



**KARBON NANOTÜP KATKILI KARBON ELYAF
EPOKSİ NANOKOMPOZİTLERİN
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Hatice YAKUT PEKTÜRK

**2022
DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Bilge DEMİR**

**KARBON NANOTÜP KATKILI KARBON ELYAF EPOKSİ
NANOKOMPOZİTLERİN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Hatice YAKUT PEKTÜRK

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Bilge DEMİR**

**KARABÜK
Şubat 2022**

Hatice YAKUT PEKTÜRK tarafından hazırlanan “KARBON NANOTÜP KATKILI KARBON ELYAF EPOKSİ NANOKOMPOZİTLERİN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Bilge DEMİR
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

.....

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 02/02/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mustafa KURT (MÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Bilge DEMİR (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Yakup KAYA (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Barkın BAKIR (MÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Muhammet ELİTAŞ (BŞEÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Hatice YAKUT PEKTÜRK

ÖZET

Doktora Tezi

KARBON NANOTÜP KATKILI KARBON ELYAF EPOKSİ NANOKOMPOZİTLERİN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Hatice YAKUT PEKTÜRK

**Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:
Prof. Dr. Bilge DEMİR
Şubat 2022, 187 sayfa**

Son yıllarda oldukça popüler bir malzeme haline gelen çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT), birçok tek duvarlı karbon nanotüpün iç içe geçtiği benzersiz karbon nanotüp formları olarak tanımlanmaktadır. MWCNT'ler geniş yüzey alanları, termal ve kimyasal kararlılık, termal ve elektriksel bağlantı vb. gibi birçok benzersiz özelliğe sahiptir. Bu çalışmada NCF CFRP (Kıvrımsız Kumaş Karbon Fiber Takviyeli Polimer) kompozitin çekme özellikleri ve yorulma özellikleri MWCNT eklenerek iyileştirilmeye çalışılmıştır. İkinci olarak, MWCNT'lerin epoksi reçine içerisinde homojen dispersiyonunu (dağılım) sağlayarak bu kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için gereken optimum MWCNT miktarını belirlemesi amaçlanmıştır. Üçüncü olarak üretilen nanokompozitlerin kuru şartlarda delme performansı araştırılmıştır.

Epoksi ağırlığının % 0,5, %1, % 1,5’u olan MWCNT miktarları,çözelti içinde epoksi, triton-X 100 ve etanol ile ultrasonik bir karıştırıcıda (UIP2000hdT, Hielscher) sonike edilmiştir. Çözelti içerisinde MWCNT’lerin homojen dispersiyonunu ölçmek için UV Vis spektroskopi kullanılmıştır. Absorbans spektrumu 330 nm dalga boyu civarında pik göstermiştir.

% 0,5 MWCNT epoksi çözeltisinin absorbans spektrumunun en yüksek olduğu gözlemlenmiştir. $0^{\circ} / +45^{\circ} / 90^{\circ} / -45^{\circ}$ fiber yönlerine sahip dört eksenli (Quadriaxial) NCF CFRP kompozit plakalar, vakum infüzyon tekniği ile üretilmiş ve 48 saatboyunca 25°C sıcaklıkta kurlenmiştir. ASTM D3039'a göre çekme testi örnekleri ve eğilme yorulma testi örnekleri hazırlanmıştır. Makine yönünde (MD) kesilen kompozit numunelerin çekme testleri ve eğilme yorulma testleri yapılmıştır. Eğilme yorulma testleri altı farklı genlik ve sabit bir frekansta gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, % 0,5 MWCNT’lerin çekme dayanımını ve kopma gerinimini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Ayrıca % 0,5 MWCNT numunesi eğilme yorulma ömrü deneylerinde en yüksek değeri elde etmiştir. Numunelerin kırılma yüzeyleri taramalı electron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Bu çalışmada, delme işlemi için 14 tabakadan oluşan NCF CFRP kompozit plakalar hazırlanmıştır. Deney tasarımı; giriş delaminasyonu (Fd_g), çıkış delaminasyonu (Fd_c), giriş çapak alanı, çıkış çapak alanı, yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve itme kuvveti (N) değerlerinin minimum düzeyde elde edilmesi için delme işlemi etkileyen parametreleri belirlemeyi amaçlamıştır. Delme işleminin parametreleri olan MWCNT yüzdesi 4 seviyeden (% 0, % 0,5, % 1, % 1,5), devir sayısı 3 seviyeden (500 dev./dak. 2000 dev./dak., 3500 dev./dak.), ilerleme oranı 3 seviyeden (0,05 mm/dev., 0,10 mm/dev., 0,15 mm/dev.) ve matkap çeşidi 2 seviyeden (ALTIN, DLC) oluşmaktadır. ALTIN (Alüminyum Titanyum Nitrür Kaplamalı) ve DLC (Elmas benzeri karbon kaplamalı) matkaplar kullanılmıştır. Deney tasarımında tam faktöriyel yöntem kullanılmış her deney CFRP (Karbon Fiber Takviyeli Polimer) nanokompozit malzemeler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Optimum delik kalitesini elde etmek için delik giriş delaminasyonunun, delik çıkış delaminasyonunun, delik giriş çapak alanının ve delik çıkış çapak alanının en az olmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün ve itme kuvvetinin de düşük olması istenir bu sebeple gri ilişki analizi yöntemi kullanılmıştır. Gri ilişki deney sonuçları için normalizasyon, uzaklık matrisi, gri ilişki katsayısı, gri ilişki derecesi ve sıralama sonuçlarını elde edilmiştir.

Buna göre gri ilişki derecesinin en yüksek değeri 0,88 olarak bulunmuştur, sıralamada 1'i göstermektedir aynı zamanda bu değer deney no 33'e karşılık gelmektedir. Birden fazla performans elde ederek en iyi delik kalitesine ulaşmak için uygun değer parametre değerleri % 0,5 MWCNT içerikli NCF CFRP nanokompozit plakada 0,10 mm/dev. ilerleme oranında, 3500 dev./dak. devir sayısında ALTIN kaplamalı matkapla yapılan delme işlemidir. Varyans analizi yapılarak delme sonuçlarını etkileyen önemli parametreler elde edilmiştir. Ful faktöriyel yöntemine göre itme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, giriş delaminasyonu, çıkış delaminasyonu, delik giriş çapak alanı ve delik çıkış çapak alanı değerlerinin ayrı ayrı uygun değer delme parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışmada NCF CFRP nanokompozit malzemelerin delinmesinde çoklu performans elde ederek en iyi delik kalitesine ulaşmak için gri ilişki analizi yönteminin etkili olduğu bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler : MWCNT (çok duvarlı karbon nanotüp), CNT (Karbonnanotüp), kompozit malzemeler, NCF CFRP (kırımsız karbon fiber takviyeli polimer kompozit), nanokompozit, Triton X-100, çekme testi, eğilme yorulma testi, işlenebilirlik, delaminasyon, yüzey pürüzlülüğü, itme kuvveti, kesme kuvveti, GRA (gri ilişki analizi, ful faktöriyel, varyans analizi).

Bilim Kodu

91421

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATION OF MACHINABILITY OF CARBON FIBER EPOXY NANOCOMPOSITES WITH CARBON NANOTUBES

Hatice YAKUT PEKTÜRK

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Manufacturing Engineering**

**Thesis Advisor:
Prof. Dr. Bilge DEMİR
February 2022, 187 pages**

MWCNTs (multi-walled carbon nanotubes), which have become a popular material in recent years, are defined as unique forms of carbon nanotubes. Many single-walled carbon nanotubes are nested inside one another. MWCNTs have many unique properties such as broad surface areas, thermal and chemical stability, thermal and electric connectivity, etc. This study firstly attempts to enhance tensile properties and bending fatigue properties of NCF (non-crimp fabric carbon fiber reinforced polymer) by adding MWCNTs. Secondly, it aims to determine the required optimum amount of MWCNTs to improve the mechanical properties of these composites by providing a homogeneous distribution of MWCNTs in the epoxy resin. Thirdly, the drilling performance of the produced nanocomposites was investigated in dry conditions. MWCNT amounts of 0,5 %, 1 %, and 1,5 % by weight of epoxy were prepared by mixing them in solution with epoxy, Triton-X 100 and ethanol in an ultrasonic

processor (UIP2000hdT, Hielscher). UV Spectroscopy was used to measure the homogeneous dispersion of MWCNTs in MWCNT-epoxy suspensions. The absorbance spectrum has shown a peak around 330 nm. It has been observed that the absorbance spectrum of the 0,5 % MWCNT epoxy solution is the highest. Laminates with $0^\circ / +45^\circ / 90^\circ / -45^\circ$ quadriaxial non crimp carbon fiber fabric were fabricated by vacuum infusion technique and cured for 48 h at $25\text{ }^\circ\text{C}$ temperature. According to ASTM D3039, tensile test and bending fatigue samples were prepared. Tension tests and bending fatigue tests of composite samples cut in the machine direction (MD) were performed. Fatigue tests were carried out at six different amplitudes and a fixed frequency. Results showed that 0.5 % MWCNTs have remarkably increased the tensile strength and failure strain. The 0,5 wt. % MWCNT specimen achieved the highest value in the fatigue life experiments.

In addition, the fracture surfaces of the samples were studied by field emission scanning microscope (FESEM) and interpreted. In this study, NCF CFRP laminate consisting of 14 layers was prepared for the drilling process. The experimental design aimed to realize the minimum values of drilling process parameters such as entry delamination, exit delamination, entry burr area, exit burr area, surface roughness, thrust force, etc. The drilling process parameters are MWCNT percentage, spindle speed, feed rate, and drill type. The MWCNT percentage consists of 4 levels (% 0, % 0,5, % 1, %1,5), spindle speed consists of 3 levels (500 rev./min., 2000 rev./min., 3500 rev./min.), feed rate consists of 3 levels (0,05 mm/rev., 0,10 mm/rev., 0,15 mm/rev.), drill type consists of 2 levels (ALTIN, DLC). The full factorial method was used in the experimental design, and each experiment was performed on CFRP nanocomposite. In order to achieve optimum hole quality, it is desirable to have low surface roughness and thrust force, depending on the minimum hole entry delamination, hole exit delamination, hole entry burr area and hole exit burr area. For this reason, the Grey Relational Analysis method was used. Normalization values, distance matrix, grey relational coefficient, grey relational degree and ranking values were calculated for the grey relational test results.

Accordingly, the highest value of the grey relational degree was found to be 0.88, it shows 1 in the ranking, and at the same time, this value corresponds to experiment number 33. Using Grey Relational Analysis interpreted the results. The optimum processing parameters are % 0,5 MWCNT, 0,10 mm/rev. feed rate, 3500 rev./min., speed, and ALTiN drill type. Variance analysis showed important parameters affecting the drilling process of MWCNTs. Furthermore, optimum drilling parameters of thrust force, surface roughness, entry delamination, exit delamination, hole entry burr area and hole exit burr area values were determined separately. . Moreover, it has been found that the gray relationship analysis method effectively achieves the best hole quality by performing multiple performances in drilling NCF CFRP composite materials.

Key Word : MWCNT (multi walled carbon nanotube), CNT (carbon nanotube), composite materials, NCF CFRP (non crimp fabric carbon fiber reinforcement polymer), nanocomposite, Triton X-100, tensile test, bending fatigue test, machinability, delamination, surface roughness, thrust force, cutting force, GRA (gray relationship analysis), full factorial, analysis of variance.

Science Code : 91421

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının tamamlanmasının her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle yönlendirirken, tüm çalışmalara katkı sağlayan maddi ve manevi desteği ile çalışmamı bilimsel bir alanda şekillendiren tez danışmanım Saygıdeğer hocam Prof. Dr. Bilge DEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İşlenebilirlik deneylerinin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen, Marmara Üniversitesi Rektörü ve Teknoloji Fakültesi öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Mustafa Kurt'a, Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Dr. Öğretim Üyesi Barkın Bakır'a ve yüksek lisans öğrencisi Etem YILDIZ'a teşekkürlerimi sunarım. Kompozit malzemelerin üretiminin Boğaziçi Üniversitesi Kompozit Laboratuvarında gerçekleşmesinde yardımlarını sunan Boğaziçi Üniversitesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Nuri ERSOY'a, İstanbul Gedik Üniversitesi Öğretim Üyesi Fatih Ertuğrul Öz'e ve teknisyen Hakan MOLDUR'a teşekkürlerimi sunarım. Yorulma testi çalışmalarında desteklerini sunan Bilecik Üniversitesi Öğretim Üyesi Muhammet ELİTAŞ ve Karabük Üniversitesi doktora öğrencisi Mustafa GÖKTAŞ'a teşekkürlerimi sunarım. Yıldız Teknik Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Elif ÖZTÜRK ER'e teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarına maddi destek olan Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü'ne (KBÜBAP-17-DR-261) ve NCF CFRP kumaş desteği sağlayan METYX firmasına teşekkürlerimi sunarım. Doktora tezi boyunca desteklerini sunan Kırklareli Üniversitesi Makine Mühendisliği öğretim üyelerine ve çalışma arkadaşlarıma, İstanbul Gedik Üniversitesi Meslek Yüksekokulu Makine Programı Öğretim Görevlisi Hüseyin KAYGISIZ'a ve birlikte çalıştığım arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi desteği ile hep yanımda olan sevgili eşim Türkay PEKTÜRK'e ve sabırla annesinin tezinin bitmesini bekleyen oğlum Ahmet Aybars Pektürk'e tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR.....	x
İÇİNDEKİLER	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. SÜRFİKTAN	5
1.2. KARBON FİBER (CF)	8
1.3. NCF (KİVRİMSİZ KUMAŞ)	9
1.3.1. NCF'in Üretimi, Özellikleri Ve Uygulama Alanları	9
1.4. MATRİS.....	14
1.5. MWCNT (ÇOK DUVARLI KARBON NANOTÜP).....	15
1.6. EPOKSİ –MWCNT KARIŞIMI	19
1.7. CFRP MALZEMENİN DELİNEBİLİRLİĞİ	21
1.8. İTME KUVVETİ –DELAMİNASYON	23
1.9. MEKANİK ÖZELLİK	25
1.10. ANALİZ YÖNTEMLERİ	31
1.10.1. UV VIS Spektroskopi	31
1.10.2. Elektron Mikroskobu (SEM)	33
BÖLÜM 2	35
LİTERATÜR	35

2.1. EPOKSİ –MWCNT KARIŞIMI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR	35
2.2. MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR	36
2.3. CFRP KOMPOZİT MALZEMELERİN DELİNEBİLİRLİĞİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR	51
2.4. UV-SPEKROSKOPİ ANALİZİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR	63
 BÖLÜM 3	 68
DENEYSEL ÇALIŞMALAR MATERYAL VE YÖNTEM.....	68
3.1. NANOKOMPOZİT MALZEME ÜRETİM MATERYALLERİ VE YÖNTEMİ	68
3.1.1. MWCNT Katkılı NCF CFRP Kompozit Malzemenin Üretim Prosesi	68
3.1.1.1. Nanokompozit Malzeme Üretim Materyalleri	68
3.1.1.2. Nanokompozit Malzeme Üretim Yöntemi.....	69
3.2. MWCNT'ÜN EPOKSİ İÇERİSİNDE DAĞILIMININ KARAKTERİZE EDİLMESİ	78
3.2.1. UV VİS Spektroskopi	78
3.2.2. Çekme Testi	78
3.2.3. Yorulma Testi	79
3.2.4. SEM	81
3.3. DELME İŞLEMİ MATERYAL VE YÖNTEM	81
3.3.1. Delme İşleminde Kullanılan Materyaller	81
3.3.2. Delme İşleminde Kullanılan Yöntemler	83
3.3.2.1. İtme Kuvveti Ölçümü.....	83
3.3.2.2. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü.....	86
3.3.2.3. Delaminasyon Ölçümü.....	87
3.3.2.4. Deney Tasarımı (Doe).....	90
 BÖLÜM 4	 97
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	97
4.1. UV VİS SPEKROSKOPİ ANALİZİ SONUÇLARI	97
4.2. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI	98

4.3. YORULMA TESTİ SONUÇLARI	102
4.4. ÇEKME KIRILMASI YÜZEY MORFOLOJİSİ SONUÇLARI	107
4.5. YORULMA KIRILMASI YÜZEY MORFOLOJİSİ SONUÇLARI.....	109
4.6. DENEY TASARIMI VE GRİ İLİŞKİ ANALİZİ SONUÇLARI.....	115
4.6.1. Deney Ölçme Sonuçları.....	115
4.6.2. Delaminasyon görüntüleri	119
4.6.3. Tam Faktöriyel Tabanlı Gri ilişki Analiz Yöntemi Kullanılarak Sonuçların Analizi	125
4.6.4. İtme Kuvveti Varyans Analizi sonuçları ve değerlendirilmesi.....	134
4.6.5. Yüzey Pürüzlülüğü Varyans Analizi ve Sonuçların Değerlendirilmesi	139
4.6.6. Giriş Delaminasyonu Varyans Analizi ve Sonuçların Değerlendirilmesi	146
4.6.7. Çıkış Delaminasyonu Varyans Analizi ve Sonuçların Değerlendirilmesi	150
4.6.8. Giriş Çapak Alanı ve Sonuçların Değerlendirilmesi	155
4.6.9. Çıkış Çapak Alanı Varyans Analizi ve Sonuçların Değerlendirilmesi	158
BÖLÜM 5	162
SONUÇ	162
KAYNAKLAR	168
ÖZGEÇMİŞ	187

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Sürfaktanın genel yapısı[11]	6
Şekil 1.2 . Hava su arayüzeyi [11]	6
Şekil 1.3. Misel oluşumu [11]	7
Şekil 1.4. İçteki ve yüzeydeki sıvı molekülünün diğer moleküllerle teması.....	8
Şekil 1.5. Dört yönlü (quadriaxial) NCF (kırımsız kumaş).....	10
Şekil 1.6. Airbus A380 arka basınç bölme üretiminde NCF kumaşın serilmesi.....	12
Şekil 1.7. Airbus A400M kargo kapısı dıştan görünüş	12
Şekil 1.8. BMW M6'nın parçaları [36,37].....	12
Şekil 1.9. Dokuz Tek Parçadan ve iki ek plastik hava çıkışından oluşan alüminyum bagaj kapağı (20 kg) [37,38]	13
Şekil 1.10. İki parçadan oluşan CFRP bagaj kapağı [37,38].....	13
Şekil 1.11. Dahili FRP bagaj kapağına sahip Lamborghini Gallardo Spyder [37,38]	13
Şekil 1.12. Karbon nanotüpler a) Elmas b) Grafit c) Lonsdaleite d-f) Fulleren (C60,C540,C70) ;g) Amorphous karbon h) Karbon nanotüp [46]	15
Şekil 1.13. Farklı kiraliteye sahip üç kabuktan oluşan çok duvarlı bir karbon nanotüpün yapısı (MWCNT)	16
Şekil 1.14. MWCNT'ün morfolojik yapısı. a) Aglomera olmuş MWCNT	18
Şekil 1.15. Karbon fiber epoksi kompozitin (3,5 GPa) Kopmasının sistematik gösterimi [111]	29
Şekil 1.16. CFRP kompozitlerin kopma davranışlarının şematik gösterimi a) CFRP (3,5 GPa). b) CFRP (5,5 GPa) [111]	29
Şekil 1.17. CFRP ' ın (5,5 GPa) kopma sürecinin sistematik gösterimi [111]	30
Şekil 1.18. Matris-Çatlak-Fiber arayüzü gerilimi alanının sistematik gösterimi [111]	30
Şekil 3.1. NCF-CFRP kumaş a) Fiber Yönleri b) Kumaş ön yüzeyi c) Kumaş arka yüzeyi	69

