gibidir. Şekil 4.2. (a) 'da sürekli artan ilerleme oranı için itme kuvveti değerleri sürekli artmaktadır. Başka bir ifadeyle ilerleme oranı arttıkça takım ucunun malzeme üzerine uyguladığı itme kuvveti artmaktadır. En düşük ilerleme oranında (0.005 mm/dev); en düşük itme kuvveti 90 m/dk 'da, en yüksek itme kuvveti ise 50 m/dk 'da görülmektedir. En büyük ilerleme oranı değerinde (0.4 mm/dev); en düşük itme kuvveti yine 90 m/dk 'da, en yüksek itme kuvvetide yine 50 m/dk 'da gözlemlenmiştir. Düşük ilerleme oranlarında itme kuvveti düşük değerlerde kaldığından bunun neticesi olarak malzemenin delinmeye en uygun

aralığı yine düşük ilerleme oranlarında gerçekleşecektir. En düşük itme kuvveti değerleri 90 m/dk 'da gözlemlenmekte iken, itme kuvvetinin ortalama olarak yüksek olduğu hız değeri 67 m/dk 'dır. 50 m/dk Hız değerinde ise itme kuvveti diğer hız değerleri arasında optimum bir yol izlemiştir. Şekil 4.2. (b) 'de 50 m/dk – 67 m/dk kesme hızı aralığında; itme kuvvetler için 0.4 mm/dev ilerleme oranında gözle görülebilir bir azalma, 0.005 mm/dev ilerleme oranında birbirine yakın itme kuvveti değeri gözlenmiştir. Diğer ilerleme oranı değerlerinde bu eğilim itme kuvvetinin artışı yönünde seyretmiştir. Malzeme üzerindeki termal düzensizlikler, elyaf hacim oranı ve malzeme ile takım ucu arasındaki sıcaklık etkileşimleri bu durumun ortaya çıkmasına sebep olarak gösterilebilir. Sonuç olarak en düşük itme kuvveti 90 m/dk kesme hızı, 0.005 mm/dev ilerleme oranında görünmekte iken, en yüksek itme kuvveti 50 m/dk kesme hızı, 0.4 mm/dev ilerleme oranında ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.3. CNT - Karbon Elyaf/Epoksi kompozit malzemenin delinmesinde kesme parametrelerinin itme kuvvetine etkisi

CNT katkılı Karbon Elyaf/Epoksi nanokompozit malzemenin 50 m/dk, 67 m/dk, 90 m/dk kesme hızı, 0.005 mm/dev, 0.05 mm/dev, 0.1 mm/dev, 0.2 mm/dev ve 0.4 mm/dev ilerleme oranı aralıklarındaki itme kuvveti (N) değişimi Şekil 4.3. 'deki gibidir. Şekil 4.3. (a) 'da, İlerleme oranı arttıkça malzeme üzerindeki itme kuvveti değerleri genel olarak artış göstermektedir. 90m/dk kesme hızı ve 0.005 mm/dev ilerleme oranında itme kuvveti en az, 50 m/dk kesme hızı ve 0.4 mm/dev ilerleme oranında itme kuvveti en fazla olarak bulunmuştur. Şekil 4.3. (b) de kesme hızının artması itme kuvveti üzerinde stabil olmayan sonuçlar göstermektedir. En düşük ilerleme oranında itme kuvveti değerleri kesme hızının artmasıyla birbirine yakın sonuçlar vermekteyken ve en yüksek ilerleme oranlarında sürekli azalma eğilimindedir. Diğer ara ilerleme oranı değerlerinde iki farklı durum söz konusudur. 50 - 67 m/dk Kesme hızı aralığında itme kuvveti artarken 67 – 90 m/dk kesme hızı aralığında itme kuvveti azalmıştır. Bu durumun sebebi olarakta CNT katkısız malzemenin sonuçlarına paralel olarak termal düzensizlikler ve elyaf hacim oranındaki farklılıklar olarak düşünülebilir. Sonuç olarak en düşük itme kuvveti 90 m/dk kesme hızı, 0.005 mm/dev ilerleme oranında, en yüksek itme kuvveti 50 m/kesme hızında, 0.4 mm/dev ilerleme oranında bulunmuştur.

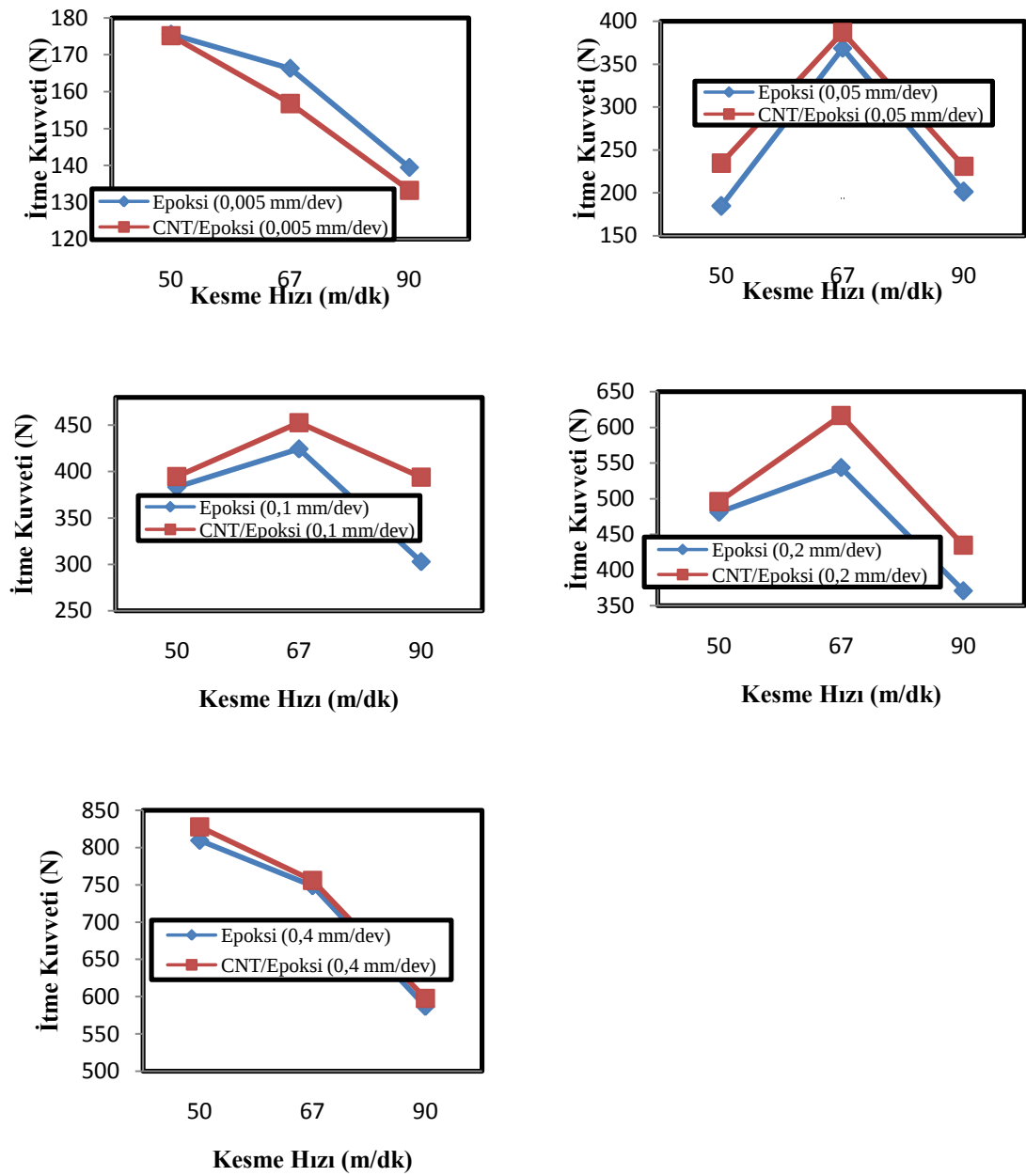


Şekil 4.4. İlerleme oranına bağlı itme kuvvetinin malzeme üzerinde etkisi

İlerleme oranının artması her iki malzemede itme kuvvetini arttırmıştır. Ortalama itme kuvveti değerleri CNT katkılı nanokompozit malzemede daha fazla olduğu görülmüştür (Şekil 4.4). Yani CNT katkılı malzemeyi debilmek için takım daha fazla bir kuvvet uygulamıştır. CNT partikülünün önemli bir özelliği olarak; matris ve elyaf arasında arayüzey tutunmasını sağlamlaştırması böyle bir sonucun çıkmasındaki sebep

olmaktadır. En düşük itme kuvveti CNT katkılı nanokompozit malzemede 50 m/dk kesme hızı, 0,005 ilerleme oranında, en yüksek itme kuvvetide 50 m/dk kesme hızı, 0,4 mm/dev ilerleme oranıyla yine CNT katkılı nanokompozit malzemede bulunmuştur.

Kesme hızının artması Şekil 4.5 'te görüldüğü gibi malzeme üzerinde farklı değişimlerin yaşanmasına sebep olmuştur. Üçer tekrarlı yapılarak ortalama itme kuvveti değeri alınan her bir parametrenin farklı sonuçlar doğurmasının sebebi malzeme üzerindeki düzensizlikler veyahut çevresel ve termal sebeplerden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Kesme hızının itme kuvvetine etkisinin stabil olmadığı görülmüştür (Kaybal, 2014).



Şekil 4.5. Kesme hızına bağlı itme kuvvetinin malzeme üzerindeki etkisi

4.2. Kesme Parametrelerinin Deformasyon Üzerindeki Etkisi

Literatürde kesme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme) deformasyon üzerindeki etkisi Şekil 4.2. de özetlenmiştir.