Şekil 3.2. MWCNT katkılı NCF-CFRP epoksi kompozitin üretim prosesinin akış diyagramı	72
Şekil 3.3. 200 ml ethanol.....	73
Şekil 3.4. MWCNT miktarının hesaplanarak tartılması.....	73
Şekil 3.5. Triton X-100	73
Şekil 3.6. Etanol, MWCNT, sürfaktanın geri dönüşüm tankına boşaltılarak soğutmalı akış hücresi içerisinde sonotrod ile karıştırılması.	73
Şekil 3.7. Reçine miktarının (300 gr) tartılması.....	73
Şekil 3.8. Genliğin.....	74
Şekil 3.9. Soğutma tankı içerisindeki su sıcaklığı -30 C°	74
Şekil 3.10. 80 C°de solventin (Etanol) buharlaştırma	74
Şekil 3.11. Sertleştirici miktarının hesaplanması	74
Şekil 3.12. Çözeltilerin vakum fırınında gazdan arındırılması.....	74
Şekil 3.13. NCF CF kumaşın kesilmesi	74
Şekil 3.14. Kalıp ayırıcının sürülmesi.....	75
Şekil 3.15. Sındırmazlık bandının yapıştırılması	75
Şekil 3.16. Sıyırma kumaşı ve reçine akış filesinin serilmesi	75
Şekil 3.17. Reçine ve vakum hattının yerleştirilmesi.	75
Şekil 3.18. Vakum torbasının yapıştırılması	75
Şekil 3.19. Reçine hattının kapatılarak vakumlama işleminin yapılması	75
Şekil 3.20. Reçine hattından sisteme verilen çözelti.....	76
Şekil 3.21. Çekme ve yorulma numuneleri için kompozit plakanın üretilmesi	76
Şekil 3.22. Kesme işlemi sonrası çekme ve yorulma numunelerinin elde edilmesi ..	76
Şekil 3.23. NCF CF kumaşlardan 14 adet hazırlanması	76
Şekil 3.24. Her bir kata el yatırma yöntemi ile reçine emdirilmesi.....	76
Şekil 3.25. Vakum torbalama yapılması	76
Şekil 3.26. Vakum pompası açılarak reçinenin tüm katlara emdirilmesi, fazla reçinenin ve havanın sistemden tahliyesi	76
Şekil 3.27. Delme işlemi için 10 mm kalınlığındaki NCF CFRP Kompozitin elde edilmesi	77

Şekil 3.28. Plakanın 4 eşit parçaya kesilmesi.....	77
Şekil 3.29. Delme işlemi plakalarının hazırlanması.....	77
Şekil 3.30. ASTM D3039 standardına göre çekme testi numunesi.....	78
Şekil 3.31. Çekme testi numunesi a) Çekme yönleri, b) Makine işleme yönüne göre fiber doğrultuları	79
Şekil 3.32. Yorulma test cihazı çalışma prensibi	80
Şekil 3.33. Ø6x57x99 mm boyutlarında DLC kaplamalı matkap görüntüsü.....	82
Şekil 3.34. Ø6 x50 ALTIN kaplamalı matkap görüntüsü.	83
Şekil 3.35. İtme kuvveti sonuçlarının grafiksel olarak alınması	84
Şekil 3.36. Delme işlemi itme kuvveti ölçme düzeneği.....	85
Şekil 3.38. a)Yüzey pürüzlülük ölçüm düzeneği b)Yüzey pürüzlülük cihazı.....	86
Şekil 3.39. Delaminasyon çeşitleri a) Giriş delaminasyonu sıyrılma(peel up)	88
Şekil 3.40. Delik görüntüsünün dijital mikroskop ile alınması.....	88
Şekil 3.41. Delaminasyon alanının belirlenmesi için Imagej programının kullanılması.	89
Şekil 3.42. Delik çapak alanının Imagej programı ile hesaplanması	89
Şekil 4.1. MWCNT dispersiyonu, a) Süre 1 saat b) Süre 10 saat	97
Şekil 4.2. MWCNT katkılı epoksi nanokompozit çözeltilerinin absorban değerleri.....	98
Şekil 4.3. Saf ve %0,5-%1-%1,5 MWCNT katkılı NCF-CFRP nanokompozitin gerilme-gerinim davranışının karşılaştırılması.....	99
Şekil 4.4. MWCNT konsantrasyonunun çekme dayanımı ile ilişkisi	99
Şekil 4.5 a) Absorbas spektrumuna göre çekme dayanımındaki değişim b)MWCNT içeriğine göre absorban spektrumundaki değişim.....	100
Şekil 4.6. MWCNT konsantrasyonu ile kopma gerinimi arasındaki ilişki	101
Şekil 4.7. Düzlem eğilme yorulma test sonucu örneği.....	103
Şekil 4.8. Farklı % MCWNT içeren NCF CFRP kompozit numunelerin gerilme döngüsü (S/N) eğrileri.....	104
Şekil 4.9 NCF CFRP kompozit numunelerin maks. gerilme değerleri	106
Şekil 4.10. NCF CFRP kompozit numunelerin yorulma sınır gerilme değerleri	106

Şekil 4.11. NCF CFRP kompozit numunelerinin çekme testi sonrası kırılma yüzeyinin FESEM görüntüleri a-b) %0,5 MWCNT c-d) %1 MWCNT e) %1,5 MWCNT f) %0 MWCNT	108
Şekil 4.12. Minimum gerilme genliğinde yorulma testi numunelerinin SEM makro yapı görüntüleri a) Saf NCF CFRP ,b) % 0,5 MWCNT NCF CFRP , c) %1 MWCNT NCF CFRP , d) %1,5 MWCNT NCF CFRP	111
Şekil 4.13. Maksimum gerilme genliğinde yorulma testi numunelerinin SEM makro yapı görüntüleri a) Saf NCF CFRP , b) %0,5 MWCNT NCF CFRP, c) %1 MWCNT NCF CFRP, d) %1,5 MWCNT NCF CFRP.	112
Şekil 4.14. Minimum gerilim genliğinde yorulma testi numunelerinin SEM mikro yapı görüntüleri a) % 0,5 MWCNT b-c) %1,5 MWCNT d) %0 MWCNT e) %1 MWCNT	113
Şekil 4.15. Maksimum gerilim genliğinde yorulma testi numunelerinin SEM mikro yapı görüntüleri a-e) % 1,5 MWCNT b-c) % 0,5 MWCNT d) % 1 MWCNT f) % 1 MWCNT g) 0,5 MWCNT h) % 1,5 MWCNT ...	114
Şekil 4.16. Deney 33 delik çapak alanı görüntüleri a) Giriş çapak alanı, b) Çıkış çapak alanı.....	132
Şekil 4.17. Delik optimum parametrelerin elde edildiği % 0,5 MWCNT, 3500 dev/dak., 0,10 mm/dev., ALTIN (Deney 33) seviyede delik SEM görüntüsü a) Delik giriş görüntüsü b) Delik çıkış görüntüsü.	132
Şekil 4.18. Gri ilişki derecesi yanıt grafiği.....	133
Şekil 4.19. İtme kuvveti yanıt grafiği.....	136
Şekil 4.20. İtme kuvvetinin en düşük olduğu seviyede % 0,5 MWCNT, 500 dev./dak. 0,05 mm/dev., DLC matkapla (Deney 20) yapılan deneyde delik giriş ve çıkış çapak alanı görüntüsü, a) Giriş çapak alanı, b) Çıkış çapak alanı	137

Şekil 4.21. İtme kuvvetinin en düşük olduğu seviyede %0.5 MWCNT,500dev./dak.0.05 mm/dev. ,DLC matkapla (deney 20) yapılan deneyde delik içi SEM görüntüsü.....	137
Şekil 4.22. İtme kuvveti üzerinde parametreler arası ilişki grafiği	138
Şekil 4.23. Yüzey pürüzlülüğü yanıt grafiği	141
Şekil 4.24. ALTIN kaplamalı matkap mikroskop görüntüleri a) Deney öncesi b) Deney sonrası	142
Şekil 4.25. Reçine yapışmış DLC kaplamalı matkap yüzeyinin mikroskop görüntüsü.	142
Şekil 4.26. Yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu ; % 0,5 MWCNT, 500 dev./dak., 0,15 mm/dev., ALTIN (Deney 23) seviye değerlerinde delik giriş ve çıkış çapak alanı mikroskop görüntüleri a) Delik giriş çapak alanı, b) Delik çıkış çapak alanı	143
Şekil 4.27. Yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu ; % 0,5 MWCNT, 500 dev./dak., 0,15 mm/dev., ALTIN (deney 23) seviye değerlerinde delik SEM görüntüsü.....	144
Şekil 4.28. Yüzey pürüzlülüğünün en yüksek olduğu (Ra14,61µm) %1 MWCNT, 2000 dev./dak, 0,05 mm/dev., DLC (deney 44) seviye değerlerinde delik SEM görüntüsü.....	145
Şekil 4.29. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde parametreler arası etkileşim grafiği	145
Şekil 4.30. Giriş delaminasyonu yanıt grafiği.....	147
Şekil 4.31. Delik giriş delminasyonunun en düşük olduğu (Fd:1) seviyede, % 0,5 MWCNT, 3500 dev/dak., 0,10 mm/dev., ALTIN (deney 33), delik giriş ve çıkış çapak alanı mikroskop görüntüleri a) Delik giriş çapak alanı, b) Delik çıkış çapak alanı	148
Şekil 4.32. Delik giriş delminasyonunun en düşük olduğu (Fd:1), % 0,5 MWCNT, 3500 dev/dak., 0,10 mm/dev., ALTIN (deney 33) seviyede delik giriş SEM görüntüsü.....	149
Şekil 4.33. Giriş Delaminasyonu Üzerinde Parametreler Arası ilişki Grafiği	149
Şekil 4.34. Çıkış delaminasyonu yanıt tablosu.	151

Şekil 4.35. Deney 33 çıkış delaminasyon faktörünün en düşük olduğu seviyede delik giriş ve çıkıştaki çapak alanı mikroskop görüntüleri a) Delik giriş çapak alanı, b) Delik çıkış çapak alanı.....	153
Şekil 4.36. Delik çıkış delminasyonunun en düşük olduğu (Fdç:1), % 0,5 MWCNT, 3500 dev/dak., 0,10 mm/dev., ALTIN (deney 33) seviyede delik giriş SEM görüntüsü.....	153
Şekil 4.37. Çıkış Delaminasyonu Üzerinde Parametreler Arası ilişki Grafiği.....	154
Şekil 4.38. Giriş çapak alanı yanıt tablosu.....	156
Şekil 4.39. Deney 19 giriş çapak alanı en düşük olduğu seviyede %0.5 MWCNT,500dev./dak,0.05 mm/dev.,ALTIN matkap çeşidinde delik giriş ve çıkıştaki çapak alanı mikroskop görüntüleri a) Delik giriş çapak alanı, b) Delik çıkış çapak alanı.....	157
Şekil 4.40. Deney 19 giriş çapak alanı en düşük olduğu seviyede % 0,5 MWCNT, 500dev./dak, 0,05 mm/dev., ALTIN matkap çeşidinde delik içi SEM görüntüsü.....	157
Şekil 4.41.Giriş çapak alanı üzerinde parametreler arası ilişki grafiği	158
Şekil 4.42. Çıkış çapak alanı yanıt tablosu.....	160
Şekil 4.43. Çıkış çapak alanının en küçük olduğu % 0,5 MWCNT, 3500 dev/dak., 0,10 mm/dev., ALTIN (deney 33) seviyede delik çıkış alanı SEM görüntüsü.....	161
Şekil 4.44. Çıkış çapak alanı üzerinde parametreler arası ilişki grafiği.	161

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1. Karbon nanotüpler ve diğer malzemelerin özellikleri.....	17
Çizelge 3.1.Yorulma testi ve çekme testi numune detayları	80
Çizelge 3.2. Delme işlemi deneylerinde kullanılan tezgâhın teknik özellikleri	81
Çizelge 3.3. Kistler 9443B Tipi Dinamometre Teknik özellikleri	82
Çizelge 3.4. DLC kaplamalı kesici takım özellikleri	82
Çizelge 3.5.AL TIN kaplamalı kesici takım özellikleri	83
Çizelge 3.6. Delme parametreleri ve seviyeleri	94
Çizelge 3.7. Ful Faktöriyel Deney Tasarımı	95
Çizelge 4.1. Ful faktöriyel deney tasarımı ve deney sonuçları	115
Çizelge 4.2. Giriş delaminasyonu ve çıkış delaminasyonu görüntüleri	119
Çizelge 4.3. Normalizasyon ve uzaklık matrisi değerleri	126
Çizelge 4.4. Gri ilişki katsayısı, gri İlişki derecesi ve sıralama	129
Çizelge 4.5. Optimum parametre sonuçlarına göre elde edilen deney sonuçları	131
Çizelge 4.6. Gri ilişki derecesi varyans analizi	133
Çizelge 4.7. İtme kuvveti varyans analizi	134
Çizelge 4.8. İtme kuvveti üzerinde araştırılan değişkenlerinin Pareto grafiği	135
Çizelge 4.9. İtme kuvvetinde optimum parametre deney sonuçları	136
Çizelge 4.10. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde araştırılan değişkenlerin etkilerinin Pareto grafiği	139
Çizelge 4.11. Yüzey pürüzlülüğü varyans analizi.....	140
Çizelge 4.12. Yüzey pürüzlülüğü optimum parametrelerine göre elde edilen deney sonuçları	143
Çizelge 4.13. Giriş delaminasyonu varyans analizi	146
Çizelge 4.14. Giriş delaminasyonu üzerinde araştırılan değişkenlerin etkilerinin Pareto grafiği	147
Çizelge 4.15. Giriş delaminasyonu faktörü optimum parametrelerine göre elde edilen deney sonuçları	148

Çizelge 4.16. Çıkış delaminasyonu varyans analizi	150
Çizelge 4.17. Çıkış delaminasyonu üzerinde araştırılan değişkenlerin etkilerinin Pareto grafiği.....	150
Çizelge 4.18. Çıkış delaminasyonu faktörü optimum parametrelerine göre elde edilen deney sonuçları	152
Çizelge 4.19. Giriş çapak alanı varyans analizi	155
Çizelge 4.20. Giriş çapak alanı üzerinde araştırılan değişkenlerin etkilerinin Pareto grafiği	155
Çizelge 4.21. Giriş çapak alanı optimum parametrelerine göre elde edilen deney sonuçları	156
Çizelge 4.22. Çıkış çapak alanı varyans analizi	158
Çizelge 4.23. Çıkış çapak alanı üzerinde araştırılan değişkenlerin etkilerinin	159
Çizelge 4.24. Delik çıkış çapak alanı optimum parametrelerine göre elde edilen deney sonuçları	160

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

A	: ortalama kesit
COOH	: Karboksil
D	: Matkap Çapı
D _{max}	: Delaminasyon bölgesi maksimum çap
F _d	: Delaminasyon Faktörü
F _{dg}	: Giriş Delaminasyonu
F _{dç}	: Çıkış delaminasyonu
F _z	: İtme Kuvveti
ILLS	: Tabakalar arası kayma
m	: deneysel veri miktarı
nm	: nanometre
n	: parametre sayısı
N	: Newton
OH	: Hidroksil
P	: Maksimum yük (N)
R _a	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
θ	: kutupsal açı
σ	: Gerilme (Mpa)
ε	: Gerinim
μm	: mikrometre
$x_i^o(k)$	: orjinal sekans
$x_i^*(k)$	: normalize edilmiş sekans
$\max x_i^o(k)$	: orjinal sekans
$\min x_i^o(k)$	: orjinal sekansın en küçük değerli elemanı
$\zeta_i(k)$	: gri ilişki kat sayısı
Δ_{oi}	: referans sekansın sapma sekansı

τ : Kayma Gerilmesi
W : Güç
Wöhler S-N : Yorulma Stresi/Çevrim

KISALTMALAR

AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
AE : Akustik Emisyon
ALTIN : Alüminyum Titanyum Nitrür
BD : Çapraz Yön
CD : Makine Yönüne Dik
CNT : Karbon Nanotüp
CF : Karbon Fiber
CMC : Kritik Misel Konsantrasyonu
CFRP : Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozit
DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
DLC : Elmas Benzeri Kaplama
EN : European Norm (Avrupa Normu)
GRA : Gri İlişki Analizi
MWCNT: Çok duvarlı karbon nanotüp
MD : Makine Yönü
NCF : Kıvrımsız kumaş
TS : Türk Standardı
TIN : Titanyum Nitrür

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte malzemede aranan özelliklere dayanıklılığın yanında hafiflik, korozyon direnci işlenebilirlik gibi parametreler de eklenmiştir. Geleneksel malzemelerin istenilen özellikleri karşılayamaz hale gelmesiyle, takviye malzemesi ve matristen oluşan kompozit malzemeler ortaya çıkmıştır.

Kompozit malzeme; makroskobik düzeyde bir araya getirilmiş ve birbiri içerisinde çözünmeyen iki veya daha fazla bileşenden oluşan yapı malzemelerinin adıdır [1]. Kompozit malzeme; takviye malzemesi ve matris malzemesinden oluşur. Kompozit malzemeler kendi içlerinde polimer matris kompozitler, metal matris kompozitler, seramik matris kompozitler gibi sınıflara ayrılmaktadır. Yüksek özgül mukavemet, düşük ısı genleşme katsayısı ve boyutsal kararlılık gibi özellikleri kompozit malzemeleri ön plana çıkartmaktadır. Özellikle havacılık ve uzay sanayiinde tercih edilen kompozit malzemeler günümüzde otomotiv, deniz taşıtları, basınçlı kaplar, rüzgâr türbinleri vb. birçok alanda sağladığı avantajlar sebebiyle yaygınlaşarak kullanılmaktadır [2].

Kompozit malzemeler genellikle geleneksel mühendislik malzemelerine göre daha yüksek mukavemet ve modül-ağırlık oranlarına sahiptir. Bu durum ağırlıkta %20- %30 arasında azalma sağlar. Bu ise ağırlık tasarrufu, enerji tasarrufu veya artan performans anlamına gelir. Gelişmiş kompozitler arzu edilen dinamik özellikler sergiler ve yüksek sürünme direncine ve iyi sönümleme özelliklerine sahiptir. Aslında, kompozit malzemelerin üstün yorulma performansı, yorulma hasarı olan metalik uçak gövdelerini onarmak için kullanılmalarını sağlar. Kompozit malzemeler hemen hemen her şekilde üretilbildiğinden, büyük tasarım esnekliğine izin verir ve ürünler için azaltılmış parça sayısı sunar. Bileşenleri seçme, istenen özellikleri elde etmek için uyarlama ve ardından tasarım yoluyla özelliklerin optimum kullanımını sağlamafırsatı, kompozitleri birçok endüstri için çok çekici kılan bir durumdur.

Matris polimeri, kompozitlere büyük kimyasal ve korozyon direnci kazandırabilir. Ulaştırma endüstrisi, kompozit malzemelerden geniş ölçüde yararlanmıştır. Hafifliği, yüksek mukavemeti ve aerodinamik şekillerin kolaylıkla üretilmesi, yakıt maliyetlerinin düşmesini sağlamıştır. Malzemelerin korozyona uğramaması ve düşük bakım maliyeti, sahip olma maliyetini düşürmüş ve birçok parça ve ürünün hizmet ömrünü uzatmıştır. Bu sektördeki ürünlere örnek olarak otomobil ve kamyon gövdeleri ve parçaları, römorklar, tanklar, özel amaçlı araçlar ve üretim ekipmanları dahildir. Üretim kolaylığı, hafifliği, yüksek mukavemeti, düşük bakım ihtiyacı, dekoratifliği ve işlevselliği endüstri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Kompozit malzemeler, denizcilik endüstrisini çok erken aşamalarda etkilemiştir ve etkileri artmaya devam etmektedir. Korozyon eksikliği, düşük bakım ve tasarım esnekliği kompozitlerin kabulüne katkıda bulunmuştur. Çok büyük ve güçlü eşyaları tek parça halinde üretme kolaylığı sağlamıştır. Gezi teknelerinin yanı sıra büyük askeri ve ticari tekneler ile gemi gövdeleri imal edilmiştir. Gemilerde yakıt, su ve kargo için büyük tanklar kullanılmıştır. Kompozitler, geleneksel malzemeleri devrim niteliğinde bir hızla değiştirerek spor malzeme endüstrisinde en büyük etkiyi yaratmıştır. Golf sopası milleri, olta kamışları, tenis raketleri, kayak ekipmanları, tekne uygulamaları ve diğer birçok spor ekipmanı ürünü gibi uygulamalar artık neredeyse sadece gelişmiş kompozitler kullanılarak üretiliyor. Çoğu durumda, materyaldeki değişiklik, katılımcılar için performans veya güvenlikte iyileşmeye dönüşmüştür. Havacılık ve askeri pazarlar, kompozit teknolojisindeki gelişme ve ilerlemede en büyük çabayı oluşturan iki alandır. Daha güçlü, daha sert ve daha hafif yapılara duyulan ihtiyaç, kompozit malzemelerin daha yaygın olarak kullanılan malzemelere göre üstünlüklerini göstermeleri için bir fırsattır. Dayanıklılık ve düşük bakım hizmet ömrünü uzatır ve sistemlerin bakım maliyetini düşürür. Yeni askeri uçaklarda, yapı için neredeyse yalnızca gelişmiş kompozitler kullanılır. Roket motor kasaları, nozullar ve burun konileri füze uygulamaları bunlardan bazılarıdır. Radar kubbeleri, rotor kanatları, pervaneler ve kaplamalar, kapılar ve erişim panelleri gibi birçok ikincil yapı bileşeni de gelişmiş kompozitlerden üretilmiştir.

Mühendislik polimerleri yüksek esneklik, işlenebilirlik ve nispeten düşük maliyet özelliklerinden dolayı çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılır.

Birçok polimer düşük dayanım ve zayıf kırılma tokluğuna sahiptir, bu da yapısal bileşenlerdeki uygulamalarını sınırlar [3]. Mühendislik polimerlerinin mekanik özelliklerini geliştirmek için dolgu maddesi kullanılır. Bunların arasında CNT'ler; düşük yoğunlukları ($1,8\text{--}2,0\text{ g/cm}^3$), mükemmel mekanik dayanımları (Elastisite modülü: 1 TPa, çekme dayanımı: 20–100 GPa), elektrik (10^{13} A/cm^2) ve termal özellikleri ile polimerlerin takviye elemanı olarak uygulanmıştır [4,5]. Ajayan ve arkadaşları [6] ilk CNT-polimer nanokompozitler üzerine çalışmalarını rapor etmişlerdir.

Karbon fiberler ve epoksilerdeki gelişmelerle birlikte, Airbus™ A350 XWB gibi ticari uçaklarda kompozitlerin kullanımı 1970 yılında uçakların toplam ağırlığının % 10'u iken 2013'te bu değer % 50' ye yükselmiştir. Boeing™ 787 de ise toplam ağırlığından fazlası kompozitlerden oluşur. Bunun nedeni, kompozit malzemelerin yüksek mukavemet-ağırlık oranı, yüksek parça-ağırlık oranı, yüksek korozyon direnci ve düşük yoğunluğu nedeniyle alüminyum, çelik ve diğer alaşımlar gibi geleneksel metallerden daha iyi performans göstermesidir [7]. Matris malzemesi olan reçine, fiberlerin birbirine yapışmasını sağladığı için uygulanan yük matrise ve fiberlere etkin bir şekilde dağıtılır. Matris malzemesi fiberleri dış etkenlere, neme, kimyasal korozyona ve oksidasyona karşı korur. Kompozitlerde mekanik özellikler (çekme, basma gibi) matristen ziyade fiberlerin etkisi altındadır. Matris malzemesi olan reçine, fiberlere kıyasla daha düşük ısı direncine sahip olduğundan, matris, fiber takviyeli kompozitlerin termo-mekanik davranışında etkin rol oynamaktadır [8].

Fiberler arasında, sürekli ve uzun fiberler, üstün mukavemet (dayanım), sürünme ve sönümleme özellikleri sundukları için havacılık uygulamalarında kullanıma uygun görülmüştür. Mekanik özellikler, yani çekme mukavemeti ve sertlik, kompozit malzemede fiberler tarafından yönetilir. Belirli bir dizilimdeki liflerin istifleme sırası, tipi ve yönü, dizilimin mekanik davranışını etkiler. Karbon fiberler, poliakrilonitril (PAN bazlı) ve zift öncüleri gibi iki bileşenden üretilebilir. PAN bazlı fiberler, kompozite yüksek mukavemet ve ayrıca fiber ve matris arasında daha iyi ara yüz sağlar. Zift bazlı fiberler PAN bazlı fiberler kadar güçlü olmasa da bununla birlikte, modülleri yüksektir, üretimi kolaydır ve maliyet etkindir.

Karbon fiberlerin üretim sürecinden bağımsız olarak, yüksek oranda anizotropiktirler; bu nedenle, fiberin uzunlamasına eksenine göre grafit tabakası oryantasyonu değiştikçe mekanik özellikleri de değişir [7].

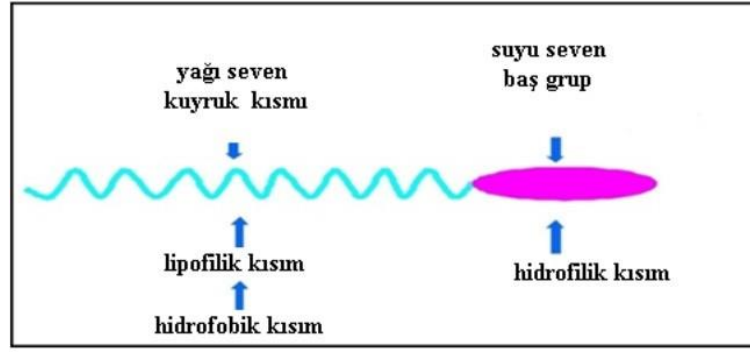
Fiberler anizotropiktir, oldukça iletkendir, istenen boyutları elde etmek için genellikle farklı gruplarda kümelenir ve yüksek mukavemetli uygulamalar için uygundur, örneğin havacılık. Şunu da belirtmek gerekir ki, karbon fiberler oldukça iletken olduğundan bu kompozitlerin işlenmesi sırasında çok dikkatli olunması gerekmektedir. Kaldırılan toz da kısa devre sorunlarına neden olabilir [9].

Bu çalışmada NCF kumaş kullanılmıştır. Farklı fiber oryantasyonuna sahip tabakaların bir birine dikilmesiyle üretilen NCF’larda (kıvrımsız kumaş) dikiş, tabakadaki fiberlerin yönlerinde sapmalara neden olur. Bu durum dikişe yakın yerlerde fibersiz alanlar oluşturur. Fiber içermeyen bu alanlar dikişin etrafında açıklıkların oluşmasına sebep olurken tabakalarda da kanallar oluşturur. Kumaşların kalıp üzerine serilmesinde ise kumaş yüzeyindeki dikiş iplikleri serilen kumaşlar arasında boşlukları ve aralıkları oluşturur. Fiber tabakalı kompozitlerde bu açıklıklar, kanallar ,aralıklar ve boşluklar reçinenin fazla olduğu alanlara sebep olarak kompozit malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Kıvrımlara sahip fiber demetleri düzlemselliğini kaybederek dayanımlarında düşmeler gösterir. Reçine bakımından zengin alanlar fiber bakımından zayıftırlar. Bu ise reçine bakımından zengin alanlarda gevrek bir yapıya sebep olur. Gerilme yığılmalarının meydana geldiği bu alanlardan dolayı kompozit malzemenin dayanımında düşüş olur. Tüm bu problemlerin üstesinden gelmenin veya olumsuz etkilerini azaltmanın önemli bir yolu olarak matris yapılarına CNT’ler veya MWCNT’ler ekleyerek mekanik performansının iyileştirilebileceği öngörülmüştür. CFRP kompozitlerin delinmesi esnasında meydana gelen kusurlar; giriş delaminasyonu, çıkış delaminasyonu, delik giriş ve çıkışında kesilmeyen fiberlerden kaynaklanan çapak alanları delik kalitesini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca ikinci bir işçilik gerektirmektedir. Optimum Delme parametreleri kullanılarak bu sorunun çözülmesi mümkün olmaktadır.

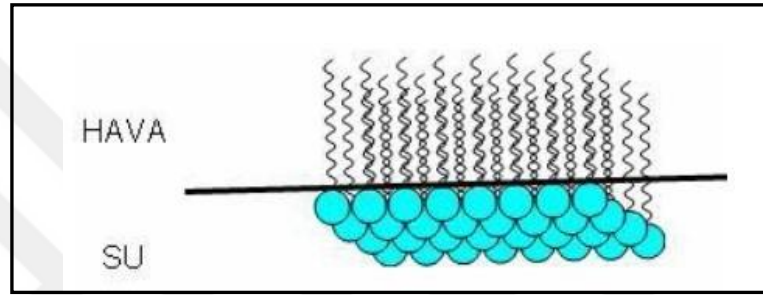
Bu çalışmada amaç; farklı oranlarda MWCNT takviyeli ve takviyesiz kıvrımsız kumaş karbon fiber takviyeli polimer kompozit ve nanokompozit levha malzemelerin üretilmesi ve bu kompozit ve nanokompozitlerin matkap ucu ile delinmesinde en iyi delik kalitesine ulaşmak için gerekli optimum parametreleri belirlemek. NCF CFRP nanokompozit malzemenin üretiminde MWCNT'lerin epoksi reçine içerisinde homojen dispersiyonunu sağlamak. Üretilen NCF CFRP MWCNT kompozit ve nanokompozit levhaların mekanik özelliklerini (çekme özelliklerini ve eğilme yorulma özelliklerini) iyileştirmek için gereken optimum MWCNT miktarını belirlemek.

1.1. SÜRFAKTAN

Karbon nanotüplerin doğası gereği yapılarındaki kuvvetli van der waals bağlarından dolayı aglomera (topaklanma) olmaya yatkındırlar. Bu problemin üstesinden gelmek için yüzey geriliminin azaltan çeşitli sürfaktanlar kullanılarak homojen dağılım sağlanır. Sürfaktan olarak ifade edilen yüzey aktif maddeler suda sulu bir çözeltide veya susuz ortamda çözündüklerinde sıvı yüzeyini küçülterek yüzey gerilimini azaltan maddelerdir [10]. Sürfaktanlar; çözücünün su olduğu durumda hidrofilik (suyu seven) bir baş kısmı ve hidrofobik (suyu sevmeyen) bir kuyruk kısmı bulunan amfifilik (hidrofobik ve hidrofilik karakterli yapı) yapıdaki moleküllerdir (Şekil 1.1). Sulu çözeltide sürfaktanların davranışı, hidrofilik grubun çözeltiye doğru hareket etmesi ve hidrofobik grubun çözeltden uzaklaşma eğilimi ile anlaşılır. Bu iki yönlü eğilim, ara yüzeylerde sürfaktanların absorpsiyonunu (emilim) sağlarken, miseller gibi aglomerasyonun oluşmasına sebep olmaktadır. Sürfaktanların hava-su ara yüzeyine absorpsiyonu yüzey gerilimini düşürür (Şekil 1.2). Sürfaktan moleküllerinin ara yüzeyde absorpsiyonu ile su molekülleri arasındaki etkileşim kuvveti azalır ve yüzey geriliminde düşüş meydana gelir [11]. Sürfaktan ile karıştırılmış MWCNT içeren numunelerde, dağılımdaki kararlılık daha uzun bir süre gözlemlenir. Bu durum ara yüzey, yüzey geriliminin daha düşük olmasına ve CNT yüzeyleri üzerindeki van der waals bağlarının zayıf etkileşimlerine dayandırılır. CNT yüzeyi üzerine absorbe edilmiş sürfaktan molekülleri ayrıca yüzey gerilimini azaltarak, aglomera olmuş CNT'leri sterik engelleme etkisiyle ayırır [12].



Şekil 1.1. Sürfaktanın genel yapısı[11].

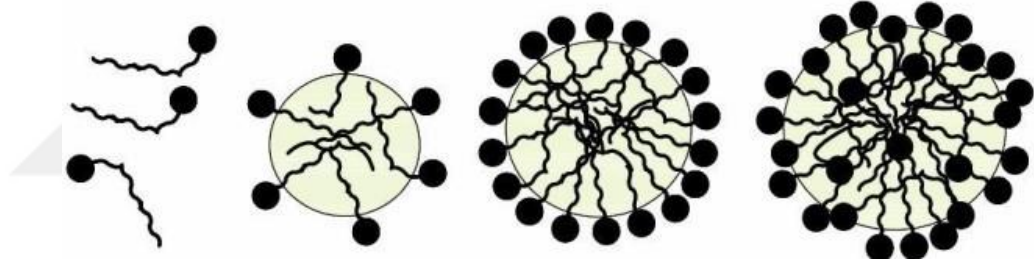


Şekil 1.2 . Hava su arayüzeyi [11].

Amin ile fonksiyonlaştırılmış MWCNT'ün sürfaktanın polar amin grupları arasında hidroksil ile fonksiyonlaştırılmış MWCNT'ün hidroksil grupları arasında oluşan karşılıklı etkileşimler ve hidrojen bağı, MWCNT demetlerindeki arayüzey etkileşimlerinin üstesinden gelebilir [13]. Sterik etki, MWCNT'ler arasındaki van der waals bağları ile uyumu engeller [14]. Daha fazla MWCNT ilave edilmesi çözeltinin karıştırılması için yüksek sonikasyon enerjisi gerektirirken, sürfaktan oranının artırılmasıyla, dispersiyon oranı arttığı için daha az sonikasyon enerjisine ihtiyaç duyulur [15]. Maksimum absorbans, sonikasyonun başlangıcında bir artış gösterir ve sürfaktan miktarına bağlı olarak farklı bir büyüklüğe sahip bir platoya ulaşır [16]. Triton X-100, Tween 80, Tween 20 ve sodyum dodesil sülfat (SDS) sürfaktanın dispersiyon özellikleri incelenmiştir. Triton X-100'ün en yüksek dispersiyon verimliliği sağladığı sonucuna ulaşılmıştır [17]. Karbon nanotüplerin etanol içindeki dağılımı, artan kopolimer - CNT oranı ile sürekli artmaz. Epoksi ve CNT arasındaki köprüleme etkisi sürfaktan sayesinde artmıştır böylece CNT ıslatılabilirliği gelişmiştir [18].

Süpfaktanın ilave edilmesi işlem görmemiş CNT 'ler arasında meydana gelen van der waals çekici kuvvetlerinin üstesinden gelmek için sterik bir itme kuvveti oluşturmuştur [19].

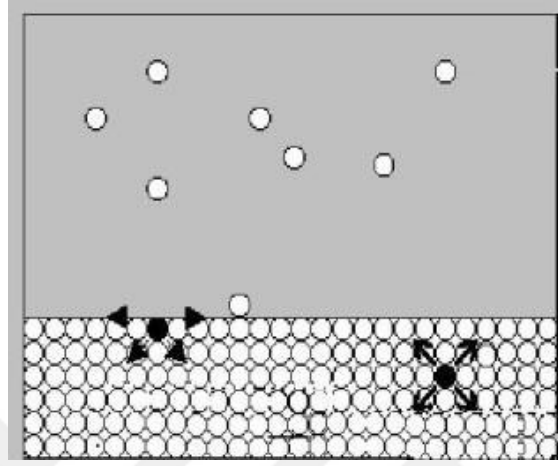
Süpfaktan moleküllerinin hidrofobik grupları iç kısımda, hidrofilik gruplar ise dış tarafta su ile etkileşimde olacak şekilde oluşturdukları kümeleşmelere misel adı verilir. Misel süpfaktanın derişiminden sonra oluşmaktadır. Süpfaktan molekülleri yüzeyde adsorplanacak yer bulamadıklarında çözeltinin içine doğru hareket ederek miselleri meydana getirir (Şekil 1.3). Yeterli derecede süpfaktan çözelti içerisinde çözündüğünde, yüzey gerilimi, hidrokarbonlardaki çözünürlük, iletkenlik gibi çözelti özelliklerinden bazıları önemli ölçüde değişir. Kritik misel konsantrasyonu 'KMK (CMC)' bu değişimlerin başladığı minimum süpfaktan konsantrasyonuna denir [11].



Şekil 1.3. Misel oluşumu [11]

Kohezyon kuvvetleri sıvılarda molekülleri bir arada tutar. Sıvı içerisindeki molekül diğeriyle çevrilidir (Şekil 1.4), üzerine etkiyen toplam kuvvet vektörü sıfırdır. Bu durumda, yüzeydeki moleküllere kendisine yakın olan ve içteki moleüller tarafından çekme kuvveti uygulanır. Dışarıda buhar fazında çok az molekül olduğu için içteki çekimi dengeleyecek dışarıdan bir çekme kuvveti uygulanamaz. Bundan dolayı yüzeydeki moleüller yüzeye dik ve içeriye doğru etkili bir etkileşim sergiler. Yüzeydeki moleüller iç kısımdaki moleüllerden daha hızlı ve devamlı bir şekilde içeriye doğru hareket eder. Bu durum yüzeydeki moleüllerin sayısını, bu da sıvının yüzey alanını küçültmektedir. Meydana gelen yüzey daralması içteki yerleşme 10 maksimum molekül sayısında olana kadar devam eder ve sıvının yüzeyinde bir gerilime sebep olur. Buna sıvının "yüzey gerilimi" denir.

İki farklı sıvıya ait moleküller bir çözelti içerisinde birbiri içerisine karıştıkça yüzey gerilimi düşer. Yüzeyler arası gerilim sıfır olduğunda iki sıvının molekülleri her oranda birbiri içerisine girer [11,20].



Şekil 1.4. İçteki ve yüzeydeki sıvı molekülünün diğer moleküllerle teması.

1.2. KARBON FİBER (CF)

CFRP kompozitlerin endüstride kullanımı hızla yaygınlaşmıştır. Kullanımlarındaki hızlı büyümenin sebebi, yapılarında yük taşıyıcı fiberlerin olmasıyla birlikte sahip oldukları yüksek dayanım ve sertliklerinden ayrıca polimer matris sayesinde de düşük yoğunluktan ve korozyon direncinden kaynaklanmaktadır [19,21].

Fiber takviyeli kompozit malzemeler (FRP) öncelikle fiberin yüksek mukavemetinden ve sertliğinden yararlanmak için kullanılır. Bu nedenle, çoğu uygulamada, tabakanın yönlendirilmesi, dayanım ve modülün fiber özellikleri tarafından kontrol edileceği şekilde tasarlanmıştır. Kompozit malzemelerin gerilme dayanımı, fiberler arasındaki stres konsantrasyonları nedeniyle reçinenin gerilme dayanımının altına düşer. Tipik bir fiber kırığında kompozit özelliklerinde ve reçinenin özelliklerinde büyük değişiklikler meydana gelmez [22]. Fiber takviyeli polimer kompozitler yüksek sertlik ve dayanımlarından dolayı havacılık, otomotiv, spor malzemelerinde geniş uygulamalara sahip yapısal malzemelerdir [23,24]. CFRP'lerin elastisite modülü çoğunlukla fiberlerin sertliğine bağlıdır.

Bu nedenle, fiberler yüzey işlemlerinden zarar görmediği sürece, CFRP'lerin elastisite modülleri değişmemektedir. Uygulanan yük arttıkça, matristeki çatlaklar fiberlere doğru yayılarak fiberlerin çevresindeki stres yoğunluğunu artırabilir, matris fiber arayüz bölgesinde MWCNT ilaveli nano takviye elemanı çatlağı durduramazsa veya saptıramazsa fiber kopmasına neden olur [25]. CFRP'lerin mekanik özellikleri, karbon fiber ve reçine matrisi arasındaki ara yüzey özellikleri ile de yakından ilişkilidir [26,27]. Fiber ve reçine matrisi arasındaki ara yüzey bağlama kuvveti, arayüzdeki yük transfer kapasitesini artırabilir [28,29]. Kompozitte bulunan fiberler mekanik özellikleri etkiler. CFRP kompozitlerin mekanik özellikleri, üç ana yöne ayrılabilen birçok faktörden etkilenir: epoksi reçine matrisinin özellikleri, CF'nin özellikleri ve iki bileşen arasındaki ara yüzey bağı. Matris için, epoksi reçine oligomerlerinin ve sertleştirme maddelerinin yapısı, sertleşme seviyesi ve epoksi reçinenin tokluğu, kompozitlerin özelliklerini etkiler. CF kumaşlar açısından, hacim oranı, fiber mekanik özellikleri, yerleştirme sırası ve mimarileri önemli faktörlerdir. CF ve epoksi reçine arasındaki arayüz ile ilgili olarak, etkileyen faktörler, epoksi reçinenin ıslatma kabiliyeti, yüzey pürüzlülüğü ve kimyasal işlem gibi karbon fiberin yüzey durumudur [30].