Şekil 4.6. Literatürde ilerlemenin ve kesme hızının deformasyona etkisi (Liu ve ark., 2012)

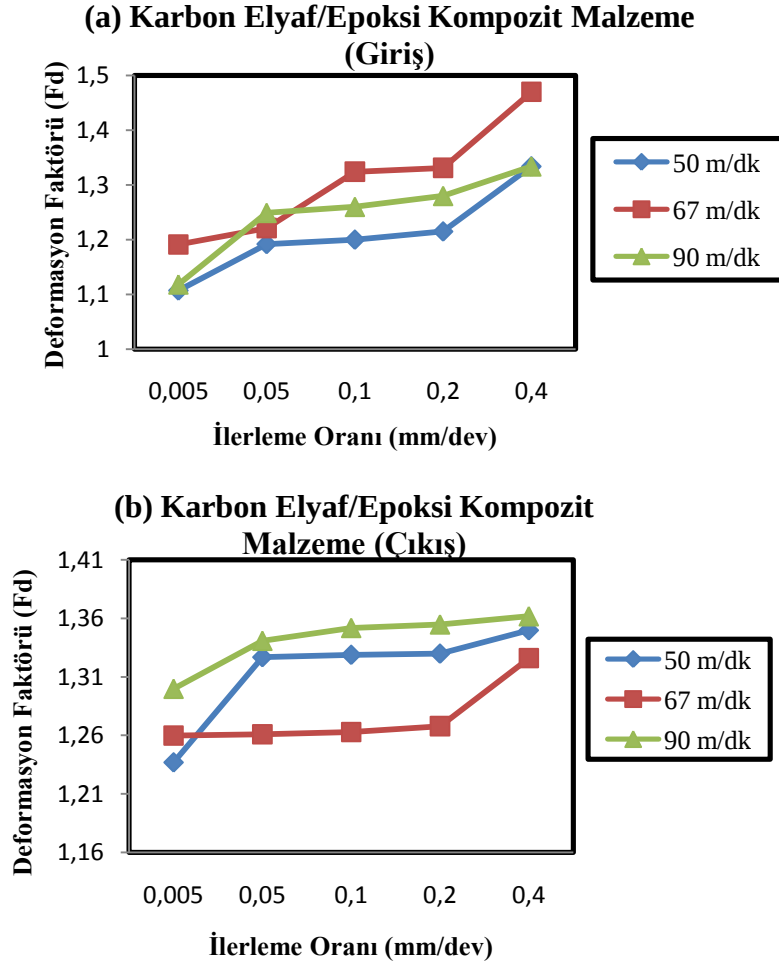
Şekil 4.6.(a) daki grafiğe göre, yapılan araştırmaların hemen hemen hepsinde deformasyon, farklı matkap uçları ve farklı kesme hızları kullanılarak yapılan çalışmaların hepsinde ilerleme oranının artması deformasyonunda arttırmıştır. Araştırmacıların bir çoğu bu duruma itme kuvvetlerinin artmasının sebep olduğunu belirtmişlerdir. (b) Grafiğinde ise araştırmacılar farklı kesme durumlarında kesme hızı ve deformasyon arasında iki farklı ilişki gözlemlemişlerdir. Davim, Sardinas ve Kılıçkap 'ın birbirlerinden bağımsız yaptıkları çalışmalarda, kompozitlerin konvensiyonel delinmesinde kesme hızının artmasıyla deformasyonunda arttığını belirtmişlerdir. Bunun yanında Khashaba örgü cam fiber kompozit levhaların konvensiyonel olarak delinmesinde, Gaitonde örgü karbon fiber kompozit levhaların yüksek hızda delinmesi şartlarında deformasyonun kesme hızı ile azaldığını gözlemlemişlerdir. Genel olarak, ilerlemenin deformasyon üzerine etkisi kesme hızından daha fazla olduğu görülmüştür. Birçok araştırmacının çalışmaları sonucunda deformasyonun minimum ilerlemede bile görüldüğü, kompozit malzemelerin delinmesinde kullanılması önerilen CNC tezgahlarına bağlı olarak delik çevresindeki deformasyonları minimize edildiğini ayrıca verimli bir delme işlemi gerçekleştirildiği belirtilmiştir.

Matematiksel hesaplamalar sonucunda Karbon Elyaf/Epoksi, CNT-Karbon Elyaf/Epoksi nanokompozit malzemelerin kesme parametrelerine karşılık deformasyon faktörü (F_d) değerleri hesaplanmıştır ve Çizelge 4.2. deki gibidir.

Çizelge 4.2. Malzemelerin deformasyon faktörleri (F_d) giriş-çıkış değerleri

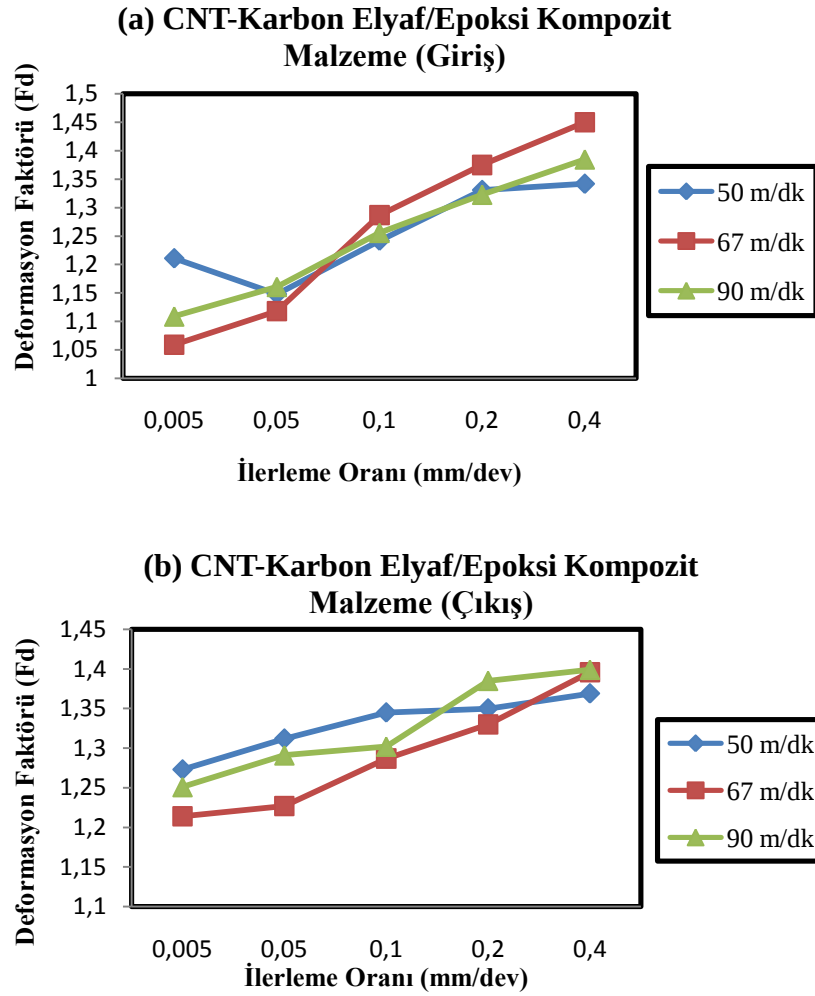
Malzeme	V (m/dk)	$f(\text{mm/dev})$	$F_d(\text{Giriş})$	$F_d(\text{Çıkış})$
Karbon Elyaf/Epoksi	50	0,005	1,107	1,237
	50	0,05	1,192	1,317
	50	0,1	1,2	1,329
	50	0,2	1,215	1,33
	50	0,4	1,334	1,35
	67	0,005	1,191	1,26
	67	0,05	1,221	1,329
	67	0,1	1,324	1,343
	67	0,2	1,331	1,368
	67	0,4	1,47	1,375
	90	0,005	1,118	1,3
	90	0,05	1,249	1,341
	90	0,1	1,26	1,352
	90	0,2	1,28	1,355
	90	0,4	1,334	1,362
CNT-Karbon Elyaf/Epoksi	50	0,005	1,089	1,273
	50	0,05	1,148	1,312
	50	0,1	1,165	1,345
	50	0,2	1,331	1,35
	50	0,4	1,342	1,369
	67	0,005	1,059	1,214
	67	0,05	1,118	1,227
	67	0,1	1,187	1,287
	67	0,2	1,375	1,33
	67	0,4	1,45	1,396
	90	0,005	1,109	1,251
	90	0,05	1,161	1,291
	90	0,1	1,176	1,302
	90	0,2	1,323	1,385
	90	0,4	1,385	1,399

Malzemelerin ilerleme kuvvetine bağlı deformasyon faktörleri (F_d) değişimi aşağıda belirtilmiştir.



Şekil 4.7. Karbon Elyaf/Epoksi malzeme için deformasyon faktörü değişimi

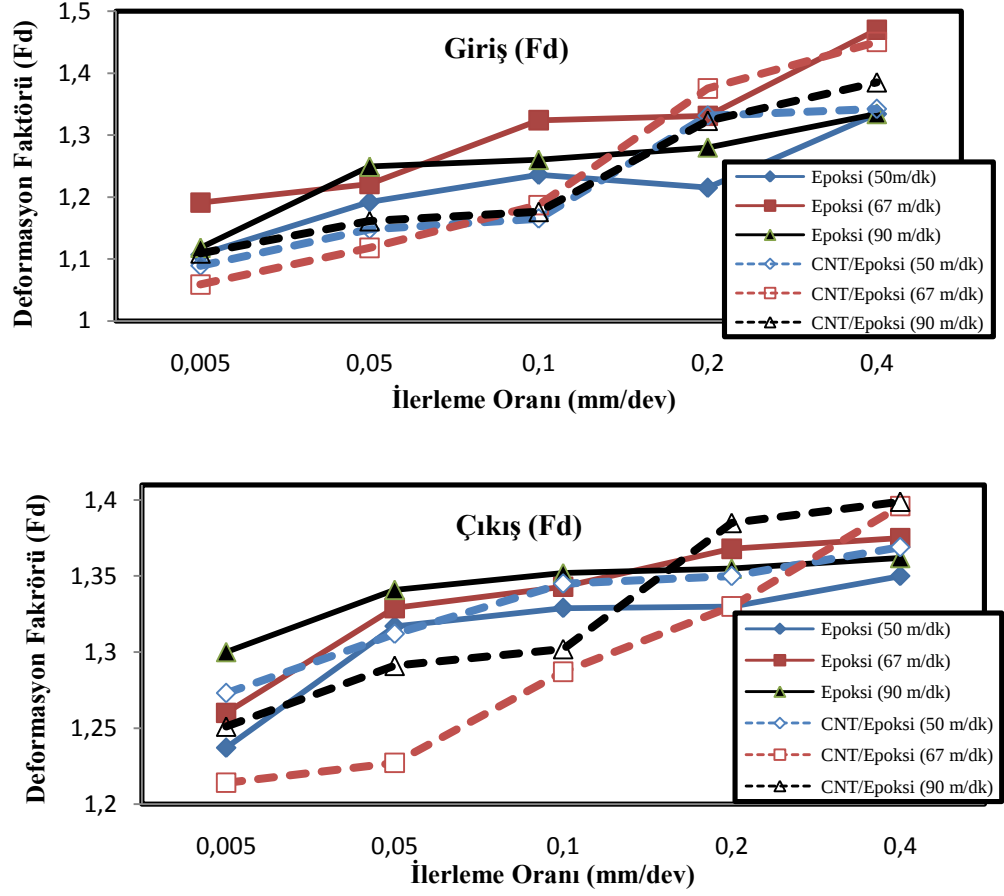
Şekil 4.7. (a) ve (b) Karbon Elyaf/Epoksi malzemesi için ilerleme oranının deformasyon faktörü üzerindeki etkisini, sırasıyla giriş ve çıkış değerlerini göstermektedir. Hem giriş hem de çıkış deformasyon faktörleri değerleri, ilerleme oranının artmasıyla artmaktadır. (a) Giriş deformasyon faktörü ortalama değeri, en fazla 67 m/dk kesme hızında en az 50 m/dk kesme hızı değerinde görülmüştür. (b) Deformasyon faktörü çıkış ortalama en yüksek deformasyon faktörü değeri 90 m/dk, en düşük ise 67 m/dk kesme hızı değerinde görülmüştür. Her iki grafikte de en düşük deformasyon faktörü 0.005 mm/dev ilerleme oranında, en yüksek deformasyon faktörü değeri de 0.4 mm/dev ilerleme oranında bulunmuştur.



Şekil 4.8. CNT-Karbon Elyaf/Epoksi nanokompozit malzeme için giriş-çıkış deformasyon faktörü değerleri

Şekil 4.8. (a) ve (b) CNT katkılı Karbon Elyaf/Epoksi malzemesi için ilerleme oranının deformasyon faktörü üzerindeki etkisini, sırasıyla giriş ve çıkış değerlerini göstermektedir. Genel olarak her iki grafik içinde ilerleme oranının artmasıyla deformasyon faktörü değerleri artmaktadır. Fakat 0.05 mm/dev ilerleme oranında bu yoruma ters bir durum söz konusudur. Bu durum malzemenin doğasından kaynaklı delme bölgesindeki düzensizliklerinden, üretim esnasında oluşan hava boşluklarından dolayı kaynaklanabilmektedir. (a) Giriş yüzeyi deformasyon faktörü en düşük 67 m/dk kesme hızı; 0.005 mm/dev ilerleme oranında, en yüksek de yine 67 m/dk kesme hızı 0.4 mm/dev ilerleme oranında hesaplanmıştır. (b) Çıkış yüzeyinde ise deformasyon faktörü en düşük 67 m/dk kesme hızı; 0.005 mm/dev ilerleme oranında, en yüksek değeri ise 90 m/dk kesme hızı; 0.4 mm/dev ilerleme hızında bulunmuştur.

Şekil 4.9 İlerleme oranına bağlı olarak malzemelere bağlı deformasyon faktörü değerleri kıyaslanmıştır.



Şekil 4.9. İlerleme oranına bağlı malzemedeki deformasyon faktörü

İlerleme oranının artması ile malzemelerin giriş ve çıkış yüzeylerindeki hesaplanan deformasyon faktörü değeri artmaktadır. 0,1 mm/dev ilerleme oranına kadar artan ilerleme oranlarında artan itme kuvvetine rağmen CNT katkılı nanokompozit malzemenin hesaplanan deformasyon faktörü değerleri katkısız kompozit malzemeye göre düşük çıkmıştır. Giriş yüzeyinde en düşük deformasyon faktörü değeri CNT katkılı malzemede 67 m/dk kesme hızı, 0,005 mm/dev ilerleme oranında bulunmuştur. En büyük deformasyon faktörü değeri ise katkısız kompozit malzemede 67 m/dk kesme hızı, 0,4 mm/dev ilerleme oranında hesaplanmıştır. Çıkış yüzeylerinde itme kuvvetine ve ilerleme oranına bağlı olarak deformasyon faktörü değerleri giriş yüzeylerine göre artış göstermektedir. Bunun sebebi olarakta; matkap ucu çıkış bölgesine yaklaştığında, matkap ucu altındaki kesilmemiş katmanların kalınlığının azalmasından dolayı deformasyona daha duyarlı hale gelmesi ve matkap ucunun itme kuvveti, katmanlar kesildikçe katmanlar arasındaki bağlanma kuvveti azalacağından delik çıkışlarında daha

fazla deformasyon olmasıdır. Çıkış yüzeyinde en düşük deformasyon faktörü değeri CNT katkılı nanokompozit malzemede 67 m/dk kesme hızında, 0,005 mm/dev ilerleme oranında, en yüksek deformasyon faktörü değeri yine katkılı nanokompozit malzemede 90 m/dk kesme hızında 0.4 mm/dev ilerleme oranında tespit edilmiştir.

4.3. Kesme Parametrelerinin İş Parçası İşleme Hızına Etkisi

Deney malzemeleri delinmeden önce ve delindikten sonraki ağırlıkları hassas terazi ile belirlenmiştir. İtme kuvvetinin temininde elde edilen grafiklerden de matkap ucunun malzeme üzerine giriş-çıkış süreleri tayin edilmiştir. Bunun sonucunda iş parçası işleme hızı (İİH) aşağıdaki göre hesaplanır.

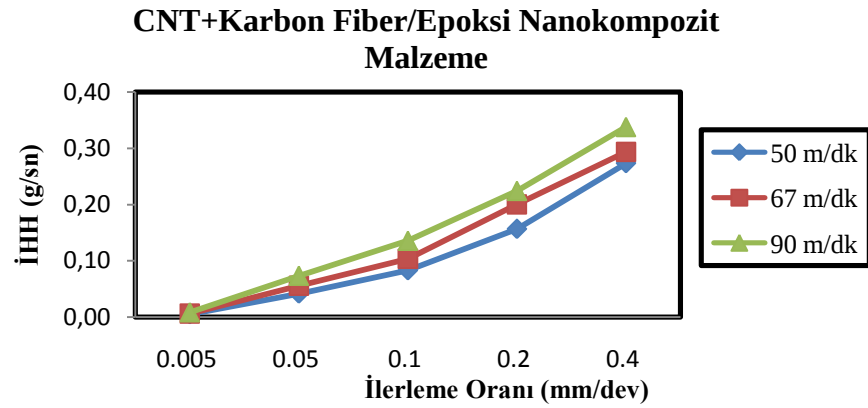
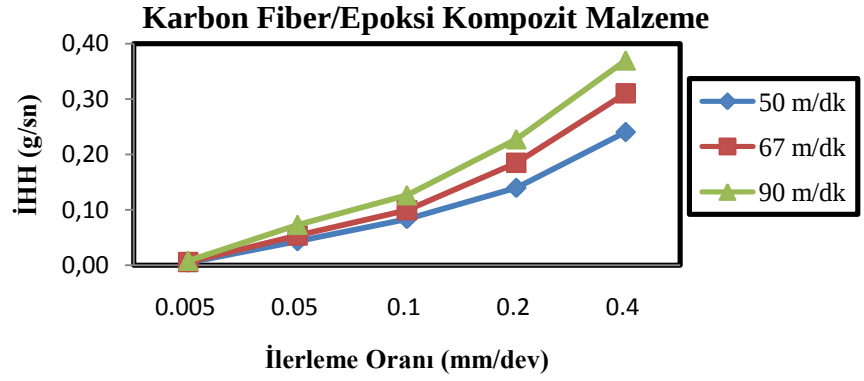
$$\text{İİH} = \frac{\text{Başlangıç Ağırlık} - \text{Son Ağırlık}}{\text{Zaman}} \text{ gram/Sn} \quad (4.1.)$$

Deneysel hesaplamalar sonucunda Karbon Elyaf/Epoksi ve CNT – Karbon Elyaf/Epoksi nanokompozit malzemelerin kesme parametrelerine karşılık iş parçası işleme hızı (İİH) değerleri hesaplanmıştır ve Çizelge 4.3. deki gibidir.

Çizelge 4.3. Malzemelerin işleme hızı değerleri

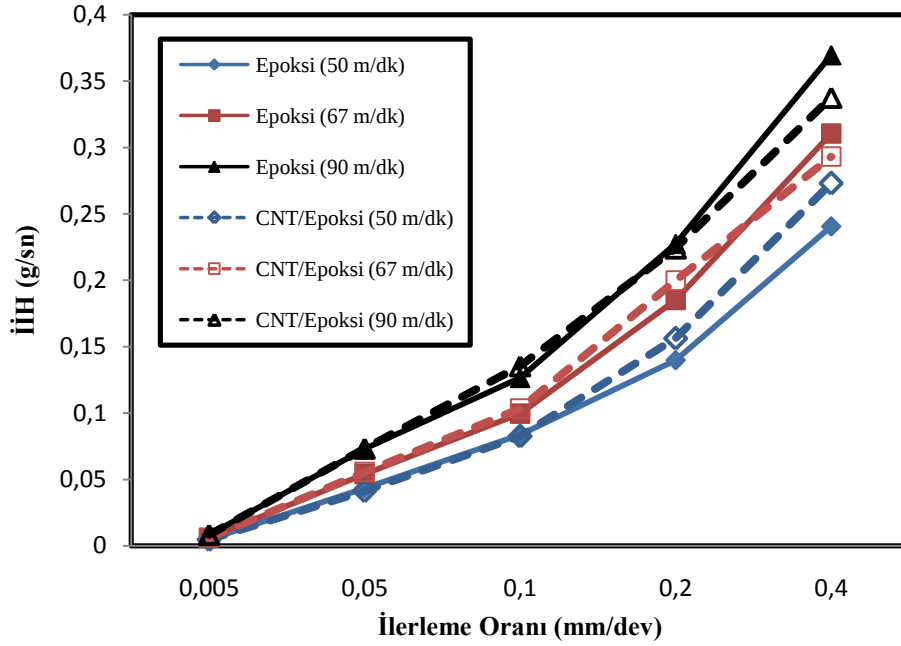
Malzeme	V (m/dk)	f (mm/dev)	Kütle Değişimi(g)	İİH(g/sn)
Karbon Elyaf/Epoksi	50	0,005	0,1158	0,0048
	50	0,05	0,1132	0,0435
	50	0,1	0,1129	0,0836
	50	0,2	0,1119	0,1399
	50	0,4	0,1083	0,2407
	67	0,005	0,1118	0,0060
	67	0,05	0,1109	0,0541
	67	0,1	0,1094	0,0995
	67	0,2	0,1074	0,1852
	67	0,4	0,1118	0,3106
	90	0,005	0,1140	0,0083
	90	0,05	0,1112	0,0732
	90	0,1	0,1152	0,1266
	90	0,2	0,1115	0,2276
	90	0,4	0,1146	0,3697
CNT-Karbon Elyaf/Epoksi	50	0,005	0,1126	0,0047
	50	0,05	0,1158	0,0414
	50	0,1	0,1157	0,0826
	50	0,2	0,1094	0,1563
	50	0,4	0,1147	0,2731
	67	0,005	0,1119	0,0060
	67	0,05	0,1111	0,0556
	67	0,1	0,1096	0,1034

	67	0,2	0,1099	0,1998
	67	0,4	0,1085	0,2932
	90	0,005	0,1133	0,0084
	90	0,05	0,1101	0,0734
	90	0,1	0,1125	0,1355
	90	0,2	0,1076	0,2242
	90	0,4	0,1013	0,3377



Şekil 4.10. Karbon Elyaf/Epoksi ve CNT+Karbon Elyaf/Epoksi nanokompozit malzemeler için kesme parametrelerinin İHH üzerine etkisi