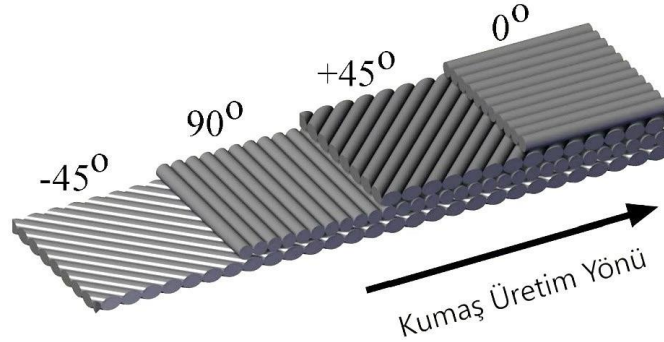
CF kompozit malzemelerin düzlem içi mekanik özellikleri, çoğunlukla CF'nin özelliklerine dayanır, tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS), eğilme özellikleri, darbe mukavemeti vb. gibi düzlem dışı (z-yönü) mekanik özellikler, epoksi reçine matrisinin ve fiber-matris ara yüzey bağlanmasının özelliklerine bağlıdır. Reçine kırılırsa ve ara yüzey bağı zayıfsa, düzlem dışı özellikler zayıf olacaktır. Düzlem dışı özellikleri iyileştirmenin yaygın yolları, kimyasal işlem ve CF yüzeyinin boyutlandırılması, ıslatıcı madde eklenmesi ve epoksi reçine matrisinin özelliklerinin (özellikle tokluk) iyileştirilmesidir [31].

1.3. NCF (KIVRIMSIZ KUMAŞ)

1.3.1. NCF'in Üretimi, Özellikleri ve Uygulama Alanları

NCF (non crimp fabric) yani kıvrımsız kumaşlar çok yönlü kumaşlardır. Kompozit sektöründe takviye malzemesi olarak oldukça sık kullanılan bu kumaşlar; kıvrımsız

olmalarından dolayı daha iyi mekanik özellik gösterirken, tek seferde birden fazla yönde mukavemet sağlama potansiyelinde sahiptir. Özellikle quadraxial (dört yönlü) kumaşlarda $0^\circ / -45^\circ / +45^\circ / 90^\circ$ olarak tek katmanda dört yönde mukavemet elde edilmektedir. Kıvrılmayan kumaşlar, ilave bir sabitleme malzemesi vasıtasıyla konumlandırılan; takviye iplikleri veya keten liflerinin paralel olarak yönlendirilmiş katmanları olarak tanımlanır. NCF kompozitlerin tercih edilme sebepleri prepreg ve dokuma kumaşların dezavantajları olmuştur. Prepreg kompozitlerde zayıf tabakalar arası kırılma toklukları nedeniyle darbe sonrası mekanik özelliklerinin ciddi şekilde bozulması gibi dezavantajlara sahiptirler ayrıca üretim tekniklerine bağlı olarak yüksek maliyetleri vardır. NCF kompozitler ucuz imalat yöntemleriyle (vakum infüzyon, reçine film infüzyon vb.) üretilebilmektedir. Çift yönde dizilmiş fiber demetlerinin örülmesiyle elde edilen dokuma kompozitlerin prepreg kompozitlere kıyasla kırılma tokluğu gelişmiştir ve maliyeti düşüktür. Dokuma kumaşlarda üretim esnasında fiber demetlerinde düzlem dışı yönde dalgalılık durumu olduğundan beri, dokuma kompozitlerin düzlem içi malzeme özellikleri, prepreg kompozitlerde bulunan özelliklerden daha düşük hale gelmiştir. NCF kumaşlar dokuma kumaşlara göre kıvrımsız olmaları sebebiyle şekillendirebilirlikleri yüksektir. Tüm bu özellikler NCF kompozitlerin tercih edilmesini sağlamıştır. Aşağıda çok yönlü NCF görülmektedir.



Şekil 1.5. Dört yönlü (quadraxial) NCF (kıvrımsız kumaş).

Bir tekstil, en fazla iki yönde uzuyorsa 2D yapı, 3 yönde uzanıyorsa 3D olarak tanımlanır. 1949 yılında, Heinrich Mauersberger'e verilen DD000000008194A patent numarasıyla NCF üretimi başlamıştır. Malzeme sertliğinin kontrolü yükleme yönüne paralel tabakadaki fiberler tarafından sağlanır [25].

Çok yönlü NCF karbon fiber kumaşlar UD (tek yönlü) kumaşlardan üretilir. Fiberli bir tabakanın bir iğne ile delinmesi ve dikiş (çözümlü örme) ilmeğinin oluşturulması, fiberlerin düzgün yerleşiminde belirli bir bozulmaya neden olur. Daha kesin olarak, dikiş, bir tabakadaki fiberlerin düzgün olan yönlerinden sapmasına neden olur. Bu sapmalar, dikiş yerlerinin yakınında fibersiz bölgeler oluşturur. Fiber içermeyen bölgeler dikişi çevreleyen bir alanla ("açıklıklar" veya "çatlaklar" olarak adlandırılır) veya tabakadaki sürekli "kanallar" ile sınırlandırılabilir. Kumaşları sererken, kumaş yüzeyindeki dikiş iplikleri kumaşlar arasında 'boşluklar' oluşturur. Fiberli tabakalardaki bu "açıklıklar", "kanallar" ve aralarındaki "boşluklar", kompozitlerde reçine açısından zengin bölgelere neden olarak mekanik performanslarını etkiler. Kompozit malzemenin işlenebilirliklerini etkileyerek değiştirebilirler [32].

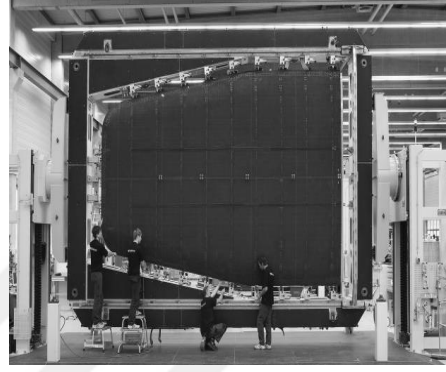
Dört eksenli (Q) NCF CFRP kompozitler için yapılan testler sonucu farklı yönlerdeki çekme gerilme-gerinim diyagramlarına bakıldığında malzemenin kırılmaya kadar neredeyse lineer davrandığını görülmüştür. NCF CFRP kompozit malzemenin gerilme özellikleri, fiberlerin yerleştirilmesinden bağımsız olarak, yükleme yönlerindeki fiberler tarafından belirlenir. Deney sonrası elde edilen verilere bakıldığında, farklı yönler arasındaki sertlikteki maksimum değişimin yaklaşık % 4 olduğu ve tüm test yönlerinde kopmaya kadar olan gerinimlerin birbirine yakın olduğunu görülmüştür. MD(makine yönü) ve BD'deki (makine yönüne dik) dayanım ve nihai gerinimler, CD'deki (çapraz yön) değerlerden % 10'dan biraz daha yüksek olduğu saptanmıştır [32].

Dokuma veya geleneksel örgü gibi yüksek dalgalı tekstiller, doğal olarak NCF'lere veya tek yönlü fiberli malzemelere kıyasla daha fazla hasara dayanıklıdır. NCF kompozitler yüksek eğrilikler için şekillendirilebilirlik ve yüzey kaplamaları için düşük alan/ağırlık ilişkisi özelliğinden dolayı havacılıkta uygulama alanı fazladır. NCF malzemeler, mekanik performansı etkileyebilecek herhangi bir fiber kıvrımı olmaksızın karmaşık iki boyutlu kavisli kalıplara serilebilir. NCF'nin şekillendirilebilirliği, istifleme sırasında, kat alanı/ağırlık ilişkisinden, fiber tipinden ve birleştirme dikiş ipliğinin gerilim ve dikiş deseninden etkilenir [33]. Şekil 1.6 ve Şekil 1.7'de NCF kumaşın kullanıldığı uygulama alanları gösterilmiştir.

Dokuma kumaşlarda fiberlerin kıvrılmasının neden olduğu gerilme davranışının doğrusal olmaması mekanik özelliklerin azalmasına sebep olur [34]. NCF dikiş işlemiyle birleştirilen tek yönlü kumaşlardan oluşur. Bu kumaşlar $[0^\circ/90^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$ veya $[\pm 60^\circ]$ gibi farklı fiber yönlerinde olabilmektedir. Bu durum preform kalıplarda kullanım kolaylığı sağlar [35].



Şekil 1.6. Airbus A380 arka basınç bölme üretiminde NCF kumaşın serilmesi.



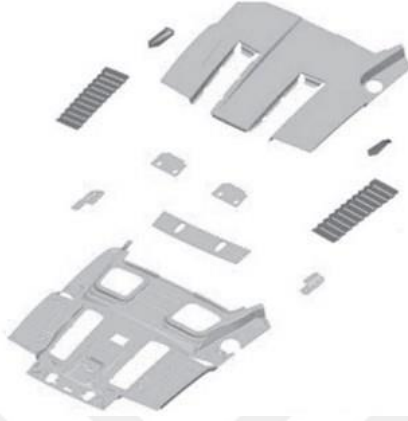
Şekil 1.7. Airbus A400M kargo kapısı dıştan görünüş.



Şekil 1.8. BMW M6'nın parçaları [36,37].

NCF sadece lüks sınıf veya spor sınıf araçlar gibi küçük seri otomobillerde kullanılır. 0° , $+45^\circ$ ve -45° fiber yönlerine sahip NCF, BMW AG otomobil için kullanılmıştır [36,37]. Otomotiv endüstrisinde NCF bazlı bileşenlerin kullanımına bir başka örnek, Lamborghini'nin Gallardo Spyder'ının bagaj kapağıdır.

Dokuz tek parçadan ve iki ek plastik hava çıkışından oluşan alüminyum bagaj kapağı (Şekil 1.9), FRP (fiber takviyeli kompozit) bileşeni olarak yalnızca iki tek parçadan oluşur (Şekil 1.10).



Şekil 1.9. Dokuz Tek Parçadan ve iki ek plastik hava çıkışından oluşan alüminyum bagaj kapağı (20 kg) [37,38].



Şekil 1.10. İki parçadan oluşan CFRP bagaj kapağı [37,38].



Şekil 1.11. Dahili FRP bagaj kapağına sahip Lamborghini Gallardo Spyder [37,38].

Bu FRP bagaj kapağında (Şekil 1.11), 0° , $\pm 45^\circ$ ve 90° yönünde fiberlere sahip UD ve çift eksenli NCF kullanılmıştır [37,38]. Modern bir rüzgâr rotoru kanadındaki UD NCF kısmı, CF kumaşlarının %50-60'ı kadardır [39].

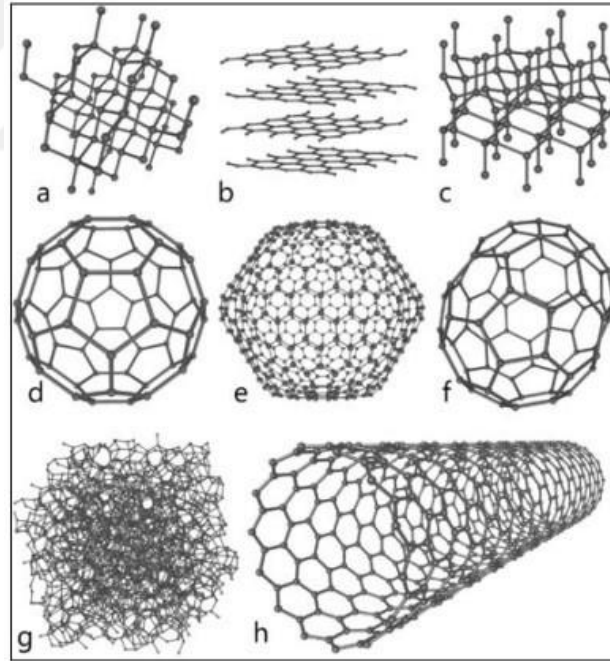
1.4. MATRİS

Epoksi reçine doğası gereği, hem saf hem de nano yapıli haliyle çekme testinde kırılğan şekilde davranır, kopmadan önce plastik deformasyon olmaz [40]. Saf epoksi reçine, CFRP takviye sistemlerinde arzu edilen büyük bir maksimum uzama yaklaşık (% 13) sergiler [41]. Örneğin, yapısal kompozitler için uygulanabilir bir reçine yaklaşık 3.5 GPa elastisite modülüne ve yaklaşık 100 MPa gerilme dayanımına sahiptir [22]. Farklı reçine sistemlerinin çekme dayanımı ve modül değeri üzerinde çalışmalar yapılmıştır [42]. Havacılık endüstrisinde daha çok epoksi bazlı reçineler kullanılmaktadır. Önemli özelliklerinden biri, matris fiber arayüzey zorluklarının daha az olmasıdır. Epoksi reçinelerin bir diğeri önemli özelliğı farklı hidrolik ve yakıt türleri gibi uçak sıvılarına karşı direnç göstermeleridir. Hem ticari hem de askeri uçaklarda epoksi bazlı reçineler fiber takviyeli kompozitler için tercih edilir [7].

Epoksi reçineler termosettir. Cam ve karbon fiberler gibi farklı fiber türleri için yüksek yapışma kuvvetleri sunarlar. Epoksi reçinelerin diğeri önemli özellikleri arasında yüksek sıcaklık dayanımı, boyutların kararlılığı, tokluk, rijitlik, diğeri kimyasallara karşı gösterdiği direnç ve diğeri matris malzemelerine kıyasla daha iyi mekanik özelliklerdir. Epoksi reçinelerin bu özellikleri havacılık sektöründe kullanımına uygun bulunmuştur. Arayüzey fiber ve matris gibi bileşenler arasında güçlü bir yapışma sağlar. Fiberlerin yüzeyi ve reçinenin kalitesi yapışma kalitesini etkiler. Bir kompozitin mekanik özellikleri çoğunlukla arayüze bağlıdır. Zayıf arayüzey bağlanması fiberin dışarı çıkmasına neden olabilir ve bu nedenle kohezyon hatası meydana gelebilir. Güçlü matris bağı yoksa fiberler kayabilir, bu da çekme ve basmada hasara neden olur. Matris ve fiberler arasında iyi bir bağlanma sağlayan arayüz, matrisin kopmasına kadar yükü başarıyla fiberlere aktarır. Yüksek mukavemetli fiberler yapışma kusuruna duyarlıyken, yüksek modüllü fiberler kohezyon bozulmasına eğilimlidir [43,44]. Kırılma programlarına ve üretim süreçlerine bağlı olarak, epoksi reçineler farklı uygulamalar için formüle edilir.

1.5. MWCNT (ÇOK DUVARLI KARBON NANOTÜP)

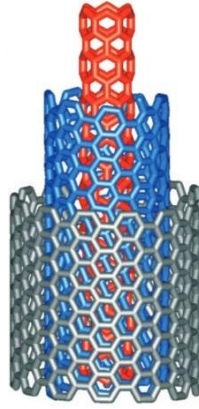
Karbon nanotüp yapılarında atomlar birbirleri ile sp^2 şeklinde bağlanır, altıgen geometri oluşturan atomların sadece üç komşusu bulunur [45]. Karbon nanotüpler karbonun allotropu olan fulleren ve grafenlerden üretilirler. Karbonun çok sayıda allotropu vardır (Şekil 1.12). Bu allotropları şu şekilde ifade edebiliriz; Elmas, 3 boyutlu yarı iletken ve karbon atomları sp^3 şeklinde bağlanır. Grafit, 2 boyutlu ve yarı metaliktir. Karbon atomları sp^2 şeklinde bağlanır. Karbon nanotüp, 1 boyutlu iletken ve yarı iletken yapılardır. Karbon atomları sp^2 şeklinde bağlanır. Fulleren, 0 boyutlu yapılardır. En az 20 atomludur. 1000 atomlu olanları da gözlenebilir. Mekanik ve elektronik özelliği en iyi bilinen ve en sağlamı C_{60} 'tır. Genel olarak fulleren denir. Karbon nanotüpler, geometrilerine bağlı olarak yarı iletken ve metalik özellik gösterirler [46].



Şekil 1.12. Karbon nanotüpler a) Elmas b) Grafit c) Lonsdaleite d-f) Fulleren (C_{60} , C_{540} , C_{70}) ;g) Amorf karbon h) Karbon nanotüp [46].

1984'te Smalley grafiti lazerle buharlaştırarak ilk kez karbon atomlarının top şeklinde olduğunu görmüşlerdir.

Karbon nanotüpler (CNT), 20 cm uzunluğa kadar büyütülebilen, birkaç nanometre kadar küçük bir yarıçapa sahip silindir şeklindeki makro moleküllerdir. Bu tüplerin duvarları, grafitin atomik düzlemlerine benzeyen altıgen bir karbon atomu kafesinden yapılmıştır. Uçlarında fulleren benzeri bir molekülün yarısı ile kapatılırlar. En genel durumda, bir CNT, birçok silindirin eşmerkezli bir dizilişinden oluşur. Çok duvarlı karbon nanotüpler 100 nm'ye kadar çaplara ulaşabilir [47]. Karbon nanotüpler 1991 yılında Iijima [48] tarafından keşfedilmiştir. Çok duvarlı karbon nanotüplerin yapısı, grafit veya grafen nanoplateletlerin yuvarlanmasıyla oluşturulan eşmerkezli içi boş silindirlere oluşur. MWCNT'ler şu anda ulaşılabilir verim ve karbon saflığı açısından büyük ölçüde farklılık gösteren farklı yöntemlerle sentezlenmektedir. Geleneksel ark buharlaştırma tekniğinin yanı sıra, MWCNT'ler, termal CVD, aerosol destekli CVD, su destekli CVD ve enjeksiyon CVD yöntemleri gibi çeşitli CVD işlemleriyle üretilir [49–51]. Nanokompozitlerin mekanik özelliklerinin olumlu etkisi ile MWCNT'lerin en boy oranı arasındaki ilişki birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır [52].



Şekil 1.13. Farklı kiraliteye sahip üç kabuktan oluşan çok duvarlı bir karbon nanotüpün yapısı (MWCNT).

Nanotüpleri bükebilirsiniz, halka haline getirebilirsiniz. Bükülme ile elastisite modülü artar. Elmas kadar yüksek elastik modüllü ve çelikten 1000 kat daha tok malzeme ortaya çıkar. En yüksek elastik modül 1.0 ile 1.4 Tpa arasındadır. Sıkıştırıldıkları zaman, tekrar eski haline dönerler. Aşırı sıkıştırılmada bükülme kalıcı olur.

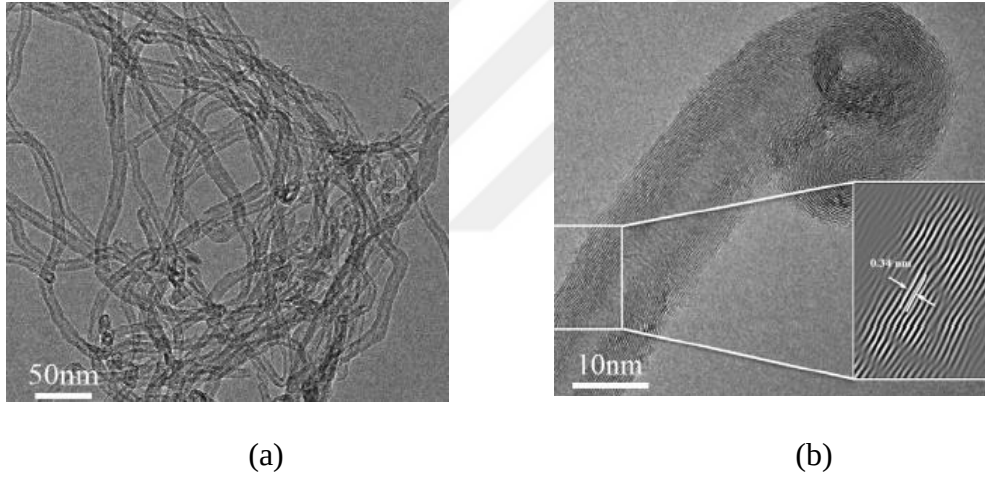
Gerilme direnci açısından en sert malzemelerdir. Sebebi ise karbon atomları arasındaki sp² bağıdır. Aşırı çekilmede ise plastik bozulma görülür. Esneyebilme özelliği çok yüksektir. Eğilme ve şekil verme mümkündür. Elmas kadar yüksek mukavemetlidirler. Maksimum çekme mukavemeti 30 GPa'ya yakındır. Çelikle karşılaştırıldığında 100 kat yüksektir. Yoğunluk çeliğin 1/6'sı kadardır. 3000 dereceye kadar kararlıdır [46].

Çizelge 1.1. Karbon nanotüpler ve diğer malzemelerin özellikleri.

Malzeme	Young Modülü (GPa)	Çekme gerilmesi (GPa)	Yoğunluk ($\frac{g}{cm^3}$)
Tek katmanlı (SWCNTs)	1054	150	-
Çok katmanlı (MWCNTs)	1200	150	2.6
Çelik	208	0.4	7.8
Epoksi	3.5	0.005	1.25
Tahta	16	0.008	0.6

Bir tek grafit levhası yarı metaldir. Bunun anlamı sahip olduğu özellikleri yarı iletken ile metal arasında orta düzeyde olmasıdır. Noriaki Hamada ve meslektaşları daha sonra NEC Laboratuvarında küçük çaplı nanotüpler için dağınım bağıntısını hesaplamışlardır. Bu da gösteriyor ki; küçük çaplı nanotüplerin 1/3'ü metalik, geri kalanı ise çaplarına ve kiriş açılarına bağlı olarak yarı iletkenidir. Genel olarak (n,m) bir karbon nanotüp $n-m=3q$ (q tam sayı) olmak şartıyla metaliktir. Bütün armchair nanotüpler metaliktir, zigzag nanotüplerin 1/3'ü de metaliktir. Bu alanda Dr. Alex Zettle ve onun araştırma grubu gösterdiler ki birbirine küçük farklarla benzemeyen iki nanotüp molekülü uç uca birleşirse, birleşme noktası diyod adı verilen bir elektrik devresi gibi işlev görür. Elektriksel özellikler nanotüpün çapına ve kirişine son derece bağlıdır [46].

CNT'ler yüksek mekanik mukavemet [4], elektriksel iletkenlik [53,54] ve termal iletkenlik gibi dikkate değer içsel özellikler sergiler. Bu özellikleri kompozitlerin kullanımını artırmıştır [55,56]. Karbon nanotüpler, tüplerin yüzeyleri arasındaki büyük van der Waals kuvvetleri [57,58] nedeniyle demetler halinde birikme eğilimi gösterir. Sıvı içerisinde aglomera olmuş demetleri düzgün bir şekilde dağıtmanın zorluğu, bu malzemelerin ticari uygulanabilirliğini sınırlamıştır [59]. Şekil 1.14 MWCNT'nin morfolojik yapısını gösterir. MWCNT'nin boru şeklinde yapıda olduğu ve dağılımında üniform olduğu açıktır. MWCNT'nin çapı yaklaşık 10-20 nm'dur. Şekil 1.14 .a 'daki HRTEM görüntüsü, belirli bölgelerdeki aglomera olan MWCNT'i göstermektedir. Şekil 1.14b 'de MWCNT yapısının daha yakından izlenmesiyle MWCNT'ün 4-8 nm iç boşluk çapına sahip olduğu borunun çapının ise 15 nm olduğu SEM görüntüsünden tahmin edilen değerlerdir [60].



Şekil 1.14. MWCNT'ün morfolojik yapısı. a) Aglomera olmuş MWCNT
b) MWCNT'ün yakın görüntüsü [60].

Epoksinin mekanik özelliklerinde daha fazla gelişme sağlamak için, matris ile daha yüksek arayüzey etkileşimleri olan fonksiyoneleştirilmiş CNT'nin gerekli olduğunu belirtmek gerekir [61]. MWCNT içeriğinin artması kompozit malzemede aglomerasyona sebep olmuştur [62]. Amino-CNT'lerin, özellikle yüksek CNT içeriklerinde, kompozitlerin mekanik özelliklerinin artırılmasında daha etkili olduğu görülmüştür [63].

Olası neden, amino grup ile fonksiyonelleştirmenin CNT yapısına silanizasyondan çok daha az zarar verme eğiliminde olmasıdır, böylece CNT'lerin doğal mekanik özelliklerinin daha iyi korunmasında etkili olmuştur [64,65].

Daha iyi homojen dağılım, daha az aglomerasyona ve daha az gerilim oluşmasına yol açar. MWCNT'lerin uzunluğunun kesilmesiyle meydana gelen en boy oranındaki azalma gerilme dayanımında azalmaya neden olabilir. Aşırı sonikasyon MWCNT'lerin en boy oranında azalmaya neden olmaktadır [66]. Polimerlerdeki CNT'lerin zayıf dispersiyonu ve düşük arayüzey dayanımı, uygulamalarını sınırlandırmıştır [67]. Nanotüp ile epoksinin güçlendirilmesi için homojen dağılımın yanı sıra, nanotüp ve polimer arasında güçlü arayüzey etkileşimi gereklidir. Nanotüp yüzeyinin kovalent ve iyonik bağlar ile işlevselleştirilmesi kompozit malzemede uyumluluğu artırır. Bu bağlar, polimer ve CNT'ler arasında gelişmiş arayüzey etkileşimlerine yol açan bir stres transferini mümkün kılar [68]. CNT'ler kırılmaz ancak CNT'ler ile reçine arasındaki zayıf arayüzey bağlantısı nedeniyle dışarı çekilir [69]. Çözelti içerisinde MWCNT miktarının artması, epoksi reçinenin mekanik özelliklerine olumsuz etkileyen aglomeraların oluşmasını kolaylaştırır [70].

1.6. EPOKSİ –MWCNT KARIŞIMI

CNT'ler matris malzemelerinin özelliklerini geliştirmek ve değiştirmek için takviye elemanı olarak kullanılırlar. Malzeme özelliklerini geliştirilmesi CNT dağılımı ve CNT ile matris arasındaki arayüzey bağının güçlü olmasıyla ilişkilidir. Nano partiküller arasındaki van der waals kuvvetleri, partikül boyutunun azalmasının neden olduğu yüzey alanları ile birlikte artar [71]. Bu durum karbon nanotüplerin aglomera olmasına yol açar [31].

CNT'lerin yüzey modifikasyonunun, CNT'ler ve polimer matrisler arasındaki arayüzey bağını iyileştirmesinin yanı sıra, dağılımı iyileştirmek için de yararlı olduğu kanıtlanmıştır. Bu modifikasyonlar, kovalent olmayan ve kovalent yöntemlerle elde edilebilir. Kovalent olmayan yöntemler açısından, CNT'ler, CNT'ler arasındaki van der waals kuvvetlerini azaltmak için sürfaktanlar ile sarılır. Aynı zamanda, sürfaktanlar ayrıca CNT'nin yapısını dış kuvvetlerden korur [72].

Kovalent yöntemler ise fonksiyonel gruplara ve CNT'ler arasındaki kovalent bağa dayanır. Yaygın yöntemler [73] oksidasyon, amino grup-işlevselleştirme ve polimer aşılama'dır. Genellikle oksidasyon, -OH ve -COOH gruplarının MWCNT'ün yüzeyine asitlendirme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilirken, diğer fonksiyonel gruplar oksitlenmiş CNT'ler ile kimyasal reaksiyonla eklenebilir. Kovalent yöntem, CNT'lerin reaktivitesini artırabilir, ancak uzun süreli tedavi, tüp yapısında hasara (hatta kırılmaya) neden olabilir. Polimer matrislerin viskozitesini azaltmak ve böylece CNT'lerin dağılımını iyileştirmek için iki ana yöntem geliştirilmiştir: solvent karıştırma ve eriyik karıştırma. Solvent karıştırma genellikle üç adımda gerçekleştirilir [74]: CNT'ler önce çözücü içinde dağıtılır, ardından polimer belirli bir sıcaklıkta dağılım içinde çözülür, ardından çözücü kontrollü sıcaklık ve basınç altında buharlaştırılır. Dispersiyon terimi (dağılım); polimer matris içerisinde CNT demetlerinin en küçük birimi bireysel CNT'lere ayrışması olarak tanımlanır. Nanotüp dispersiyonu çözelti kalitesini büyük ölçüde etkilediğinden, CNT'lerin dispersiyonu kaliteli nanokompozitlerin üretimi için çok önemlidir. CNT kolayca aglomera olur, demet haline gelir ve birbirine karışır, bu durum CNT'lerin verimliliğini azaltarak kompozitlerde birçok kusura sebep olur [15]. CNT'lerin sıvılar, reçineler ve polimerler içinde dispersiyonu için kullanılan basit ve en uygun yöntemlerden biri, CNT'lerin ilk olarak standart bir karıştırıcı veya yüksek kesmeli karıştırıcı tarafından dispersiyon ortamında önceden karıştırıldığı ve daha sonra ultrasonla homojenleştirildiği ultrasonikleştirme işlemidir [75].

Viskoziteyi düşürerek kürlenmiş kompozitlerde tutulan hava kabarcıklarını en aza indirmek için vakumla gazdan arındırma ve verimliliğini artırmak için ısıtma gereklidir, karıştırma sıcaklığı olarak 80 C° seçilmiştir, bu sıcaklık, kürlenme başlamadan önce çözeltinin karıştırılması ve işlem görmesi için gerekli zamanı sağlamaktadır. Daha yüksek sıcaklıklar viskoziteyi daha da düşürür ancak işlem için çok daha kısa bir süre sağlar [76]. MWCNT içeriğindeki artış, kompozit malzemelerin gelişimini olumsuz etkileyecek aglomeraların oluşmasına sebep olmaktadır [62]. Fonksiyonelleştirilmiş MWCNT'ler (f-MWCNT) epoksi reçine ile etkili arayüzey geliştirir. Fonksiyonelleştirilmiş nanotüpler, nanotüpler arasındaki sıkı van der Waals kuvvetlerini sekteye uğratarak aglomerasyonu önler [77].

Grafen ve CNT yapılarının hasar görmesini önlemek için karışım sıcaklığı 60 C°-70 C° sıcaklıkta tutulmaktadır [60]. Sonikasyon işleminin süresi ve genliği, CNT'lerin epoksi reçinesindeki dispersiyonu için anahtar öneme sahiptir. Sonikasyon parametreleri epoksi reçinesindeki CNT'lerin dispersiyonunu büyük ölçüde etkilemektedir. Sonikasyon süresinin orta seviyelerinde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Çok yüksek sürelerin CNT'lerin kırılmasına yol açarken, küçük sürelerin iyi CNT dispersiyonu için yeterli olmadığı görülmüştür. Karıştırma süresindeki artışın fazla olması, nanotüp hasarına neden olarak mekanik özelliklerde bozulma meydana getirebilir [78]. CNT çapının dispersiyon üzerinde önemli bir etkisi vardır. Toplam yüzey / hacim oranının CNT uzunluğundan bağımsız ancak CNT çapıyla ters orantılıdır [61]. Kompozitin homojenliği, nanokompozitlerin mekanik davranışı için kritik bir noktadır [79]. Nanotüplerin epoksi reçinesindeki homojen dispersiyonunu kısıtlayan etkenler, nanotüp parçacıkları arasındaki Van der Waals kuvvetinden ve epoksinin viskozitesinden kaynaklanmaktadır [80]. Özellikle, epoksi ve sertleştirici karıştırma sıcaklığı olarak 80 C° seçilir. Çünkü bu sıcaklık, çözeltinin jelleşmeden önce karıştırılması ve işlenmesi için yeterli zaman sağlayan bir sıcaklıktır. Daha yüksek sıcaklıklar viskoziteyi daha da düşürür, ancak kürlenme işlemi için çok daha az zaman tanır [76]. Uzun Sonikasyon sürelerinin yanı sıra, çok yüksek ve düşük Sonikasyon güçleri, yüksek modüllü nanokompozitlerin üretilmesi için uygun değerler değildir [66]. Homojen dağılmış CNT'ler, kompozite uygulanan yükün aktarılmasında daha etkilidir [69].

1.7. CFRP MALZEMENİN DELİNEBİLİRLİĞİ

Özellikle başarılı talaşlı imalat işlemi için fiber ve reçine malzemelerinin birbiriyle uyumlu olması, fiber ve matrisin mekanik özelliklerinde bir denge olması gerekir. Karbon fiberler, yüksek modülleri ve yüksek spesifik sertlikleri nedeniyle epoksi reçinelerle yüksek fiziksel ve kimyasal uyumluluk sağlar. Bu, karbon-epoksi sistemini diğer karbon fiber bazlı kompozitlere kıyasla işleme için uygun hale getirir.

Karbon fiberlerin aşındırıcı yapısı takım aşınmasını artırır; dolayısıyla matkap ucunun ömrü azalır. Bu, matkap ucunun erken arızalanmasına neden olur [9]. Bir karbon fiberin elastisite modülü, üretim sürecindeki ısı işlem döngüsüne bağlıdır.

Sıcaklık ne kadar yüksek olursa, fiberlerin hizalanması o kadar yüksek olur. Fiberlerin hizalanması da güçlerini etkiler. Elastisite modül gücüyle ilgili olduğundan, fiber modülü, fiber takviyeli plastiklerin delinme kalitesi üzerinde önemli bir rol oynar. Delme işleminde, karbon fiberler herhangi bir kayma olmaması için matris içerisinde geri çekilebilir [7]. Sıcaklık arttıkça uygulanan yüklere karşı fiberlerin direnci azalır. Daha yüksek sıcaklıklarda, basma sırasında fiberin arızası, mikro burkulma tarafından yönetilir bu nedenle, fiber hizalamalarının önemli olduğu kabul edilir [81]. Fiberleri yerleştirme sırasındaki çok küçük bir yanlış hizalama bile yükleme sırasında kompozit davranışında tam bir değişikliğe neden olabilir [82]. İmalat sırasında fiberlerin hafif bir hizasız olması, kuvvet uygulanmasında daha erken bozulmaya neden olabilir ve fiberler birbirine göre hizalanmadığında, farklı stres seviyelerinde kırılırlar; bu durum delme işlemi sonrası farklı kusurlara yol açabilir [7].

Karbon fiberlerin bozunma sıcaklığı 3500 C° sıcaklığın üzerinde iken, karbon fiber takviyeli kompozitlerin yüksek hızda delinmesi sırasında maksimum sıcaklık 75 C° olarak kaydedilmiştir [83]. Delme sıcaklığı, karbon fiberlerin bozunma sıcaklığından çok daha düşüktür; bu nedenle, delme sıcaklığından dolayı karbon fiberlerde kusur olasılığı çok düşüktür. Bununla birlikte, kompozit malzemelerde reçine bulunması nedeniyle sıcaklık sınırlamaları ihmal edilemez [84]. Epoksi reçineler işleme proseslerinde iyi bir ısı direncine sahip değildirler. Matris ve fiber arasındaki bağlanma yüksek sıcaklık artışı ile olumsuz etkilenir, bu durum kompozit plaka tabakaları arasında delaminasyona yol açabilir [85]. Airbus uçaklarında yaklaşık 55000 delme prosesinin olduğu tahmin edilmektedir [86]. Bir uçağın montajı sırasında neredeyse parça reddinin % 65'i delme sürecinden kaynaklandığı ileri sürülmektedir [7]. Delme işlemi; devir sayısı, ilerleme oranı ve matkap geometrisi gibi parametrelerden etkilenen bir işleme prosesidir. Devir sayısı ve ilerleme oranı delme işlemini etkileyen temel parametrelerdir. Diğer parametrelere takım geometrisi, takım malzemesi, iş parçası malzemesi, iş parçası kalınlığı, soğutma sıvısı örnek verilebilir. Bu parametrelerdeki değişiklikler; itme kuvveti, tork, sıcaklık, delik kalitesi ve takım aşınması üzerinde etkilidir [87]. Spiral matkapta kanalların görevi talaş iş parçasından çıkarmaktır. Matkap ucunun bulunduğu kısımda, takımın iş parçasına düzgün bir şekilde yönlendirilmesi için kenar boşluğu sağlanır. Sürtünmeyi azaltmak için matkap ucu üzerinde boşluk açısı talaş sıkışmasını da azaltır.

Radyal ağız, iki kanallı matkap ucu olması durumunda öz kalınlığından oluşur ve radyal ağızın kalınlığı, bir öz kalınlığını temsil eder. Matkap ucunun eğim açısı (rake angle), matkap ucuna göre değişir. Piyasada bulunan matkap uçlarında talaş açısı negatiften pozitif doğru olabilir. Bir matkabın radyal ağızı, iş parçasından malzemeyi ekstrüde (koparma) ederek uzaklaştırır. Matkap kesici kenarları ise malzemeyi keserek uzaklaştırır. Karbür matkap uçları, HSS matkap uçlarına kıyasla daha sert ve aşınmaya karşı daha dayanıklıdır. Karbür matkap uçları genellikle alüminyum, dökme demir ve diğer demir dışı malzemeleri kesmek için kullanılır; ancak kompozitlerin delinmesi için aynı tip matkap uçları kullanılır. Karbür matkap uçları, daha uzun takım ömrü, çalışma sırasında yüksek devir sayısı ve daha fazla talaş kaldırma gibi HSS matkap uçlarına göre avantajlar sunar [87]. Ancak karbür matkaplar, HSS matkap uçlarından daha pahalıdır. Büyük çaplı delikler için genellikle HSS matkap uçlarına karbür kaplama uygulanır. Kompozit malzemeleri delme işleminde, malzemelerin anizotropisi nedeniyle matkap ucunun aşınması tamamen farklıdır. Titanyum Nitrür (TiN) kaplama, sürtünmeyi azalttığı ve takım ömrünü iyileştirdiği için sıklıkla kullanılır. Matkap ucu ile iş parçası arasındaki sürtünme ısısı, örneğin yumuşak malzemeler söz konusu olduğunda, matris malzemenin erimesine neden olabilir.

1.8. İTME KUVVETİ –DELAMİNASYON

İtme kuvveti, nanokompozitlerin işlenebilirliğini belirleyen CFRP nanokompozitin delme işleminde önemli bir rol oynar. Düşük itme kuvveti değeri MWCNT katkılı CFRP nanokompozitlerde, daha iyi işlenebilirlik ve işlenmiş deliğin kalitesini artmasına katkı sağlar. İşleme parametreleri ayrıca CFRP nanokompozitlerindelinmesi sırasında itme kuvvetini etkiler. İtme kuvveti delme işleminde delaminasyona neden olan ana faktörlerden biridir [88]. Sabit ilerleme oranında devirsayısının artmasıyla kesme sıcaklığındaki artıştan dolayı itme kuvvetinin azaldığı görülebilir. Bu durum, matrisin termal yumuşamasına yol açar [89]. Sabit devirsayısında ilerleme oranındaki artış, efektif boşluk açısındaki azalma nedeniyle itme kuvvetini arttırdığı ve bunun da delme sırasında talaş kalınlığını arttırdığı sonucuna varılabilir [90,91]. Kompozit plakada epoksi matris içerisindeki MWCNT'nin miktarı arttıkça, kompozit malzemenin sertliğindeki iyileşme nedeniyle itme kuvvetinin azaldığı fark edilebilir.