Şekil 4.10 Hem Karbon Elyaf/Epoksi hemde CNT katkılı Karbon Elyaf/Epoksi nanokompozit malzemeler için kesme parametreleri kesme hızı ve ilerleme oranının iş parçası işleme hızına etkilerini ifade etmektedir. Malzemelerin hepsi için ortak olarak ilerleme oranının artması iş parçası işleme hızının arttığını göstermektedir. Ayrıca her bir ilerleme oranında artan kesme hızlarında yine işleme hızı artış eğilimindedir. İşleme hızının malzemeler üzerindeki değişimi Şekil 4.11 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. İİH 'nın malzemeler üzerine etkisi

Malzemelerin tüm kesme hızlarında 0.2 mm/dev ilerleme oranına kadar ki kesme parametresi aralığında iş parçası işleme hızı, CNT katkılı nanokompozit malzemede katkısız malzemeye göre fazla seyretmektedir. 50 m/dk kesme hızında 0.2 mm/dev ilerleme oranından sonrada aynı durum devam ederken, 67-90 m/dk kesme hızı aralığında 0.4 mm/dev ilerleme oranında aksi bir durumla karşılaşmış CNT katkısız kompozit malzemenin iş parçası işleme hızı CNT katkılıdan daha fazla çıkmıştır. Malzemelerde birbirinden farklı işleme hızlarının elde edilmesinin başlıca sebepleri hava boşlukları, itme kuvvetinin etkisiyle matkap ucunun elyafları kesmeden koparmaya veya çekmeye çalışmasıyla fazladan oluşan kütle kayıpları, sıcaklık değişimlerinden kaynaklı yapışma ve sıvanma gibi etkenlerden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

4.4. Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisi

Yüzey pürüzlülüğü için Karbon Elyaf/Epoksi kompozit malzeme ve CNT-Karbon Elyaf/Epoksi nanokompozit malzeme, üç farklı kesme hızı ve beş farklı ilerleme oranı kullanılarak elde edilen tekrarlı, ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri Çizelge 4.4. 'de görülmektedir.

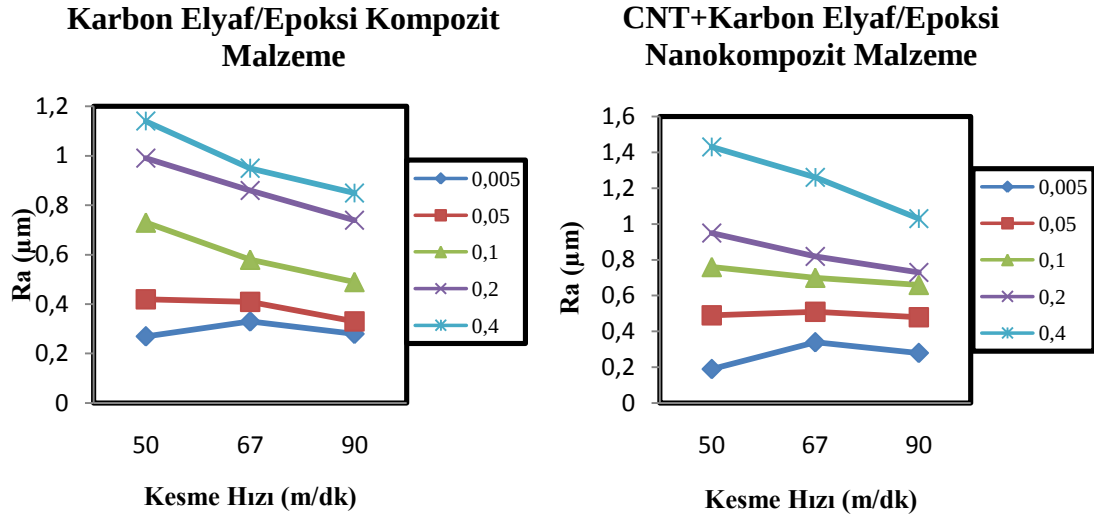
Çizelge 4.4. Yüzey pürüzlülük değerleri

Malzeme	V (m/dk)	f(mm/dev)	Ra (μm)
Karbon Elyaf/Epoksi	50	0,005	0,27
	50	0,05	0,42
	50	0,1	0,73
	50	0,2	0,99
	50	0,4	1,14
	67	0,005	0,33
	67	0,05	0,41
	67	0,1	0,58
	67	0,2	0,86
	67	0,4	0,95
	90	0,005	0,28
	90	0,05	0,33
	90	0,1	0,49
	90	0,2	0,74
	90	0,4	0,85
CNT-Karbon Elyaf/Epoksi	50	0,005	0,19
	50	0,05	0,49
	50	0,1	0,76
	50	0,2	0,95
	50	0,4	1,43
	67	0,005	0,34
	67	0,05	0,51
	67	0,1	0,7
	67	0,2	0,82
	67	0,4	1,26
	90	0,005	0,28
	90	0,05	0,48
	90	0,1	0,66
	90	0,2	0,73
	90	0,4	1,03

4.4.1. Kesme Hızının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Delik yüzeylerinde yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin (Ra) kesme hızına bağlı olarak değişimi grafiklerde verilmiştir.

Şekil 4.12 kesme hızlarının CNT katkılı ve katkısız kompozit malzeme üzerinde yüzey pürüzlülük değerlerini ifade etmektedir.

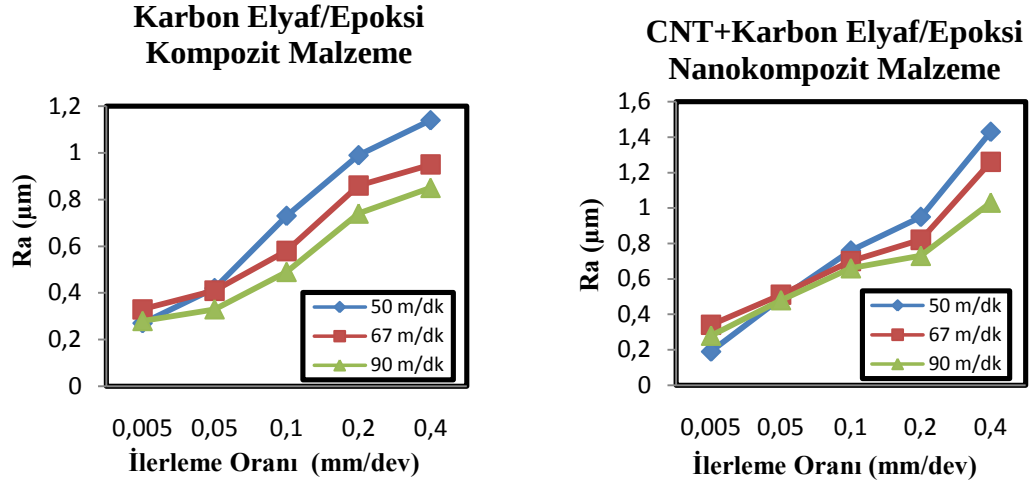


Şekil 4.12. Yüzey pürüzlülük (Ra) değerinin kesme hızına bağlı olarak değişimi

Karbon elyaf/epoksi kompozit malzemede 0.005 mm/dev ilerleme oranının 50-67 m/dk kesme hızı haricinde diğer ilerleme oranı değerlerinde kesme hızının artması yüzey pürüzlülüğünü azaltmaktadır. 0.005 mm/dev ilerleme oranının 50-67 m/dk kesme hızındaki bu farklılık malzeme içindeki hava boşluklarından veya matkap ucunun bazı elyafları keserken bazılarında koparmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Buna sebep benzer bir durumda CNT katkılı nanokompozit malzemenin 0.005 mm/dev ve 0.05 mm/dev ilerleme oranı, 50-67 m/dk kesme değerlerinde görünmektedir. Yine CNT katkısız malzemeye paralel olarak diğer kesme parametrelerinde kesme hızının artması yüzey pürüzlülüğünü azaltmıştır. Kesme hızının artması, matkap ucu ve malzeme arasındaki sıcaklık etkileşimleri epoksi matriste yumuşamaya sebebiyet vermesi ve delik yüzeylerine sıvanması delik yüzeyi kalitesini iyileştirdiği düşünülmektedir. Kesme hızı arttıkça kesme bölgesindeki sıcaklığın artması talaş oluşumunu kolaylaştırır ve yüzey pürüzlülüğünde iyileşme meydana gelir (Yavuz, 2006).

4.4.2. İlerleme Oranının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

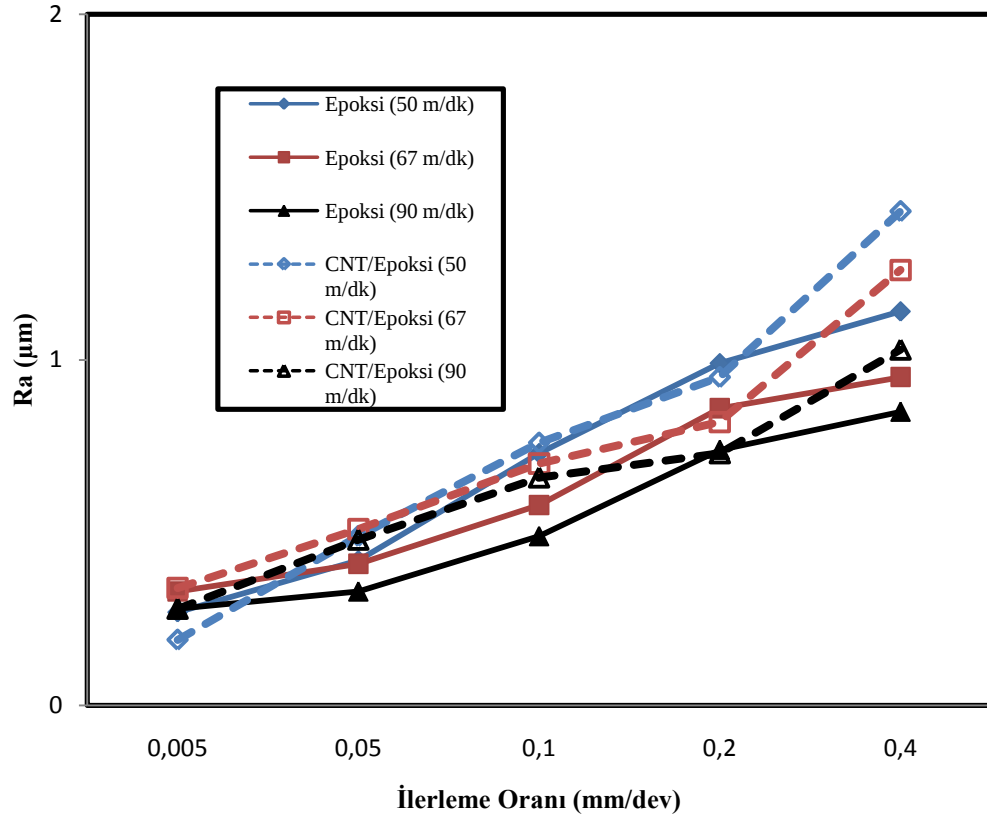
Delik yüzeylerinde yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin (Ra) ilerleme oranına bağlı olarak değişimi grafiklerde verilmiştir.