Sıyrılma (Peel-up) delaminasyonu, matkabın kesici kenarı tabakalardan sıyrıldığında meydana gelir. Sonuç olarak, sıyrılan tabaka, matkabın kanalları ile soyulur ve üst tabakanın soyulmasına neden olur. Matkap ucunun çıkış tarafında dışarı itme delaminasyonu meydana gelir. Plakanın kesilmemiş kalınlığı çıkış tarafında azaldıkça, kesilmemiş tabakalar, matkap ucunun uyguladığı basma kuvvetinin etkisiyle elastik olarak eğilir. Basma kuvveti arttıkça, tabakalar arası bağ kuvveti azalır ve bu da tabakalar arasında çatlakların gelişmesine yol açar. Bu çatlaklar, matkap ucu aşağı itildiğinde zahmetsizce yayılır. Böylece, tabakalar arası bağlanmanın başarısızlığı, dışarı itme delaminasyonuna neden olur [88].

Delaminasyondaki iyileşme, polimer matrisin termal iletkenliğinin ve karbon fiber matris arasındaki arayüzey kuvvetini artıran MWCNT'lerin eklenmesine dayandırılır. MWCNT'ler delme sırasında takım-talaş arayüzünde yağlama etkisi yapar, böylece takım ile kompozit tabakalar arasındaki sürtünmeyi azaltır [92,93]. İlerleme oranındaki artış, matkap ucunun tabakalar üzerindeki etkisi nedeniyle giriş delaminasyon faktörünü artırır. Bununla birlikte, polimer matrisine MWCNT'ün eklenmesinden sonra eğilme dayanımındaki iyileşme, fiber ve reçine arasında daha iyi yapışma kabiliyeti sağlar. Saf epoksi karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerde yüksek delaminasyon gözlemlenir. Bunun nedeni, tabakalar arasındaki arayüz bağlanmasının başarısızlığı olabilir. İlerleme hızı arttıkça çıkış tarafındaki delaminasyon faktörünün de arttığı görülmüştür. Böyle bir artışın nedeni, kesilmemiş tabakaların elastik olarak eğen ve eğilme stresinin artmasına neden olan itme kuvvetinin artmasıdır. Tabakalar arası hasar, matkap ucunun daha fazla aşağıya ilerlemesiyle birlikte deliklerin etrafındaki çatlakların büyümesine yol açar. Bununla birlikte, polimer matrisine MWCNT ilavesi, eğilme dayanımını ve ILSS'yi artırır. Sonuç olarak deliğin çıkış noktasında minimum hasar gözlemlenir [88].

1.9. MEKANİK ÖZELLİK

Epoksi içerisindeki MWCNT'ün iyi dispers olması ve MWCNT ve epoksi arasında sağlam arayüzey yapışması ile epoksinin gerilme mukavemeti ve elastisite modülü önemli ölçüde geliştirilmiştir [77].

Epoksi kompozitlerin çekme dayanımı ve eğilme dayanımı arayüzey yapışması, matris malzemesinin dayanımı, matris içindeki parçacıkların şekli ve dağılımı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır [94]. Yüksek en / boy oranı, yüksek modül ve dayanıma sahip Grafen ve MWCNT epoksinin elastisite modülünü ve eğilme modülünü artırmıştır. Ağırlıkça % 3'ün üzerinde MWCNT'ün ilave edilmesi çekme ve eğilme özelliklerinde hafifçe azalma göstermiştir. Bu durum MWCNT'ün aglomerasyonundan ve yüksek oranda MWCNT ilavesiyle çözelti içerisinde dağılmasının zorluğuna bağlanmıştır. Aglomerasyon, matrisi zayıflatan gerilme dağılımı sağladığı için, gerilme ve eğilme özelliklerini azaltır. Epoksi kompozitlerin kopma gerinim değeri, dolgu maddelerinin sağladığı sertlikteki artışa bağlı olarak, MWCNT'ün ağırlıkça yüzde miktarının artmasıyla azalmıştır. MWCNT'ün eklenmesi, epoksi kompozitlerinin daha kırılğan olmasına ve kopma uzamasında azalmaya neden olur [60].

MWCNT'ün polimer matris içerisinde dispersiyonu ve şekli, dikkate alınması gereken en önemli faktörlerden biridir. MWCNT'ün yapısındaki bazı kıvrımlar ve bükülmeler MWCNT'ün epoksi matristen ayrılmasını önlemiştir ve dolgu maddeleri ile epoksi matris arasındaki iyi arayüzey etkileşimine katkıda bulunmuştur bu durum Epoxy / MWCNT'ün daha yüksek gerilme dayanımına ve eğilme dayanımına sahip olmasını sağlamıştır. Uygulanan yükün, epoksi matristen dolgu maddelerine etkin bir şekilde aktarılması sağlanmıştır. Bu ise çekme dayanımını ve eğilme dayanımını iyileştirmiştir [95].

Elastisite modülü ve eğilme modülünün artması, MWCNT'ün ilave edilmesiyle yük altında polimer zincirlerinin hareketliliğinin sınırlanmasıyla ilişkilidir [9]. Epoksi içerisine MWCNT ilave edilmesi; çapraz bağlantı oranını artırmış ve epoksi matrisinin moleküler hareketlerini engellemiştir [96]. Az miktarda CNT ilave edilmesi gerilme modülünü önemli ölçüde etkilemez [40].

Daha önce yapılan çalışmada ise az miktarda CNT ilavesinin toklukta artış gösterdiği belirtilmiştir [78,97]. MWCNT'lerin epoksi nanokompozitlerin üzerindeki etkisinin, GFRP (cam fiber takviyeli epoksi kompozit) nanokompozitlerin elde ettiği miktarın iki katıdır, MWCNT'lerin GFRP malzemelerde verimliliği, epoksi nanokompozitlere kıyasla daha belirgindir [98]. CNT'ler fiber yüzeyine bağlanarak yük transferi sağlar [99].

Epoksi nanokompozitin eğilme dayanımı MWCNT içeriğinin küçük bir artışıylaartmış ve MWCNT içeriği ağırlıkça % 0,3 olduğunda maksimum değere ulaşmıştır. Fonksiyonelleştirilmiş MWCNT esaslı kompozitlerin dayanımındaki iyileşme, van der Waals kuvvetlerinin zayıflamasıyla ve epoksi matris ile kovalent bağların oluşması nedeniyle fonksiyonel tüplerin epoksi içerisinde daha iyi dağılmasından kaynaklanabilir [100]. Fonksiyonelleştirme işlemiyle nanotüplerin yan zincirlerine kovalent olarak bağlanmış amino gruplar, nanotüplerin güçlü arayüzey bağı oluşturarak etkili bir yük transferini sağlar ve böylelikle kompozitin dayanım, modül ve gerinim özelliklerinde artış görülür [101]. Epoksi içine ağırlıkça % 0,1 CNT katılması, kopma uzamasında azalma olmadan saf epoksinin saflığı ile karşılaştırıldığında epoksi dayanımı ve Elastisite modülünde sırasıyla % 10 ve % 10'luk bir artış sağlar [61].

Uygun bir ultrasonikasyon işlemi ile CNT'ün homojen dağılımı sağlanarakkompozitin mekanik özelliklerinin iyileşmesi sağlanır [102]. CNT ilavesi nanokompozitin modülünde epoksi sistemine kıyasla aynı kalırken gerilme dayanımı biraz azalmıştır. Bu muhtemelen iki faktöre bağlanabilir: işlem esnasında gerilmeyi artıran boşlukların oluşumuyla sonuçlanan yüksek viskoziteye, matris ve nanotüp arasındaki zayıf arayüzey bağına. Farklı sıcaklıklardaki çekme testlerinde % 1 CNT ilaveli epoksi nanokompozitler tüm test sıcaklıklarında en yüksek mukavemete ve modüle sahip olmuştur [103]. Kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için yüksek CNT konsantrasyonlarının kullanılması yararlı olmaz [79]. Matristeki CNT'lerin dışarı çekilmesi, CNT-epoksi reçine kompozitinin mekanik özelliklerindeki iyileşmeyi azaltabilir [61].

CNT'ler ve polimer matris arasındaki etkileşimler, kovalent bağlar nedeniyle büyük ölçüde gelişmiştir. Güçlü arayüzey yapışması, matris ve CNT'ler arasında verimli yük transferini kolaylaştırır ve bu da mekanik özelliklerin gelişmesini sağlar [65]. Daha uzun süre sonikasyon işlemi homojen dağılımın iyileşmesine ve sonuç olarak en yüksek gerilme dayanımına neden olur. Daha yüksek sonikasyon gücü ve daha uzun süreler daha iyi dağılmaya neden olur bu durum ise MWCNT'nin en-boy oranında azalma meydana getirir. Sonikasyon süresinin uzaması dağılım üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte, daha uzun sonikasyon sürelerinin bir sonucu olarak nanotüp hasarı da rapor edilmiştir [104,105].

L/D (uzunluk/çap) oranı 83 den 8 düştüğünde çekme dayanımı ve elastisite modülü sırasıyla % 8,7 ve % 9,8 azalır [104]. Tüm dağıtıcı ortamlarda 4 saatlik çok uzun sonikasyon süresi mekanik özelliklerin azalmasına sebep olur [106]. Epoksi içindeki CNT'lerin içeriği arttığında, CNT'ler homojen olmayan dispersiyon sergiler bu durum, zayıf gerilme özelliklerine sahip epoksi zincirlerinin hareketliliğini kısıtlar. CNT'ler işlevselleştirilmiş olmasına rağmen, daha fazla CNT içeriği aglomerasyona sebep olur. CNT aglomerası epoksi ile CNT arasındaki yük transferini bozar ve nanokompozit içerisinde kusur gibi davranır [107]. Aglomera yapılar reçinede kusur görevi gördüğü için CNT'lerin takviye edici etkilerini azaltır. Bu nedenle zayıf dispers olmuş CNT / epoksi kompozitler, homojen dağılmış olanlardan daha düşük mekanik özelliklere sahiptir [69].

Eğilme dayanımı ve modülündeki düşüş CNT içeriğinin artmasıyla aglomerasyonun artmasına bağlanabilir. Bunların nedeni nanotüplerin yüksek yüzey enerjisi, büyük en boy oranı yüzünden ve artan viskozite ile nanotüp içerikleri daha yüksek olduğunda epoksi reçine içerisinde dağılması daha zor olacaktır, bu da sistemde daha az enerji kaybına yol açar. MWCNT içeriğinin artmasıyla kompozitlerdeki boşlukların ve aglomerasyonun uzaklaştırılması zorlaşır çünkü kürlenmeden önce epoksi reçinesinin viskozitesi MWCNT içeriği ile artar, bu da kompozitlerin performansını büyük ölçüde azaltır [108]. Kompozitler gerildiğinde, karbon fiber ve matris kolayca ayrılır, böylece karbon fiberin mükemmel mekanik özellikleri etkili bir şekilde uygulanamaz.

Bu nedenle, kompozit hazırlanmadan önce karbon fiberin yüzeyinin etkinliğini arttırmak için modifiye edilmesi gerekir, böylece reçine ile ıslanabilirliği ve arayüzey bağlanma dayanımı artar [109] .

Çekme dayanımı aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır [110] :

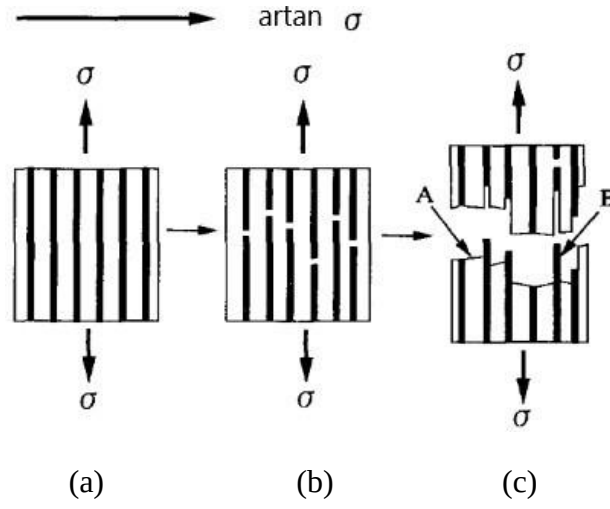
$$\sigma = \frac{P_{max}}{A} \quad (1.1)$$

σ =Çekme dayanımı, MPa

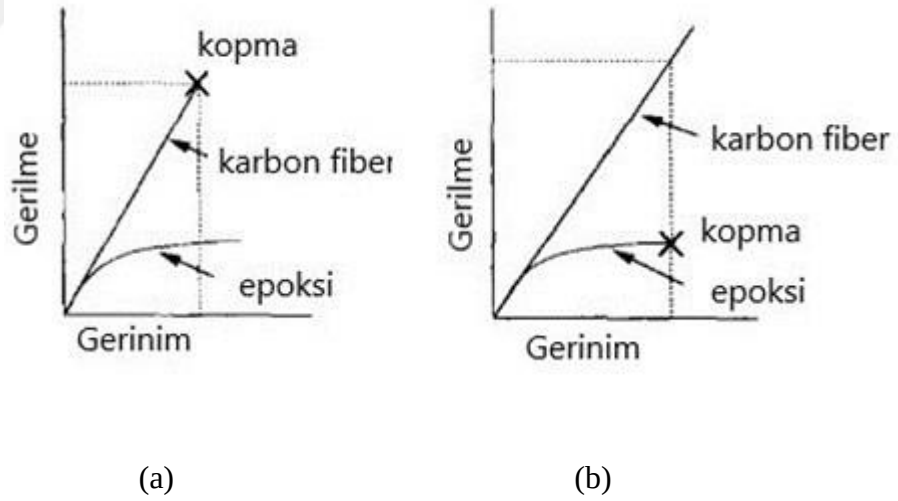
P = maksimum yük

A=ortalama kesit alanı, mm²

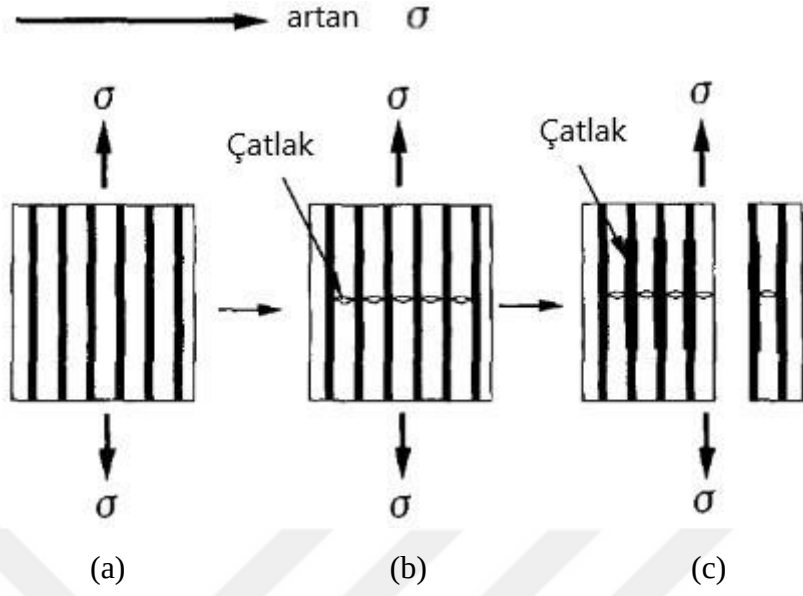
Kötü dispers edilmiş CNT içeren nanokompozitlerin homojen dispers edilmiş CNT'e sahip olanlardan daha yüksek elastik modül sergilediği, ancak gerilme dayanımı ve kopma uzamasının matris içindeki homojen bir dağılımla daha kritik ilişkili olduğu bildirilmiştir [69]. Fiber ve epoksi matris kopma meydana gelinceye kadar düzgün biçimde deforme olur (Şekil 1.15a), mikro çatlaklar fiber kopması ile başlar (Şekil 1.15b), çünkü fiberin kopma gerilimi matrisinkinden daha azdır (Şekil 1.16a). Daha sonra sürtünme stresi, fiberlerin daralması nedeniyle fiber-matris arayüzünde ortaya çıkar. Sürtünme stresinin daha büyük olduğu yer, fiberlerin gevrek kırılmasıyla mikro çatlakların oluştuğu yerdir, daha sonra bu kırılma matris içine uzanır (Şekil 1.15c,A noktası), eğer sürtünme stresi daha düşükse, fiberlerin dışarı çekilmesiyle birlikte fiber-matris ayrılması meydana gelir (Şekil 1.15c, B noktası). Mikro çatlaklar arasındaki nihai bağlantı, yerel kayma nedeniyle araya giren bağların kopması ile gerçekleştirilir [111].



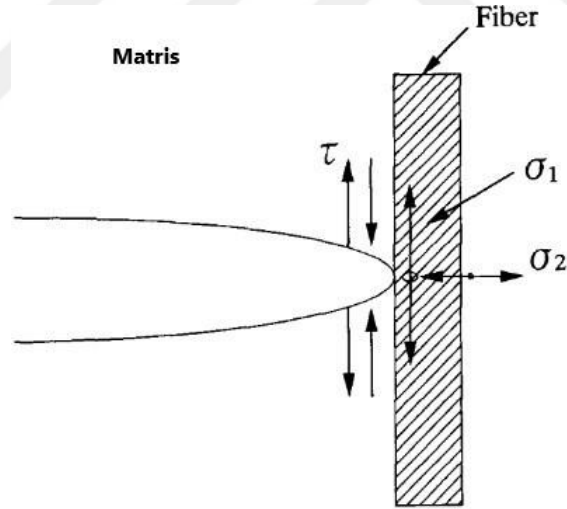
Şekil 1.15. Karbon fiber epoksi kompozitin (3,5 GPa) Kopmasının sistematik gösterimi [111].



Şekil 1.16. CFRP kompozitlerin kopma davranışlarının şematik gösterimi
a) CFRP (3,5 GPa). b) CFRP (5,5 GPa) [111].



Şekil 1.17. CFRP 'ın (5,5 GPa) kopma sürecinin sistematik gösterimi [111].



Şekil 1.18. Matris-Çatlak-Fiber arayüzü gerilimi alanının sistematik gösterimi [111].

5,5 GPa Karbon fibere sahip epoksi kompozitte epoksi ve fiberin kopmaya kadar uniform olarak deforme olduğu varsayılırsa (Şekil 1.18.a), mikro çatlaklar epoksi reçinenin kopmasıyla başlar (Şekil 1.18.b). Çünkü epoksi reçinenin kopma gerinimi fiberinkinden daha azdır (Şekil 1.16.b). Şekil 1.19 matris-çatlak-fiber arayüzünü göstermektedir.

σ_1 fiber kırılmasına neden olur, σ_2 matris-fiber arayüzeyinde ayrılmaya, τ ise kayma kırılmasına neden olur. Eğer σ_{2max} , σ_{1max} 'dan büyük olursa fiber kopması meydana gelir. Eğer τ_{max} , σ_{1max} 'dan büyük olursa, fiber kopmasından önce, kayma kırılması oluşacaktır. Fakat σ_{2max} , τ_{max} 'dan büyük olursa, kayma çatlağından önce bir gerilme çatlağı oluşacaktır. 5,5 GPa fibere sahip kompozitin, τ_{max} , σ_{1max} 'dan büyük olduğu için, fiber matris arayüzeyinde kopma meydana gelmiştir ve böylece mikro çatlak başlaması ve uzaması fiber-matris arayüzeyinde meydana gelmiştir (Şekil 1.18.c). Fiber-matris arasındaki yapışma dayanımının düşük olması kompozitin dayanımını etkiler. CF /Epoksi reçine kompozitlerin gerilme kopması, fiberlerin mekanik özelliklerinden etkilenir [111].

Çekme numunelerine yapıştırılan tebler (tutucu bölgesi), numunenin her iki ucuna yapıştırılır, stres konsantrasyonunu azaltmak ve kuvveti tek bir şekilde CFRP dağıtmak için kullanılır [112]. Bu durum, yükleme yönündeki karbon fiber miktarının fazla olması eğilme dayanımının artmasında etkilidir [113]. CFRP'nin yüzeyinde bir epoksi tabakası vardır. Test sırasında, bu epoksi tabakası CFRP fiberin kırılmasından önce yok olma eğilimindedir ve bu da gerinim ölçerin erken bozulmasına yol açabilir [114] .

1.10. ANALİZ YÖNTEMLERİ

1.10.1. UV VIS Spektroskopi

Ultraviyole ve görünür ışık (UV Vis) absorpsiyon spektroskopisi bir ışın demetinin bir örnekten geçtikten veya bir örnek yüzeyinden yansıtıldıktan sonraki azalmasının ölçülmesidir. Işığın şiddetinin azalması absorplamanın arttığını gösterir. Numunenin derişimi belirli bir dalga boyundaki absorpsiyonunu ölçerek bulunur. UV Vis spektroskopi genellikle çözeltideki moleküller veya inorganik iyon ve komplekslerin ölçümünde kullanılır. Birçok molekül UV veya Vis dalga boylarını absorplar ve farklı moleküller farklı dalga boylarını absorplar. Bir absorpsiyon spektrumu molekülün yapısını gösteren birçok absorplama bantlarından oluşmaktadır [115].

Spektroskopik yöntemler, çözelti üzerine bir ışık kaynağı uygulayarak çözeltideki partikül büyüklüğü ile absorpsiyon veya saçılan ışık miktarını ilişkilendirerek nanotüp dispersiyon özelliklerini ölçebilir [116]. Spektroskopik pikin yoğunluğu, çözelti içindeki bireysel MWCNT'lerin miktarını ölçmek için kullanılır. Absorpsiyon pik değerleri MWCNT miktarının artmasıyla artmıştır. Absorpsiyon spektrumunun pik çökme süresinin artmasıyla azalır. Matris içinde nanotüplerin ilk dispersiyon kalitesini korumak için, kompozit numunelerin mümkün olan en kısa sürede üretilmesi gerekir [117]. Bireysel CNT'ler UV Vis bölgesinde aktiftir aglomera olanlar aktif değildir [100]. Çözeltide dispers olmuş CNT'lerin miktarı ile buna karşılık gelen absorpsiyon spektrumunun yoğunluğu arasında bir ilişki kurmak mümkündür [118]. UV Vis spektroskopisi oluşan aglomeraların büyüklüğü hakkında bilgi vermez [119].

CNT içeriği düşük çözeltielerde, sürfaktan miktarı karbon nanotüp yüzeyini eşit olarak kaplamak için yeterlidir. sürfaktan miktarının sadece karbon nanotüpleri dispers etmek için yeterli olduğu bir konsantrasyon değerine ulaşılır ve maksimum çıkabileceği sınırı bu noktadır. Karbon nanotüp içeriğindeki artışlarda, çözeltideki sürfaktan miktarı CNT aglomeralarını tamamen dağıtmak için yetersiz kalır, bu nedenle bu karışımlarda ulaşılabilen bir nokta olmaz [120]. UV spektroskopide çok yüksek absorpsiyon değerinin çıkması, epoksi çözeltisinde CNT dispersiyonunun etkili olduğu anlamına gelir. Epoksi miktarının artırılması ile çözeltinin viskozitesi artar böylelikle epoksi zincirlerinin CNT demetlerine girme olasılığı azalır [12].

UV Vis spektroskopisinin çalışma prensibi, bireysel CNT 200 ila 900 nm arasındaki dalga boyu bölgesinde aktifken demet halindeki CNT'ler ise çok az aktiftirler ve bu dalga boyunda ölçülen absorpsiyon değeri, CNT'lerin dispersiyon dereceleri ile ilişkilidir [121]. CNT konsantrasyonunu düşürmek için daha fazla çözücü kullanılarak dispersiyon derecesi artırılabilir. Fakat daha fazla solvent (çözücü) eklenmesi, epoksinin mekanik özelliklerini bozar. Sonikasyon enerjisi ne kadar yüksek olursa CNT'lerin pul pul dökülmesi o kadar büyük olur, ancak bu değerin ötesinde dispersiyon seviyesi neredeyse sabit kalır [61]. Demet CNT'ler, 200 ila 1200 nm arasındaki dalga boyu bölgesinde neredeyse hiç aktif değildir. Fotoluminesansları söndürülmüştür.

Büyük olasılıkla taşıyıcının nanotüpler arasında tünel açması nedeniyle bu olmaktadır [122]. Spektroskopi, CNT'lerin dispersiyon işleminin dinamiklerini izlemek için kullanılabilir ve uygun değer sonikasyon süresinin belirlenmesine izin verir [123].

Sonikasyonun başlangıcında, MWCNT'ler, çözelti içinde güçlü bir şekilde birbirine karışmış büyük aglomeralar ve demetler halinde bulunur ve UV Vis spektrumunda absorbans yoktur. Sonikasyon sırasında, sağlanan mekanik enerji gerçekten MWCNT demetlerindeki van der Waals etkileşimlerinin üstesinden gelebilir ve bunların çözülmesine ve dispersiyonuna yol açabilir. Çözelti içerisinde dağılmış MWCNT'lerin miktarındaki artış, absorbansı gösteren spektrum grafik eğrisinin altındaki alanın artmasına sebep olur [16]. UV spektroskopi sonuçlarına bakıldığında, çözeltiler hızla topaklanmaz ve dolayısıyla dağılım durumları depolanan çözeltiler için büyük ölçüde değişmez bu durum endüstride büyük miktarlarda çözelti hazırlanmasına olanak sağlar [15].

1.10.2. Elektron Mikroskobu (SEM)

Temel olarak cihaz üç bölümden (elektron tabancası, manyetik lensler ve detektörler) oluşur. Elektron tabancasından çıkan hızlandırılmış elektronlar manyetik lensler vasıtasıyla odaklanarak numune üzerine gönderilir. Elektron-numune etkileşmesi sonucu saçılan elektronlar çeşitli detektörler vasıtasıyla analiz edilir. Bu saçılan elektronların dedekte edilmesiyle malzeme içerisindeki yapıların mikro ve nano mertebesinde görüntüleme analizi yapılabilir. Analiz sonucunda gerçek yüzey görüntüsü elde edildiği için diğer analiz yöntemlerine göre daha kabul edilir sonuçlar alınmaktadır. Ayrıca incelenecek numune miktarı çok az olsa dahi (hatta gözle görülemeyecek kadar az. örn: polenler) SEM cihazında görüntü analizi gerçekleştirilebilmektedir [124].

Nanokompozitlerin yüzey morfolojisi SEM tarafından gözlemlenir. Saf epoksinin kırılma yüzeyi, tipik bir kırılma kırılma davranışını temsil eden nispeten pürüzsüz bir yüzeye sahip çatlak yayılma yönü boyunca küçük nehir benzeri desenler sergilemiştir. % 1 ve % 2 CNT-epoksi nanokompozitlerin yüzey özellikleri, saf epoksi ile karşılaştırıldığında pürüzlüdür.

Daha spesifik olarak, % 1 CNT-epoksi kompozitlerde, çatlak yayılımı boyunca tepeler ve vadiler görülür. MWCNT'ler % 2 CNT / epoksi kompozitlerde de iyi dağılmaktadır. Özellikle CNT'ün dışarı çekilmesi ile oluşan birkaç boşluk ve delik bölünme düzlemini ortaya çıkarır. Bunlar, % 2 CNT / epoksi kompozitin dayanımında azalmaya yol açabilir. Kırık yüzey morfolojisinin dikkatli bir şekilde gözlemlenmesi ile daha uzun CNT'lerin matristen çıktığı görülür. Bu durum nanotüplerin yüzeyleri ve matris arasındaki arayüzey bağlanmasının zayıf olduğunu doğrular [125]. Aglomerasyon gerilmeye sebep olur bu nedenle çatlak başlar. Çekme numunelerinin kopma yüzeyinin SEM görüntüleri, çatlakların genellikle aglomeralardan başladığını gösterir [62] .



BÖLÜM 2

LİTERATÜR

2.1. EPOKSİ –MWCNT KARIŞIMI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Aydın ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ağırlıkça % 0,1 Grafen ve % 0,5 CNT ayrı ayrı epoksi içerisine karıştırılmıştır. Ultrasonik karıştırıcıda (Hielscher UP400S, Almanya) 90 W'ta 15 dakika boyunca dispersiyonu sağlamak için karıştırma işlemi yapılmıştır. Karışım daha sonra 12 tabakalı yapı oluşturmak için el yatırması metoduyla kumaşı ıslatma işleminde kullanılmıştır. Vakum torbalama yöntemi ile tabakalı kompozitler üretilmiştir [1].

Kumar ve arkadaşları çalışmalarında ağırlıkça % 0,5, % 1 ve % 1,5 MWCNT kullanmışlardır. Aglomerasyonu azaltmak için MWCNT'ü aseton içerisinde 30 dakika boyunca ultrasonik prob ile karıştırmışlardır. İçerisine epoksi ilave ederek 30 dakika boyunca karıştırmaya devam etmişlerdir. Asetonu buharlaştırmak için karışım manyetik karıştırıcıda 80 C° sıcaklıkta karıştırılmıştır. Daha sonra sertleştirici eklenerek el yatırma yöntemi ile cam fiber kumaşlar ıslatılmış ve vakum torbalama işleminden sonra kompozit plakalar üretilmiştir [126].

Pannuel ve arkadaşları aglomerasyonu önlemek için ağırlıkça % 0,3 MWCNT'ü etanol içerisinde ultrasonik karıştırıcı ile 1 saat boyunca karıştırmışlardır. Epoksiyi ekleyerek 1 saat daha karıştırmışlardır. Etanolü uzaklaştırmak için 80 C° sıcaklıkta mekanik karıştırıcı ile karıştırmışlardır. Karışıma sertleştiriciyi de ekleyerek cam fiber kumaşları ıslatmışlar ve 5 tabakalı kompozitleri 2,4 MPa basınç altında 24 saat kürlemeye bırakmışlardır [127].

Chakraborty ve arkadaşları DA'ları uçucu bir organik çözücü içerisinde çözmüş, CNT'leri ise epoksi reçine içerisine ilave etmeden sıvı ortamda karıştırmışlardır. 0,3 g CNT ilave edilmiş ve el ile karıştırma yapılmıştır sonrasında çeşitli dispersiyon araçlarını kullanarak homojenleştirme işlemlerini yapmışlardır. Bu dağıtıcılar yüksek hızlı karıştırıcı, ultrasonik karıştırıcı ve ultrasonik banyodur. Reçinedeki CNT dispersiyonunu artırmak için bu tekniklerden biri veya daha fazlası kullanılmıştır. Karıştırılmış reçinenin, 3 silindirli karıştırıcıdan 10 devir boyunca geçirilmesi ile daha fazla dispersiyon sağlanmıştır. Uygun sertleştirici eklenerek elle birkaç dakika karıştırılmış ve daha sonra oda sıcaklığında (RT) veya 80 ° C'de 15-45 dakika süreyle vakum altında (100 mbar'ın altında) 150 devir / dakikalık bir hızda çalışan bir planet mikseri kullanılarak karıştırma işlemine devam edilmiştir. Daha sonra, kompozit karışımlar, kompozit plakalar yapmak için çelik kalıp içine dökülmüştür, kalıbın 120 C°'de 4 saat ısıtılması ile kompozit kurlenmiştir [76] .

Papadopoulos ve arkadaşları CNT'ü epoksi reçine içerisinde dispers etmek için ultrasonik mikser kullanmışlardır. Karışım bir beher içerisine alınarak ultrasonik prob ile karıştırılmaya devam edilmiş. Karışım sıcaklığının düşük tutulması için kap bir buz banyosuna daldırılmıştır. Daha sonra sertleştirici eklenmiştir. Hava kabarcıklarını uzaklaştırmak için 10 dakika boyunca vakum fırınında bekletilmiştir. Hazırlanan karışım silikon kalıplara dökülerek kurlenmeye bırakılmıştır. CFRP kumaş ise el yatırması ile ıslatılmış ve 16 katlı CNT ilaveli kompozit plakalar sıcak pres altında 60 C sıcaklıkta 100 bar basınç altında 2 saat tutularak üretilmiştir [128].

2.2. MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Gantayat ve arkadaşları MWCNT'ü öncesinde fonksiyonelleştirme işlemine tabi tutmuşlar. Daha sonra farklı ağırlık yüzdelerinde % 0,4, % 0,6 ve % 1,0 f-MWCNT'ü, epoksi reçine içerisine ilave ederek karıştırmışlar ve 2 saat süreyle sonike etmişlerdir. Sertleştiricide eklenerek karışım daha sonra bir kalıp üzerine dökülmüş ve 1-2 saat boyunca 60-110 C°de sertleştirilmiştir. Örneklerin mekanik özelliklerini ASTM D638-00 göre yapmışlardır. F-MWCNT'nin epoksi reçineye ilave edilmesiyle elastisite modülünün ve çekme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir.

Her iki özellikte de maksimum artışlar % 0,6 f-MWCNT ilave edilmesiyle elde edilmiş f-MWCNT değeri arttıkça düşüş gözlemlenmiştir [77].

Zakaria ve arkadaşları Grafen ve CNT'ü 30 dakika DER331 içerisine ekleyerek sonikatör ile karıştırmıştır. Ardından, sertleştirici madde epoksi reçineye 6:10 kütle oranında karışıma dökülmüştür. Oluşan hava kabarcıklarını gidermek için karışım bir vakum içine yerleştirilmiş. Son olarak, epoksi nanokompozitler bir silikon kalıp içine dökülerek 120 C° 'de 1 saat bekletilerek kürlenmeye bırakılmıştır. İlave edilen MWCNT ağırlıkça yüzde miktarı % 0,5, % 1 ve % 3 tür. Çekme ve eğilme numuneleri sırasıyla ASTM D638 ve ASTM D790 standartlarına göre hazırlanmış ve test edilmiştir. Test sonuçlarının güvenilirliğini sağlamak için her test için beş numune test edilmiştir.

Bu çalışmada Epoksi / MWCNT kompozit Epoksi / GNP'ye kıyasla daha yüksek çekme dayanımı, elatisite modülü, eğilme dayanımı ve eğilme modülü göstermiştir. Çalışmada saf epoksi çekme dayanımı 46,46 MPa olarak bulunmuştur. % 0,5 MWCNT içerikli epoksi kompozitin 50,25 MPa, % 3 MWCNT içerikli kompozitin ise 54,48 MPa'dır. En yüksek çekme dayanımı saf epoksi ile karşılaştırıldığında % 26 artışla yaklaşık 58,65 MPa olan, %1 MWCNT içerikli epoksi kompozittir. Saf epoksi ile karşılaştırıldığında en yüksek eğilme dayanımı % 1 MWCNT içerikli epoksi kompozitte görülmüştür, % 29 artışla 126,70 MPa'dır. Saf epoksinin elatisite modülü 1,48 GPa, % 1 MWCNT içerikli epoksi kompozit en yüksek elatisite modüle sahiptir, 1,87 GPa'dır. Saf epoksi ile karşılaştırıldığında % 26'lık bir artışla sağlanmıştır. % 1 MWCNT içerikli epoksi kompozitin numunelerinin eğilme modülü, saf epoksi ile karşılaştırıldığında eğilme modülü % 38'e kadar artmıştır. % 0,5 ve % 3 MWCNT içerikli epoksi kompozitlere göre % 1 MWCNT içerikli kompozitin mekanik özellikleri daha yüksek çıkmıştır [60].

Gkikas ve arkadaşları CNT'leri epoksi içerisinde ilave ederek ilk olarak ultrasonik mikser (UP400S, Hielscher) kullanarak karıştırma işlemini yapmışlar daha sonra karıştırma işleminde Ultrasonik prob kullanmışlardır. CNT yüzeyinde aşırı ısınmayı ve kusurların oluşmasını önlemek için, karıştırma kabını buz banyosu içerisine bırakarak karışımın sıcaklığının düşmesini sağlamışlardır.

Çalışmalarında ağırlıkça % 0,5 ve % 1 CNT kullanmışlardır. Karıştırma sürelerini araştırmak için ise 0,5, 1,2 ve 4 saat süreyle karıştırmışlar ve Ultrasonik karıştırıcı %100 genlik seviyesinde tutulmuştur. Karışıma sertleştirici eklenerek 10 dakika boyunca karıştırılmıştır, oluşan hava kabarcıkları ve boşlukların giderilmesi için vakum fırınına yerleştirilmiştir. Karışım silikon kalıplara dökülerek 2 saat 60 C° sıcaklıkta kürlenmeye bırakılmıştır. Çekme testi numuneleri ASTM 638-3 standardına göre hazırlanmış, 0,5 mm/dak. hızla çekme işlemi yapılmıştır. CNT ilavesiyle çekme dayanımının ve gerinim değerinin arttığı söylenmiştir. 4 saatlik sonikasyonda ağırlıkça % 1 CNT takviyeli kompozitin gerilme modülünde hafif bir iyileşme görülmüştür [40]

Nadler ve arkadaşları CNT'e üç farklı fonksiyonlaştırma işlemi yapmıştır (PVB, OH, D2070) % 0,5 ve % 1 CNT ilave edilen epoksi reçine üç silindirik karıştırma cihazı kullanılarak dispersiyon yapılmıştır. Sertleştirici ilave edilerek kürlenmeye bırakılmıştır. 3 noktadan eğme testi için numuneler 80x10x4 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. En yüksek mekanik özellik % 0,5 PVB-CNT ile elde edilmiştir [97]. Gaurav ve arkadaşları çalışmalarında MWCNT'ü başlangıçta aseton içerisinde 30 dakika boyunca yüksek enerjili prob ile dispersiyon işlemi yapmışlardır. Karıştırma işlemi 10 dakikada bir, numunedeki rengin değişimi ile dispersiyon durumunu değerlendirmek için durdurulmuştur. Daha sonra karışıma reçine ekleyerek 10 saat boyunca devam etmişlerdir. Karışım 1 saat boyunca vakum altında tutularak gazdan uzaklaştırılmıştır. Sertleştirici reçine içerisine karıştırıldıktan sonra açık kalıba dökülerek kürlenmeye bırakılmıştır. Yarı-izotropik cam fiber kumaşlar [(0/90)₂/(45/45)₂, (0/90)] 4 katlı olarak önce el yatırması ve ardından pres kalıplama ile hazırlanmıştır. Çekme testi için numuneler 200x25x3 mm boyutlarında kesilmiştir. Sırasıyla epoksi ve GFRP nanokompozitlerin gerilme-gerinim davranışını incelemişlerdir. Matris içine MWCNT'lerin eklenmesinin, epoksi ve GFRP malzemenin tokluğunu arttırdığı görülmüştür. Ağırlıkça az miktarda, % 0,5, % 1, % 1,5 ve % 2 MWCNT eklenmesi epoksinin dayanımını sırasıyla % 3,5, 14,5, 22,9, 28,1 ve % 30,3 artırmış, GFRP nanokompozitlerde ise % 0,38, 7,5, 10,2, 13,3 ve % 15,2 olarak artırmıştır [117].

Gojny ve arkadaşları camı, viskoelastik ve kauçuksu yapı içerisinde MWCNT içerikli epoksi nanokompozitlerin çekme davranışını karakterize etmek için bir araştırma yapmıştır. Bu çalışmada ağırlıkça % 1 ve % 2 MWCNT epoksi içerisine eklenerek dispersiyon işlemi yapılmıştır. 25 C° - 140 C° sıcaklıklar arasında gerilme –gerinim davranışı ve tokluk belirlenmiştir. Çalışmada saf epoksi ile karşılaştırma yapıldığında tüm sıcaklık aralıklarında % 1 MWCNT’ün ilave edilmesi önemli ölçüde gerilme dayanımını ve modülü artırmıştır. % 2 CNT nanokompozit durumunda ise elastisite modülü epoksi sistemine kıyasla aynı kalırken gerilme dayanımı biraz azalmıştır. Düşük sıcaklıklarda, modifiye edilmemiş ve CNT ile modifiye edilmiş epoksi sistemleri kırılma davranışları sergilemiştir. 90 C° sıcaklıklarda, modifiye edilmemiş ve % 1 CNT modifiyeli epoksi sistemi, verimsiz sünek davranış sergilemiştir. Bununla birlikte, 100 C°’de, % 2 CNT modifiyeli epoksi sistemi, verimli sünek bir davranış sergilemiştir. Ayrıca, sıcaklık arttıkça ve Tg’ye (viskoelastik bölge) yaklaştıkça, epoksi modülde ve dayanımda önemli bir düşüş göstererek plastikleştiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda farklı sıcaklıklardaki çekme testlerine dayanarak, % 1 CNT-epoksi nanokompozitlerinin tüm test sıcaklıklarında en yüksek mukavemete ve modüle sahip olduğu sonucuna varılmıştır [125]. MWCNT ilk önce maksimum aglomera boyutunu yaklaşık olarak 100 mikrona azaltmak için manyetik karıştırıcı ile metanol çözeltisi içinde dağıtılmıştır. Metanolün tamamen buharlaştırılmasından sonra, elde edilen MWCNT tozu daha sonra doğrudan epoksi reçine Bisfenol A / aromatik sertleştirici karışımına ilave edilmiştir. Son olarak, manuel olarak homojenleştirmeden sonra kalıplara enjekte edilmiştir.