Şekil 4.13. Yüzey Pürüzlülük (Ra) değerinin ilerleme oranına göre değişimi

Deneyler de Karbon Elyaf/Epoksi ve CNT-Karbon Elyaf/Epoksi nanokompozit malzeme için ilerleme oranının artması yüzey pürüzlülük değerini arttırmıştır. Tüm malzemeler için en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri en düşük ilerleme oranında (0,005 mm/dev), en fazla ortalama yüzey pürüzlülüğüde en yüksek ilerleme oranında (0,4 mm/dev) görülmüştür. Kesme hızı sabit tutulup artan ilerleme oranının etkisinin yüzey pürüzlülüğü açısından incelendiğinde malzeme yüzeylerinde daha fazla pürüzlülük meydana getirdiği görülmüştür. Elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ilerleme oranından önemli derecede etkilendiği ve ilerleme oranı arttıkça ortalama yüzey pürüzlülük değerinin (Ra) her malzeme içinde artış gösterdiği Şekil 4.13 'de görülmektedir. İlerleme oranının artmasıyla talaşın tahliyesinin zorlanması, delik yüzeylerindeki elyaf çekmelerinin artması ve hava boşlukları bu durumun sebebi olarak gösterilebilir.

Şekil 4.14, yüzey pürüzlülük değerinin Karbon Elyaf/Epoksi ve CNT-Karbon Elyaf/Epoksi nanokompozit malzeme üzerinde kıyaslanmasını göstermektedir.



Şekil 4.14. Yüzey Pürüzlülük (Ra) değerinin malzemeler üzerindeki etkisi

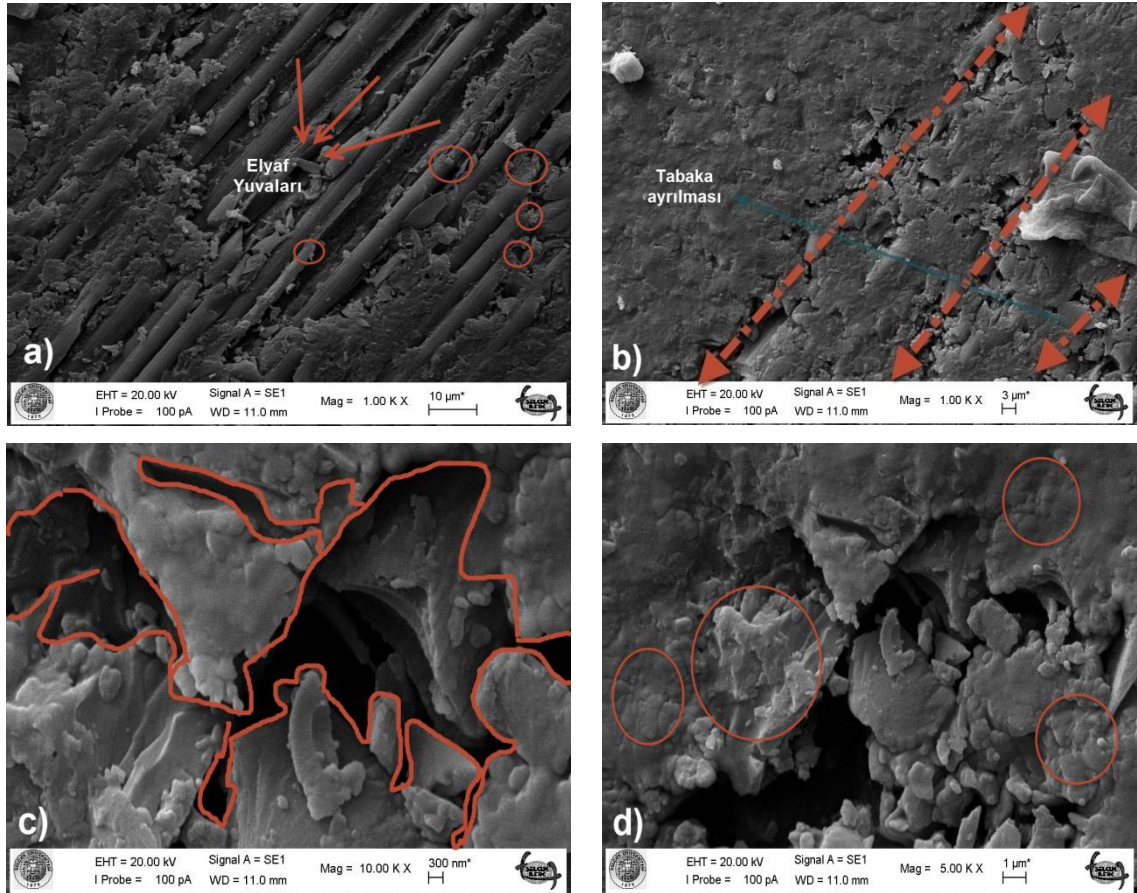
Malzemeler yüzey pürüzlülüğü açısından birbirleriyle kıyaslandığında CNT katkılı nanokompozit malzemenin 50 m/dk kesme hızı, 0.005 mm/dev ilerleme oranında delik yüzeyindeki ortalama yüzey pürüzlülük değeri en düşük olarak ölçülmüştür. Her iki malzeme de yüzey pürüzlülüğü açısından düşük ilerleme oranlarında delme işlemi yapılması daha uygun olduğu görülmüştür. Delik yüzeyleri matkap ucu tarafından yüksek ilerleme oranlarında delinmeye zorlanması daha pürüzlü yüzeyler meydana getirdiği tespit edilmiştir.

4.5. SEM Görüntü Analizleri

4.5.1. Karbon Elyaf/Epoksi Kompozit Malzeme

Epoksi matrisli karbon elyaf kompozit malzemelerin farklı boyut ve farklı büyütme oranlı SEM görüntüleri Şekil 4.15 'deki gibidir. 10 μ m boyutlu 1000x büyütme Şekil 4.15. (a) 'daki SEM görüntüsünde delik yüzeyinde kesme yüzeyine paralel elyaflar görünmektedir. Bu elyaflardan bazıları delme sırasında kesilmiş, bir kısım elyafda epoksi matrisinden ayrıldığı görülmektedir. Ayrılan elyafların delik

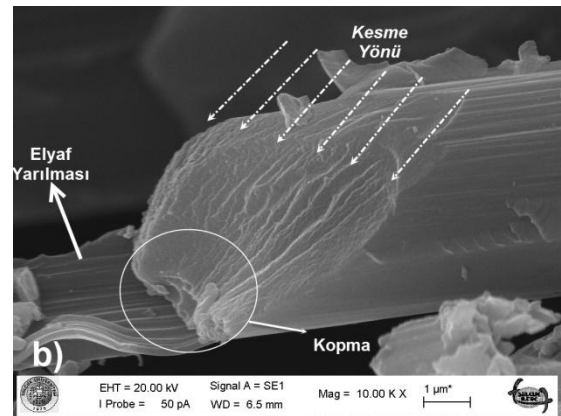
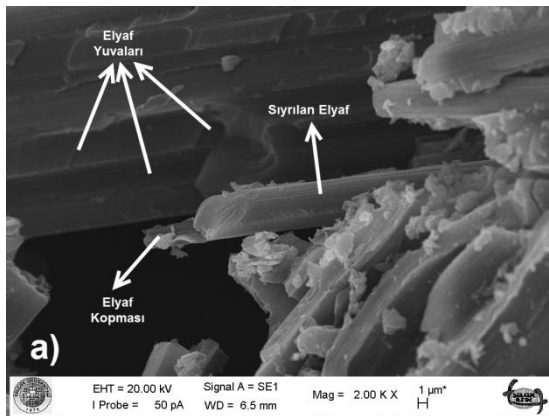
yüzeyinde bıraktığı elyaf yuvaları şekil üzerinde gösterilmiştir. 3 μm boyutlu 1000x büyütme Şekil 4.15 (b) 'deki SEM görüntüsünde Epoksi matrisin delik yüzeylerinde sıvandığı gözlemlenmiştir. Oluşan sıvanma olayı delik yüzeyinin yakın yerlerinde meydana gelen oklarla gösterilen tabaka ayrılmasını iyileştirmeye çalışmasında gözlemlenmiştir. 300 nm boyutlu 10000x büyütme tabaka ayrılmasının yüksek çözünürlüklü görüntüsü Şekil 4.15 (c) 'de tabaka ayrılması sırasında kırılma dallanmalarının olduğu görülmektedir. Bu dallanmaların sebebi kesme sırasında oluşan itme kuvveti ve yarısından çoğu kesilen elyaflardan sonra geriye kalan kısımların kopma sırasında oluşturduğu etkiden dolayıdır. Şekil 4.15. (d) 'deki görüntüde de (c) deki benzer durumlar (kırılma dallanmaları) söz konusu olup elyafları birbirine bağlayan epoksi matrisin kesilme sırasında termal etkisinden dolayı oluşan adhezyon ile kırılan epoksi parçacıklarının delik yüzeyine yapıştığı görülmektedir. Plastik deformasyona zorlanan bölgeler matkap ucu ve malzeme arasındaki ısı alış verişini artırarak delik yüzeylerini adhezyon ve sıvamaya zorlayacaktır. Sürtünme kuvvetini arttıracak bu durumlar matkap ucunun aşınmasında sebebiyet verebilmektedir.

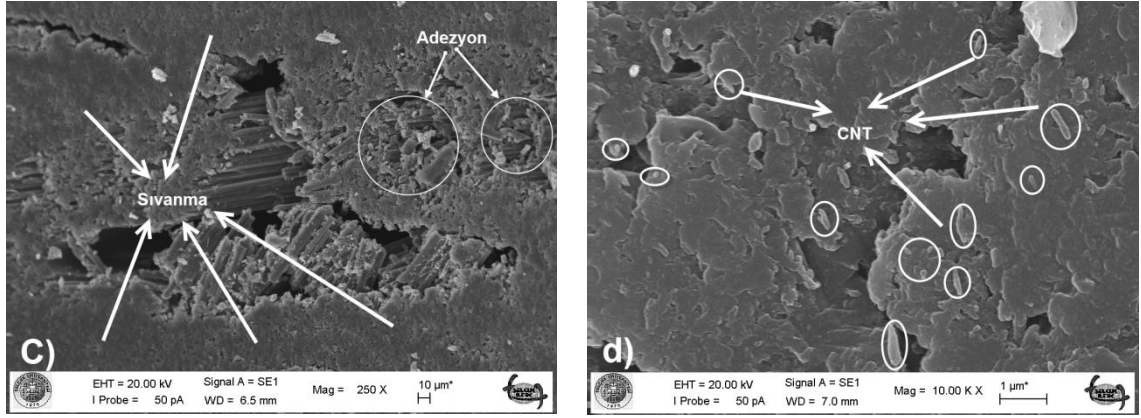


Şekil 4.15. Karbon Elyaf/Epoksi kompozit malzeme delik yüzeyi SEM görüntüleri

4.5.2. CNT + Karbon Elyaf/Epoksi Nanokompozit Malzeme

CNT katkılı epoksi matrisli karbon elyaf kompozit malzemelerin farklı boyut ve farklı büyütme oranlı SEM görüntüleri Şekil 4.16 'daki gibidir. 1 μm boyutta 2000x büyütme Şekil 4.16 (a) 'daki SEM görüntüsünde CNT katkılı nanokompozitlerin delinmesi sırasında kompozitte oluşan delik yüzeyinin görüntüsü verilmiştir. Takım ucu elyafları keserken elyaf çapının yarısından fazlasını normal kesmiş geriye kalan kısımlarını ise itme kuvvetinin etkisiyle koparmıştır (b). Ara ara yarısından fazlası kesilen elyafların düzgün kopmayıp elyaf boyunca yarılarak ilerlediğini gözlemlenmiştir (Şekil 4.16 (b)). Bazı yerlerde elyaf matris ara yüzeyi ayrılması meydana gelmiştir. Elyafları bir arada tutan epoksi matris gevrek olduğundan kesilen yüzey boyunca küçük parçalara ayrılarak kesilmiş veya kopmuştur. 10 μm boyutta 250x büyütme Şekil 4.17 (c) 'deki SEM görüntüsünde elyaflar kesilirken delik yüzeyine yakın yerlerde tabaka ayrılmaları görülmektedir. Ayrıca itme kuvveti ve kesme hızının etkisiyle, delik yüzeyi boyunca kesilen epoksi matris malzeme delik yüzeyine sıvanmıştır. Epoksinin ve kesilen karbon elyaf parçalarının yüzeye yapışmasının (Adezyon) sebeplerinden biride kesme sırasında takım ucu ve kesme yüzeyi arasında oluşan yüksek sıcaklıktan dolayı epoksi matriste meydana gelen yumuşamadan kaynaklıdır ve hem sıvamaya hemde yapışmaya sebep olmaktadır. 1 μm boyutta ve 10000x büyütme Şekil 4.16 (d) 'deki SEM görüntüsünde epoksi matrise katılan CNT 'ler gözlemlenmiştir. Bu CNT 'lerin bazıları kesme sırasında kopmuş ve boyları kısalmıştır. Bir kısmıda epoksi matris içine gömülü haldedir. Bu görüntüde CNT 'lerin epoksi içinde oldukça homojen dağıldığı görülmektedir. Gerçekte ortalama 20-30 nm boyutunda CNT 'lerin çapları burada 100-150 nm 'ye kadar çıktığı görülmektedir. Bunun sebebi CNT 'lerin epoksi ile kaplanmış olmasındandır.

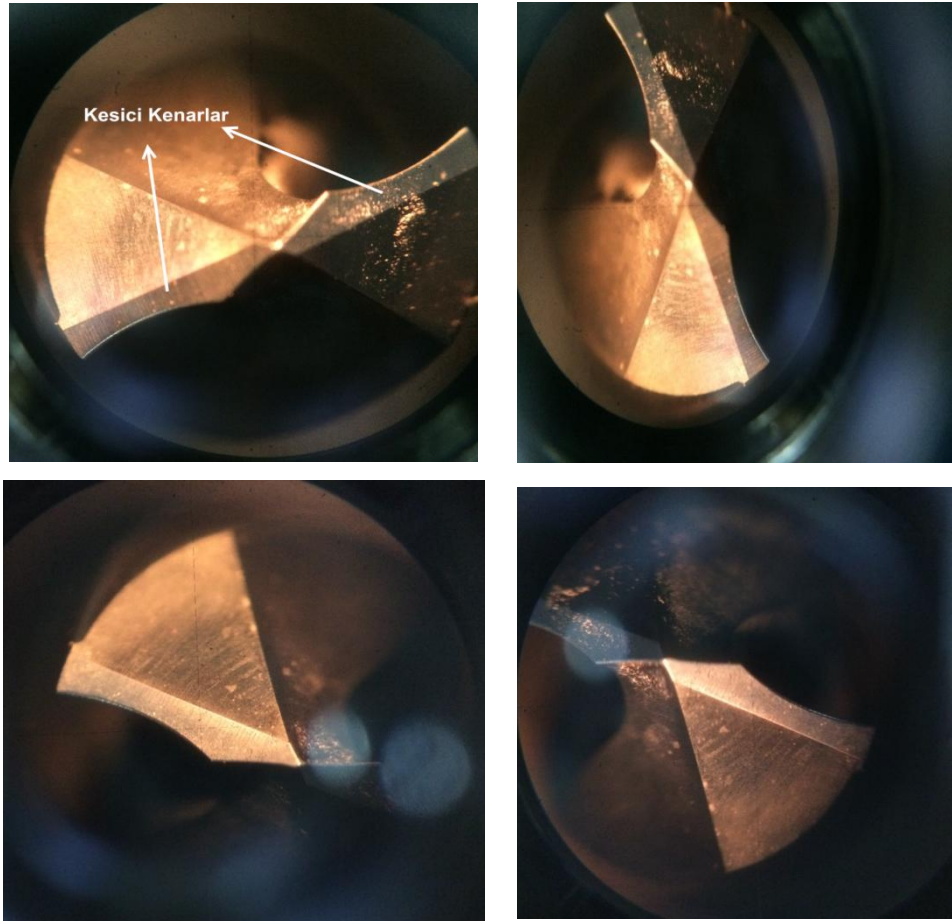




Şekil 4.16. CNT katkılı Karbon Elyaf/Epoksi nanokompozit malzeme delik yüzeyi SEM görüntüleri

4.6. Takım Ucunun İncelenmesi

Şekil 4.17 'de takım ucu kaplamasız sinterlenmiş karbürün takım aşınması mikroskopi altındaki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.17. Sinterlenmiş karbür takım ucu aşınma mikroskopi görüntüsü

Tekrar tekrar kullanılan takım ucunun aşınması dikkate alınarak, yapılan deneylerde her delme işlemi sonunda takım ucu aşınma mikroskopi altında

incelenmiştir. Takım ucunun Şekil 4.17 ‘deki görüntüsünde kesme kenarları üzerinde herhangi bir ovallık ve yuvarlanmalara rastlanmamıştır. Kaplamasız siterlenmiş karbür takım ucu karbon elyaf kompozit malzemelerin delinmesinde kullanılan takım uçları arasında iyi bir seçim olabileceğini göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında vakum infüzyon metodu ile üretilen epoksi matrisli kompozit malzemede ve CNT nanopartikül katkılı epoksi matrisli nanokompozit malzemede kesme parametrelerinin işlenebilirlik özelliklerine katkısı incelenmiştir. Ayrıca delik yüzeylerindeki yüzey pürüzlülüğü değerleri hesaplanmış, CNT nanopartikülünün delik yüzeylerindeki etkisi SEM fotoğrafları ile analiz edilmiştir. Deneysel çalışmalar neticesinde kesme parametrelerinin; itme kuvvetine, deformasyon faktörüne, işleme hızına ve yüzey pürüzlülüğüne etki ettiği görülmüştür. Karbon elyaf kompozit malzemelerin delinmesinde, malzemenin karmaşık yapısından dolayı değişik sonuçlar görülebilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- İlerleme oranının artması matkap ucunun malzemeler üzerinde delmek için uyguladığı itme kuvvetini arttırmıştır.
- CNT katkılı nanokompozit malzemenin delinmesi için matkap ucu malzeme üzerine CNT katkısız malzemeye göre daha fazla bir kuvvet uygulamıştır.
- CNT katkılı nanokompozit malzemede en düşük itme kuvveti 90 m/dk kesme hızında 0.005 ilerleme oranında görülmüştür.
- Kesme hızının itme kuvvetine etkisi malzemeler üzerinde stabil olmadığı tespit edilmiştir.
- Malzemelerin düşük ilerleme oranlarında delinmesi daha az deformasyona sebebiyet vermektedir.
- Giriş yüzeyinde en düşük deformasyon faktörü değeri 67 m/dk kesme hızında, 0.005 mm/dev ilerleme oranında bulunmuştur. Çıkış yüzeyinde en düşük deformasyon faktörü 67 m/dk kesme hızında 0.005 mm/dev ilerleme oranında bulunmuştur.
- Çıkış delik yüzeylerindeki deformasyonun giriş deliklerine göre daha fazla olduğu görülmüştür.
- İş parçası işleme hızı, her iki malzeme için hem kesme hızının artmasıyla hemde ilerleme oranının artmasıyla artmaktadır. Her iki malzemede de 90 m/dk kesme hızı ve 0.4 mm/dev ilerleme oranında iş parçası işleme hızı maksimumdur. Yine

bu değerlerde CNT katkısız kompozit malzemede işleme hızı CNT katkılı nanokompozit malzemeden daha fazladır.

- İtme Kuvvetinin etkisiyle meydana gelen tabaka ayrışması ile tabaka aralarına termal etkilerle sıvanan talaşlardan iş parçası işleme hızı azalmıştır. Kütle değişimi en düşük kesme hızı (50 m/dk) ve ilerleme oranında (0.005 mm/dev) her iki mazleme için en düşüktür.
- Malzeme kusuru olarak kabul ettiğimiz hava boşlukları dikkate alınarak ölçümü yapılan yüzey pürüzlülüğünde ilerleme oranı arttıkça pürüzlülük artmış, azalmasıyla birlikte pürüzlülük azalmıştır. Diğer kesme parametresi kesme hızının yüzey pürüzlülüğe etkisi; kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azalma eğiliminde yol izlemiştir. Düşük ilerleme oranında (0,005 mm/dev) CNT katkılı nanokompozit malzeme, katkısız kompozit malzemeye göre delik yüzey pürüzlülüğü daha azdır.
- CNT katkısız epoksi matrisli kompozit malzemelerin SEM görüntü analizlerinde, kesilmiş ve yuvalarından sıyrılmış elyaflar gözlemlenmiştir. Termal etkilerden dolayı epoksi matrisin yumuşaması sonucu oluşan sıvanma ve yapışma (adezyon) olayları, delik yüzeylerinde oluşan tabaka ayrışmalarını kapatmaya ve iyileştirmeye çalışıldığında görülmüştür. Tabaka ayrılmalarının etrafında itme kuvvetinin sebep olduğu kırılma dallanmalarıda ayrıca tespit edilmiştir.
- CNT katkılı epoksi matrisli nanokompozit malzemelerin SEM analizlerinde elyafların kopmasına, kesilmesine ve yarılmasına örnek görüntüler alınmıştır. Epoksi matris ve karbon elyaf parçaları sıcaklık ve kesme parametrelerinin etkisiyle delik yüzeylerinde adezyon (yapışma) ve sıvanmaya sebep olduğu görülmüştür. Termal etkiler ile oluşan epoksi matristeki yumuşama ayrılan katmanları iyileştirdiğide tespit edilmiştir. Ayrıca malzeme içine katılan CNT nanopartiküllerinin çapları ve boylarının değiştiği ve malzemeye homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir.
- Takım aşınmasında dikkate alındığı deneylerde, aşınması için minimum değer olan 0.3 mm değerine ulaşılmamış ve takım ucunda gözle görülür herhangi bir aşınma görülmemiştir.

5.2 Öneriler

Bu çalışmada incelemeler kesme hızı, ilerleme oranı ve malzeme karakteristiği üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Kompozit malzemede delik delme işlemleri sanayide montaj işleri için yaygın olarak kullanıldığından delik kaliteleri çok önem arz etmektedir. Delik kalitesine etki eden hasar bölgelerini azaltıcı yönde, takım aşınması ve ömrü üzerine, farklı tipte ve farklı çapta takım uçları kullanılarak deneyler genişletilebilir. Ayrıca delik yüzeylerindeki çatlak başlangıcı ve ömrü için yorulma analizleri ve farklı kompozit malzeme üretim teknikleride irdelenecek çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abrao, A.M., Rubio, J.C., Faria, P.E., Davim, J.P., 2008, The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite, *Materials and Design*, Volume 29, Pages 508–513
- Advani, S.G. and Sozer, E.M., 2003, Process modeling in composites manufacturing, *CRC Press*, NY USA.al., 2004, [2+1] cycloaddition for cross-linking SWCNTs, *Carbon*, 42 , 941-947.
- Ahmad, Z.B., 1986, The Contribution of Particle-Stretching To The Fracture Toughness of Rubber Modified Polymers, *Scripta Metallurgica*, 20 (6), 843-838.
- Akkurt, M., 1998, Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları, *Birsen Yayınevi*, 56-72, İstanbul
- Alexandre, M., Dubois, P., 2000, Polymer-Layered Silicate Nanocomposites: Preparation, Properties and Uses of a New Class of Materials, *Materials Science and Engineering R:Reports A Rewiev Journal*, 28, 1-63.
- Andrews, R. and Weisenberger, M., 2004, Carbon nanotube polymer composites, *Current Opinion In Solid State and Materials Science*, 8, 31-37.
- Arafat, M., 2009, CNC Delme İşleminde Delme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Açısından Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Armatlı, K., 1999, M. Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet-Maliyet Analizleri, *Anadolu Üniversitesi Yayınları*, Eskişehir.
- Aztekin, K., 2010, Termoset Polyester Matrisli Kompozitlerin İşlenebilirliğinin AISI 1050 İle Karşılaştırılmalı Olarak Araştırılması, *Balıkesir Üniversitesi, Fen Bil. Ens.*
- Bağcı, İ., 2006, Epoksi Reçinesi ile Nanokompozit Sentezi Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bil. Ens.*
- Bağcı, E., 2014, İmal Usulleri: İşlenebilirlik Ders Notları, *Yıldız Teknik Üniversitesi*
- Barber, A.H., Cohen, S.R., Kenig, S., Wagner and H.D., 2004, Interfacial fracture energy measurements for multi-walled carbon nanotubes pulled from a polymer matrix, *Composites Science and Technology*, 64, 2283-2289.
- Barnes, S., Pashby, I.R., Hashim, A.B., 1999, Effect of Heat Treatment On The Drilling Performance of Aluminium/SiC MMC, *Applied Composite Materials*, 121-138.
- Biron, M., 2004, Thermosets and composites: technical information for plastics users, *Elsevier Science*, Amsterdam Netherlands.
- Birtane, Y. F., 2009, Sol-Jel Yöntemiyle Alümina/Silisyum Karbür Nano kompozitlerinin Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilm. Ens.*

- Budan, D.A., Basavarajappa, S., Kumar, M.P., Joshi, A.G., 2011, Influence Of Fibre Volume Reinforcement In Drilling GFRP Laminates, *Journal of Engineering Science and Technology*, Volume 6, Pages 733-744.
- Camphell, F.C., 2004, *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, Elsevier, New York.
- Chang, K., 2001, *ASM Handbook:Composites Aramid Fibers*, 21, ASM International, 107.
- Chanrasekaran, V.C.S., 2011, Role of Multiwalled Carbon Nanotube in Interlaminar Shear Strength of Epoxy/Glass Fiber/Multiwalled Carbon Nanotube Hybrid Composites, *Doktora Tezi, University of Delaware*, New Jersey, USA.
- Chen, W.C., 1997, Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Volume 37, Pages 1097-1108.
- Coleman J.N., Khan U., Gunko, Y.K., 2006, Mechanical Reinforcement of Polymers Using Carbon Nanotubes, *Advanced Materials*, 18, 689-706.
- Collins, P.G., 2000, Nanotubes for electronics, *Scientific American*, 283, 67-69.
- Çakır, M.C., 1999, İşlenebilirlik Modern Talaşlı İmalatın Esasları, Uludağ Üniversitesi, Yayın No:140, Bursa.
- Çıracı, S., 2005, Nanoteknolojide yeni ufuklar, *Bilim ve Teknik Dergisi*.
- Çini, A., 2010, Inconel 718 Malzemesinin Tornalama İşlemlerinde Yüksek Basınçlı Jet Soğutmanın Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Kuvvetlerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Davim, J.P., Antonia, C.A.C., 2001, Optimal Drilling of Particulate Metal Matrix Composites Based On Experimental and Numerical Procedures, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41, 21-31.
- Davim, P., Reis, P., 2003, Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study, *Materials and Design*, Volume 24, Pages 315-324.
- Davim, P., Reis, P., 2003, Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study, *Materials and Design*, Volume 24, Pages 315-324.
- De Garmo, E.P., Black, J.T., Kohser, R.A., 1997, *Materials and Processes in Manufacturing*, Prentice Hall, New York.
- Drozda, C., 1983, *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, Vol 1; Machining, ed. T.J. Wick Society of Manufacturing Engineers, 4.th Edition, 3-4.

- Ebbesen, T.W., Ajayan, P.M., 1992, Largescale synthesis of carbon nanotubes, *Nature*, 358, 220-222.
- El-Sonbaty, I., Khashaba, U.A., Machaly, T., 2004, Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites, *Composite Structures* 63 (3), 329-338.
- Eskizeybek, V., 2006, Paslanmaz Çelik Elyaf Takviyeli Alüminyum Kompozitlerde Yorulma Çatlak İlerlemesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üni. Fen Bil. Enstitüsü.
- Eskizeybek, V., 2012, Yüzeylerine Kimyasal Olarak Karbon Nanotüpler Bağlanmış Örgü Cam Fiber/Epoksi Nanokompozitlerin Üretimi Ve Tabakalar Arası Kırılma Davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniv. Fen Bil. Enstitüsü.
- Fan, Z., 2007, Flow and rheology of multiwalled carbon nanotubes thermoset resin suspensions in processing of glass fiber composites, *University Delaware*, NJ USA.
- Faria, P.E., Campos, R.F., Abrao, A.M., Godoy, G.C.D., Davim J.P., 2008, Thrust Force and Wear Assessment When Drilling Glass Fiber-Reinforced Polymeric Composite, *Journal of Composite Materials*, Volume 42, No:14.
- Gaitonde, V.N., Karnik, S.R., Rubio, J.C., Correia, A.E., Abrao, A.M., Davim, J.P., 2008, Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites, *Journal Of Materials Processing Technology*, Volume 208, Pages 431-438.
- Gojny, F.H., Whichmann, M.H.G., Fiedler, B., Bauhofer, W., Schulte, K., 2005, Influence of nanomodification on the mechanical and electrical properties of conventional fibre-reinforced composites, *Composites: Part A*, 36, 1525-1535.
- Gojny, F.H., Wichmann, M.H.G., Kopke, U., Fiedler, B., Schulte, K., 2004, Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites – enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube contents, *Compos Sci Technol*, 64, 2363–2371.
- Gong, X., Liu, J., Baskaran, S., Voise, R.D. and Young, J.S., 2000, Surfactant-Assisted Processing of Carbon Nanotube/Polymer Composites, *Chemistry Of Materials*, 12, 1049-1052.
- Gören A., Ataş C., 2008, Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding, *Archives of Materials Science and Engineering* 34, 117-120.
- Grilo, T.J., Paulo, R.M.F., Silva, C.R.M., Davim J.P., 2012, Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries, *Composites: Part B*.
- Gu, F.X., Karnik, R., Wang, A. And Ngssenbaum, L.E., 2007, Targeted nanoparticles for cancer therapy, *NanoToday*, 2(3), 14-21.
- Guo, D.M., Wen, Q., Gao, H., Bao, Y.J., 2012, Prediction of the cutting forces generated in the drilling of carbon fibre reinforced plastic composites using a twist drill, *Journal of Engineering Manufacture* , Volume 226.

- Guo, T., Nikolaev, P., Thess, A.; Colbert, D., Smalley, R., 1995, Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization, *Chem. Phys. Lett.* , 243, 49–54.
- Hierold, C., Helbling, T., 2007, Nanoelectromechanical sensors based on carbonnanotubes sensors and actuators, *A. Physical*, 136, 51-61.
- Iliescu, D., Gehin, D., Gutierrez, M.E., Girot, F., 2010, Modeling and tool wear in drilling of CFRP, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Volume 50, Pages 204-213.
- İsbilir O., Ghassemieh E., 2013, Numerical investigation of the effects of drill geometry on drilling induced delamination of carbon fiber reinforced composites, *Composite Structures*, Volume 105, Pages 126-133.
- İşçi, S. 2007, Kil/Pva Ve Organokil/Pva Nanokompozitlerin Sentezi Ve Karakterizasyonu,Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Jeffrey, A., 2004, Acheson, Pavel Simacek, Suresh G. Advani, Flow control using localized induction heating in a VARTM process, *Composites: Part A* 35, 159–169.
- Johnsen, B.B., Kinloch, A.J., Mohammed, R.D., Taylor, A.C., Sprenger S., 2007, Toughening mechanisms of nanoparticle-modified epoxy polymers, *Polymer*, 48(2), 530–541.
- Joseph, C., 1996, *Polymeric Materials Encyclopedia*, CRC Press Inc., USA, 3-7.
- Kaplan, Y., 2010, Delik Delmede Farklı Parametrelerin Kesme Kuvveti, Moment, Titreşim, Yüzey Püzülülüğü, Aşınma ve Çapak Oluşumuna Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Karnik, S.R., Gaitonde, V.N., Rubio, J.C., Correia, A.E., Abrao, A.M., Davim J.P., 2008, Delamination analysis in high speed of drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model, *Materials and Design*, Volume 29, Pages 1768-1776.
- Kaw A., 1997, *Mechanics of Composite Materials*, CRC Pres. Inc.,USA, 4-17.
- Kaybal, H.B., Ünüvar, A., Koyunbakan, M., Avcı, A., 2014, KETP Kompozit malzemelerin delinmesinde kesme parametrelerinin etkisinin CYM ve Taguchi tekniği kullanılarak araştırılması, *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, 23-25 Ekim, Bursa.
- Kaynak, Y., 2006, Matkap İle Delik Delme Esnasında Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvveti Ve Sıcaklığın Değişimine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Khatab, A.,2005, Exploratory Development of VARIM Process for Manufacturing High Temperature Polymer Matrix Composites, Ph.D thesis, University of Missouri, USA.

- Kılıçlı, V., 2004, Küresel grafitli dökme demirlerde kısmi östenitleme ve östemperleme ısı işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi, Ankara.
- Kıvak, T., 2007, Inconel 718'in Delinebilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kilickap, E., 2010, Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite, Expert Systems with Applications, Volume 37, Pages 6116-6122.
- Kim, J.T., Kim H.C., Kim, S.K., Kathi, J. and Rhee, K. Y., 2009, 3-Aminopropyltriethoxysilane effect on thermal and mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced epoxy composites, J. Comp. Mater., 43, 2533-2541.
- Kornmann, X., 2001, Polimer Layered Silcate Nanocomposites, EMP, Dübendorf, Switzerland, 44-66.
- Korucu, S., 2007, Delik İşlerinde Kesiciler Üzerine Etki Eden Gerilmelerin Matematiksel Olarak Modellenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kosan, 2006, Karbon Elyaf 1. Polimerik Kompozitler Sempozyumu, TMMOB Kimya Müh. Odası, İzmir, 175-184.
- Krar, F.S., Rapisorda, M., Check, F.A., 1998, Machine Tool and Manufacturing Technology, Delmer Publishers, USA.
- Le Baron, 1999, Polymer Layered Silicate Nanocomposites: An Overview, Applied Clay Science, 15, 11-29.
- Lee, H. And Neville K., 1967, Handbook of Epoxy Resin, McGraw-Hill Inc., USA, 7-17, 28-39.
- Lin, S.C., Chen, I.K., 1996, Drilling carbon fiber – reinforced composite material at high speed, Wear, Volume 194, Pages 156-162.
- Liu, D., Tang, Y., Cong, W.L., 2012, A review of mechanical drilling for composite laminates, Composite Structures, 94, 1265-1279.
- Lordi, V. and Yao, N., 1999, Molecular mechanics of binding in carbon-nanotube-polymer composites, Journal of Materials Research, 15, 2770-2779.
- Lubin, G., Dastin, S.J., 1982, Aerospace Applications of Composites, Handbook of Composites, 722-743.
- Luo, J.J. and Daniel, I.M., 2003, Characterization and Modeling of Mechanical Behavior of Polymer/Clay Nanocomposites, Compos. Sci. Technol., 63(11), 1607–1616.
- Matsumoto, T., 1985, Mesophase Pitch and Its Carbon Fibers, Pure&Appl. Chem., 57 (11), 1553-1562.

- Memiş, Ö., 2009, Balistik Amaçlı Fiber Takviyeli Polimer Metriksli Kompozitler, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bil. Enstitüsü.
- Middleton, D.H., 1990, Composite Materials in aircraft Structures, Longman Group, UK.
- Mills, B., Redford, A.H., 1983, Machinability of Engineering Materials, Applied Science Publishers, 174 syf.
- Mishra, R., Malik, J., Singh, I., Davim, P., 2010, Neural network approach for estimating the residual tensile strength after drilling in uni-directional glass fiber reinforced plastic laminates, Mater Des., 31:2790-5.
- Murphy, C., Bryne, G., Gilchrist, M.D., 2002, The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fibre reinforced epoxy composite materials, PartB: Journal of Engineering Manufacture, Volume 216:143.
- Nagarajan, V.A., Sundaram, S., Thyagarajan, K., Rajadurai, J.S., Rajan, T.P.D., 2012, Measuring delamination severity of glass fiber reinforced epoxy composites during drilling process, Society for Experimentel Mechanics, Volume 37, Pages 66-73.
- Njuguna, B.J., Pielichowski, K. and Alcock, J.R., 2007, Epoxy-Based Fibre Reinforced Nanocomposites, Advanced Engineering Materials, 9(10), 835-847.
- Olek, M., Kempa, K., Jurga, S. And Giersig, M., 2005, Nanomechanical properties of silica-coated multiwall carbon nanotubes-poly(methyl methacrylate) composites, Langmuir The ACS Journal Of Surfaces and Colloids, 21, 3146-3197.
- Oxley, P.L.B., 1989, The mechanics of machining : an analytical approach to assessing machinability, Australia.
- Özel T., Karpat, Y., 2003, Prediction of Surface Roughness and Tool Wear in Finish Dry Hard Turning Using Back Propagation Neural Network, Proceedings of The International Conference on Production Research, August 3-7, Blusburg, Virginia.
- Özler, L., Tosun, N., İnan, A., 2000, Östentik Manganlı Çeliğin Sıcak Talaşlı İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğün İncelenmesi, Turk Journal Engin. Environ. Sci., TÜBİTAK, 24, 287-296
- Palmer, W.B., Oxley, P.L.B., 1959, Mechanics of Orthogonal Machining, Proc. Inst. Mech. Engrs., 173:623
- Phadnis, V.A., Makhdum, F., Roy, A., Silberschmidt, V.V., 2013, Drilling in carbon/epoxy composites: Experimental investigations and finite element implementation, Composites: Part A, Volume 47, Pages 41-51.
- Phadnis, V.A., Makhdum, F., Roy, A., Silberschmidt, V.V., 2013, Drilling in carbon/epoxy composites: Experimental investigations and finite element implementation, Composites: Part A, Volume 47, Pages 41-51.

- Pinilla, J.L., Moliner, R., Suelves, I., Lazaro, M., Echegoyen, Y., Palacios, J., 2007, Production of hydrogen and carbon nanofibers by thermal decomposition of methane using metal catalysts in a fluidized bed reactor, *International Journal of Hydrogen Energy* , 32(18), 4821-4829.
- Piquet, R., Ferret, B., Lachaud, F., Swider, P., 2000, Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills, *Composites: Part A*, Volume 31, Pages 1107-1115.
- Plantenberg, F.S., 2002, *Tangewandte Chemie-International Edition*, 41(5), 689-714.
- Polak, T.A., Pande, C., 1999, *Engineering Measurements Methods and Intrinsic Errors*, Professional Engineering Publishing, 139-140.
- Ragondet, A., 2005, *Experimental Characterization of the Vacuum Infusion Process*, PhD thesis, *University of Nottingham*, UK.
- Rahman, M., Ramakrishna, S., Prakash, J.R.S., Tan D.C.G., 1999, Machinability study of carbon fiber reinforced composite, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 89-90, Pages 272-297.
- Rajamurugan, T.V., Shanmugam, K., Palanikumar, K., 2013, Analysis of delamination in drilling glass fiber reinforced polyester composites, *Materials and Design*, Volume 45, Pages 80-87.
- Sahin, Y., 2000, *Kompozit Malzemelere Giriş*, Gazi Kitapevi, Ankara.
- Sandvik, C., 1996, "Stainless Steel Turning", *Application Guide*. Trent, E.M., *Metal Cutting*, 3rd ed., Butterworths, London.
- Schmidt, D., Shah, D. and Giannelis, E.P., 2002, New Advances in Polymer/Layered Silicate Nanocomposites, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 6(3): 205–212.
- Shaffer, M.S.P. and Windle, A.H., 1999, Fabrication and Characterization of Carbon Nanotube/Poly(vinyl alcohol) Composites, *Advanced Materials*. 11 937-941.
- Shi, D., He, P., Lian, J., Chaud, X., Bud'ko, S.L., Beaugnon, E., Wang, L.M., Ewing, R.C. and Tournier, R., 2005, Magnetic alignment of carbon nanofibers in polymer composites and anisotropy of mechanical properties, *Journal Of Applied Physics*, 97(6), 064312/1-064312/1.
- Sivasankaran, P.N., 2008, *Experimental Analysis on Drilling Process of Composite Laminates*, Yüksek Lisans Tezi, Üniversitesi Malaysia Pahang.
- Song, Y.S. and Youn, J.R., 2005, Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites, *Carbon*, 43, 1378–1385.
- Şeker, U., 2009, *Üretim Teknolojiler Ders Notları: Delik Delme*, Gazi Üniversitesi, Ankara.

- Tepe, A., 2007, Nanoteknolojide Nano Ölçekli Yapıların Yerel Olmayan Elastisite Çerçevesinde İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tonshoff, H.L., Spintig, W., König, W., Neises, A., 1994, Machining of Holes Developments in Drilling Technology, *Annals of CIRP*, 43:551-560.
- Tsao, C.C., 2008, Thrust force and delamination of core-saw drill during drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), *Volume:37*, 22-38.
- Tsao, C.C., Hocheng, H., 2007, Effect of tool on delamination in drilling composite materials, *Int Journal of Mechanical Sciences*, Volume 49, Pages 983-988.
- Ulucay, Y., 2002, Polimer Esaslı Lif Takviyeli Kompozit Malzemelerin Arabirim Mukavemeti Üzerine Farklı Kür Metotlarının Etkisinin İncelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi*, Bursa, 7 (1):4-13.
- Ulus, H. 2012, Ark Deşarj Yöntemi İle Bor Nitrür Nano Levha Üretimi Karakterizasyonu ve Karbon Kumaş/Epoksi Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Katkısının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniv. Fen Bil. Enst.
- Uzun, G., Korkut, İ., 2011, Delme ve Frezelemedeki Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi için Deney Seti Tasarımı ve İmalatı, 6.th International Advanced Technologies Symposium, 16-18 May 2011, Elazığ.
- Velde B., 1992, Introduction to Clay Minerals, Chemistry, Origins, Uses and Environmental Significance, 1th Edition, Chapman&Hall Inc., London, Great Britain, 10-15.
- Wang, X., Wang, L.J., Tao J.P., Investigation on thrust in vibration drilling of drilling of fiber reinforced plastics. *J Mater Process Technol*, 148:239-44.
- Waslh, P. J., 2001, Carbon Fibers, *ASM Handbook*, 21,35-40.
- Wicks, S.S., Guzman deVilloria R., Wardle, B.L., 2010, Interlaminar and intralaminar reinforced of composite laminates with aligned carbon nanotubes, *Composite Science and Technology* 70, 20-28.
- Yağmur, S., 2011, Delik Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Oluşan Sıcaklığın Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yavuz, K., 2006, GGG-70 Sınıfı Kürtesel Grafitli Dökme Demir Kam Millerinin İşlenebilirliğinin Deneysel Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 3-94, Ankara
- Yurdagül, T.Z. 2007. Poliinden/poli(oksümetilen) iletken karışımlarının hazırlanması ve özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.