Allaoui ve arkadaşları MWCNT’ü ilk önce maksimum aglomera boyutunu yaklaşık olarak 100 mikrona azaltmak için manyetik karıştırıcı ile metanol çözeltisi içinde dağıtmıştır. Metanolün tamamen buharlaştırılmasından sonra, elde edilen MWCNT tozu daha sonra doğrudan epoksi reçine Bisfenol A ve sertleştirici karışımına ilave edilmiş ve karışım kalıplara dökülmüştür. Ağırlıkça % 4 MWCNT ilaveli reçine numunesi çok viskoz olduğu için homojenleştirme işlemi zor olmuştur. Sertleşme sırasında oluşan gözenekleri azaltmak için ise numuneler basınç altında iki metal plaka arasına yerleştirilmiştir. Çekme testi sonrası, gerilme seviyesi eklenen CNT ile artmıştır. Elastisite modülü ve kompozitin akma dayanımı, ağırlıkça % 1 CNT ilavesiyle iki katına çıkarken ve ağırlıkça % 4 CNT ilavesiyle dört katına çıkmıştır.

Elastisite modülü ve ağırlıkça % 1 kompozitin akma dayanımı, saf matrise kıyasla sırasıyla % 100 ve % 200 artmıştır. CNT ağırlık yüzdesi eşiği ağırlıkça % 0,5 ila % 1 CNT olduğu tahmin edilmiştir [79].

Ghosh ve arkadaşları MWCNT dağılımında manyetik karıştırma ile ultrasonik karıştırma işlemini eşzamanlı olarak kullanmışlardır. Ağırlıkça % 0,5, % 1 ve % 1,5 MWCNT'ler epoksi reçine içine dağıtılmıştır. Sertleştirici eklenmiş ve vakum fırınına yerleştirilerek hava kabarcıkları uzaklaştırılmıştır. Aşırı sıcaklık artışı önlemek için karışım sonikasyon işleminde su banyosunda tutulmuştur. Daha sonra karışım çekme testi kalıplarına ve ince film kalıplarına dökülmüştür. Çalışmada manyetik ve ultrasonik karıştırmanın CNT demetlerini kırabildiğini, MWCNT'lerin matristeki homojen dağılımını geliştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Artan MWCNT içeriği ile kompozitin çekme dayanımı ve tokluğunun arttığını görülmüştür. Sonikasyonun genliği % 70'de sabitlenerek karıştırıldığında, % 1,5 MWCNT içeren epoksi saf epoksi ile karşılaştırıldığında çekme dayanımında % 21, toklukta ise % 36 artış sağlanmıştır [80].

Korayem ve arkadaşları çalışmalarında saf epoksinin elastisite modülünü yaklaşık 1985 MPa ve gerilme dayanımını yaklaşık 40 MPa olarak hesaplamıştır. Ağırlıkça % 0,1 CNT'nin epoksiye dahil edilmesi, epoksi dayanımını ve modülünü geliştirmiştir. Çekme dayanımı 40,1 MPa'dan 44,7 MPa'a yaklaşık % 10 artmıştır. Elastisite modülü, 1985 MPa'dan 2180 MPa'a yaklaşık % 10 oranında artarken, gerilim değeri, saf epoksi reçinesine yakın ölçülerde bulunmuştur. Çekme dayanımındaki düşük iyileşmenin sebebinin, CNT ve matris arasındaki arayüzey etkileşiminin zayıf olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Düşük arayüzey etkileşimleri, kompozitlerin kopması sırasında CNT'nin dışarı çekilmesine sebep olmuştur [61].

Jian Guo ve arkadaşları MWCNT'e fonksiyonelleştirme işlemi yapmışlardır. MWCNT-NH₂ ve MWCNT-BGE TDE -85 içerisine ilave edilerek 80 C° sıcaklıkta 4 saat, 130 C°'de 2 saat mekanik olarak karıştırılmıştır. Sonra 2 saat boyunca ultrasonik olarak karıştırılmaya devam edilmiştir. MWCNT miktarı ağırlıkça 0, 0,025, 0,05, 0,1, 0,25, 0,5, 0,6 ilave edilerek epoksi karışım elde edilmiştir. Karışım etanol içerisine eklenerek 1 saat ultrasonik olarak karıştırılmıştır.

Hazırlanan karışım karbon fiber prepreg üzerine doğrudan püskürtülmüştür. 16 adet prepreg sıcak pres yöntemi ile kürlenmiştir. Tabakalar arası kayma testi yapılmıştır. MWCNT-BGE karbon fiber epoksi kompozit plakaların ILSS değeri, CFRP'den daha yüksek bulunmuştur [62].

Peng-Cheng Ma ve arkadaşları çalışmalarında 10-20 nm çapında ve 10-50 µm uzunluğunda CNT kullanmışlardır. CNT fonksiyonelleştirme işlemi ile amino-CNT haline getirilmiştir. CNT'ler epoksi içerisine ilave edilmeden 1 saat boyunca 60 C ° ve 80 C ° sıcaklıkta etanol içerisinde dağıtılmıştır. Karışım içerisindeki sıkışan havayı ve etanolü uzaklaştırmak için 80 C ° sıcaklıkta 5 saat gaz giderme işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra sertleştirici eklenerek kompozit reçine düz bir plaka halinde kalıplanmıştır. Farklı ağırlık değerlerinde (yani ağırlıkça % 0,05, 0,10, 0,25 ve % 0,50) P-CNT ve amino-CNT içeren kompozitler hazırlanmıştır. ASTM standardı D790-96'ya göre kompozitlerin eğilme özelliklerini ölçmek için üç noktadan eğme testi yapılmıştır. Karbonnanotüp içeriği yaklaşık % 0,1 CNT doygunluğa ulaşmadan önce, CNT içeriğinin artmasıyla P-CNT içeren kompozitin eğilme modülü hızla artmıştır. İşlevselleştirilmiş CNT'ler (hem silan-CNT'ler hem de amino-CNT'ler) içeren kompozitler; aynı CNT içeriğindeki P-CNT göre, tüm CNT oranlarında modülde daha belirgin bir artış sergilemiş ve daha yüksek bir modül göstermiştir.

İşlevselleştirilmiş CNT içeren kompozitlerin dayanımları, P-CNT'den daha yüksektir. Hem modül hem de dayanımdaki gelişmeler, işlevselleştirmeden sonra CNT dağılımının daha iyi olmasına ve işlevselleştirilmiş CNT ve matris yapışmasının güçlü olması sonucuna dayandırılmıştır. Çalışmada P-CNT içeren kompozitlerindayanımları ağırlıkça % 0,05 'in CNT üzerinde ilave edilmesiyle hızla düştüğü, silan-CNT ve amino-CNT içeren kompozitlerin dayanımları % 0,25'e kadar artmaya devam ettiğini, bu da fonksiyonelleştirilmiş CNT'ler ve matris arasındaki gelişmiş arayüzey etkileşiminden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Eğme dayanımları başlangıçta iki İşlevselleştirilmiş CNT arasında benzerdir, ancak amino-CNT içeren kompozitler CNT içeriği ağırlıkça % 0,5 olduğunda daha iyi performans göstermiştir. Amino-CNT'lerin, özellikle yüksek CNT içeriklerinde, kompozitlerin mekanik özelliklerinin artırılmasında daha etkili olduğu anlaşılmıştır [65].

Montazer ve arkadaşları çalışmalarında % 0,5 MWCNT'ü epoksi reçine içerisine ekleyerek el ile karıştırmışlar ve sonrasında nanokompozit üzerinde farklı 25, 50 ve 100 W güç değerleri ile 15, 45 ve 135 dakika karıştırma sürelerini araştırmak için sonikasyon işlemine devam etmişlerdir. Karışıma sertleştirici eklenmiş ve karışım çelik kalıplara aktarılarak oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır. Çekme dayanımı, elastisite modülü ve gerinim değerlerini bulmak için çekme testi yapılmıştır. Çekme işlemi 1,5 mm/dak. hızla yapılmıştır. Bu oldukça düşük yükleme oranının seçimi, nanokompozitlerin kırılma doğasından kaynaklanmaktadır.

Çalışmada 25 ve 100 W çıkış güçlerinde, sonikasyon süresindeki artışla, çekme dayanımının zirveye ulaştığı ve daha sonra düşme eğilimi gösterdiği görülmüştür. 15 ile 45 dakika sürelerinde arasındaki fark önemsizdir, 50 W'lık güçte çekme dayanımı artmıştır. Düşük çıkış gücü ve düşük karıştırma süresinin MWCNT dağılımında etkili olmadığı görülmüştür. Yüksek çıkış gücü (100 W) ve düşük karıştırma süresinin MWCNT'lerin dağılmasında etkili olduğu görülmüştür. Tüm sonikasyon güçlerinde ve zamanlarında, nanokompozitlerin gerilme dayanımı, saf epoksininkinden daha yüksektir. En iyi dağılım 45 dakikadan sonra 25 W ve 100 W'da elde edilmiştir. Sonikasyon süresindeki artış MWCNT'ün aglomerasyonunda azalmaya ve sonuç olarak bunların epoksi matrisinde daha iyi dağılmasına neden olmuştur. Saf epoksi ile karşılaştırıldığında, 25 W ve 100 W 'da gerilme modülü azalmıştır. 50W'da 45 dakika sonikasyonla en yüksek gerilme modülü elde edilmiştir. Tüm sonikasyon güçlerinde, sonikasyon süresindeki artışla, gerilme modülü yükselen bir eğilim göstermiş sonra düşmüştür. 135 dakika sonikasyon süresi, yüksek modüllü nanokompozitleri üretmek için uygun bir süre olmadığı sonucuna varılmıştır [66].

Bu çalışmada 10-20 nm çaplı 10-15 μ m uzunluğa sahip MWCNT, bisfenol A epoksi, Triton X -100 sürfaktan kullanılmıştır. İlk olarak MWCNT'ün aglomerasyonunu azaltmak için aseton içerisinde sonike edilmiştir. Triton X-100 sürfaktanın 1 Kritik misel konsantrasyonu (CMC) ve 10 CMC konsantrasyonu ile karıştırılmış MWCNT ve işlem görmemiş MWCNT'ler oda sıcaklığında 6 saat boyunca sonike edilmiştir. Epoksi ısıtılarak viskozitesi düşürülmüştür. Epoksi içerisine farklı ağırlıklarda % 0,025, % 0,05, % 0,06, % 0,08, % 0,1 ve % 0,25 MWCNT ilave edilmiştir.

Karışım, 60 C° 'de 2 saat süreyle ultrasonikasyona tabi tutulmuş, etanol ve hava kabarcıklarından uzaklaştırmak için vakum fırınında tutulmuştur. Karışıma sertleştirici eklenmiş ve kalıplara dökülerek nanokompozitler üretilmiştir. Oda sıcaklığında ve 200 C° sıcaklıklar arasında 3 nokta eğme testi yapılmıştır. CNT içeriğinin artmasıyla, yüzey aktif madde Silan ve Triton X-100 ile işlenmiş CNT'lerle takviye edilmiş nanokompozitlerin hem eğme dayanımı hem de modülü sürekli olarak artmıştır. CNT içeriği yaklaşık % 0,05 -% 0,1 değerinde en yüksek zirveye ulaşmış sonrasında ise değerler düşmüştür. %0,05 CNT içeriğine sahip nanokompozitin eğilme dayanımındaki azalma, homojen olmayan dağılmadan kaynaklandığı sonucuna varılmıştır [13].

Jaemin Cha ve arkadaşları çalışmalarında CNT'leri PSS ve PAS ile fonksiyonelleştirme işlemine tabi tutmuşlardır. Epoksi reçineyi, aseton ve DMF yardımcı çözücüsü içerisinde daha önce karıştırılmış CNT çözeltisine ilave etmişler ve sonrasında sertleştirici ekleyerek sonikasyon işlemi yapmışlardır. Sonikasyon işleminden sonra, solventi buharlaştırmak için 135 C° sıcaklıkta 3 saat mekanik olarak karıştırmaya devam etmişlerdir. Karışım gazdan arındırılarak metal kalıba dökülerek kürlenmeye bırakılmıştır.

PAS-CNT'den ağırlıkça % 0,5 - % 3 oranlarında nanokompozitler üretilmiştir. Saf CNT ve PSS-CNT'den ise ağırlıkça % 1 oranında hazırlanmıştır. Saf epoksinin Elastisite modülü ve nihai çekme dayanımı sırasıyla 2,76 GPa ve 61,51 MPa'dır. PAS-CNT'lerin eklenmesi modülü ve dayanımı etkili bir şekilde artırmıştır. Ağırlıkça % 1 PAS-CNT'lerde, nano kompozitlerinin elastisite modülü ve nihai çekme dayanımı, sırasıyla % 41 ve % 34'lük artışlara karşılık gelen 3,89 GPa ve 82,57 MPa olarak bulunmuştur. İşlevselleştirilmemiş CNT epoksilerin mekanik özelliklerinde elastisite modülü biraz artış gösterirken çekme dayanımı düşmüştür, PSS-CNT epoksi nanokompozitin modülü ve çekme dayanımı çok az artmıştır. Modül 2,76 GPa'dan 3,45 GPa'a (% 25) ve gerilme dayanımı hafifçe 61,51 MPa'dan 62,63 MPa'a (% 13) yükselmiştir. Sonuç olarak, epoksi matrisinde daha etkili yük transferi PAS-CNT epoksi nanokompozitler ile elde edilmiştir. Saf epoksi ile karşılaştırılınca, PAS-CNT'lerin modül ve dayanımları, CNT ve PSS-CNT'lerden daha fazla artmıştır.

% 0,5 PAS-CNT içerikli nanokompozitte elastisite modülü % 19 artarak 3,26 GPa'a yükselmiş ve bu içerikteki gerilme dayanımı sadece % 23'e artarak 76,77 MPa'a yükselmiştir. Ek olarak, epoksiye ağırlıkça % 1'den fazla PAS-CNT eklendiğinde, modül ve dayanım azaltılmıştır. Bu çalışma ile nonkovalent olarak fonksiyonelleştirilmiş CNT'lerin epoksi nanokompozitlerin mekanik özelliklerini artırdığı kanıtlanmıştır. Saf epoksi ile karşılaştırıldığında ağırlıkça % 1 PAS-CNT kullanılması elastik modülün ve gerilme dayanımının artmasında etkili olduğu sonucu bulunmuştur [129].

Song ve Youn yapmış oldukları çalışmalarında ağırlıkça % 0,5, %1 ve % 1,5 CNT önce etanol içerisinde 2 saat sonikasyon işlemine tabi tutulmuş, karışıma epoksi reçine eklenerek 80 C° sıcaklıkta 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Karışımdan etanol ve gaz kabarcıkları uzaklaştırılması için karışım 5 gün boyunca vakum fırınında tutulmuştur. Daha sonra sertleştirici eklenerek karışım kalıplara dökülmüştür. Solvent kullanılmadan da nanokompozitler hazırlanmış ve 3 saat sonikasyon işlemi yapılmıştır. Çalışmada CNT içeriği arttıkça Elastisite modülü artmıştır. CNT içeriği arttıkça, CNT'lerin homojen dağılması kompozitin çekme dayanımını artırmıştır, fakat CNT'lerin homojen dağılmadığı durumda ise kompozitin çekme dayanımı azalmıştır. Bunun sebebi; kompozitte bulunan CNT aglomerasyonudur, aglomerasyon çatlakların kolayca başlamasına ve yayılmasına neden olmuştur. Oluşan çatlaklar, kompozitin dayanımını azaltmıştır. CNT içeriği arttıkça hem homojen dağılmış hem zayıf dağılmış nanokompozitlerin kopma gerinimi azalmıştır özellikle zayıf dağılma göstermiş nanokompozitlerde bu azalma daha büyük olmuştur. CNT epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri umulanın aksine gelişmemiştir [69]. Bunun 2 sebebi şöyle belirtilmiştir; ilki CNT'ler ve çevresindeki matris arasındaki zayıf bağlanmadır. CNT'ler ile polimer reçinesi arasındaki arayüzey bağının zayıf olduğu ve polimerden CNT'lere yük aktarımının, CNT'lerin gerilme yükü altında kopması için yeterince büyük olmadığı bildirilmiştir [130,131]. Bunun yerine CNT'ler dışarı çekilme eğilimindedir. İkinci neden, CNT'lerin dış kabuklarının yapısı ile ilgilidir. MWCNT'lerin ayrı ayrı grafen kabukları arasında zayıf van der Waals kuvvetleri bulunduğu için, kabuklar arasında kayma meydana getirecek olmasıdır [69].

Revathi ve arkadaşları çalışmalarında ağırlıkça % 1 ve % 2 MWCNT kullanmışlardır. İlk olarak MWCNT'ler epoksi içerisine ilave edilerek 1 saat boyunca Sonikasyon işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra hava kabarcıklarını almak için vakum fırınına bırakılmış. Sonrasında ise sertleştirici eklenerek çözelti metal kalıp içerisine dökülerek kürlenmeye bırakılmıştır. Bu çalışmada CNT ilaveli ve saf epoksi kompozitlerin camsı, viskoelastik ve kauçuk durumlarında çekme davranışları incelenmiştir. Farklı sıcaklıklarda çekme davranışı ve tokluk incelenmiştir. Çekme testi sonuçları % 1 CNT ilaveli kompozitlerin dayanım ve modülünün arttığını göstermiştir. Tüm CNT ilavelerinde kompozitlerin tokluğunun arttığı gözlemlenmiştir. ASTM D 638 (Tip IV) standardına göre hazırlanan çekme numuneleri Tg'nin altındaki ve üzerindeki sıcaklıklarda test edilmiştir. Saf epoksi ile karşılaştırıldığında tüm sıcaklık Aralığında % 1 CNT ilaveli nanokompozitin çekme dayanımının biraz arttığı ve Elastisite modülün önemli ölçüde iyileştiği görülmüştür. % 2 CNT ilaveli nanokompozitte, çekme dayanımı hafifçe azalırken, Elastisite modülü saf epoksi ile aynı kalmıştır. Bu durum işlem esnasında boşlukların oluşmasına sebep olan viskozitenin yüksek olmasına, matris ve nanotüp arasındaki zayıf arayüz bağına bağlanmıştır [132] .

Thostenson ve arkadaşları epoksi içerisine % 1 - % 5 arasında ağırlıkça nanotüp eklemiştir. 3 noktadan eğme testi yapmışlardır. Düşük karbon nanotüp konsantrasyonlarında kırılma tokluğunda artış olmuştur [133] .

Shen çalışmasında epoksi reçinesi için takviye malzemesi olarak farklı amino grup ile fonksiyonelleştirilmiş MWCNT'leri seçerek nanokompozitler hazırlamıştır. 3 noktadan eğme testi yapılmıştır. Eğme modülü ve eğme dayanımı MWCNT'lerin eklenmesiyle artmıştır. Ağırlıkça % 2 nanotüp eklenmesi epoksi içerisinde zayıf dağılıma sebep olmuş ve eğme dayanımının düşmesine sebep olmuştur. Ağırlıkça % 2 MWCNT içeren kompozitlerin eğme dayanımı, ağırlıkça % 1 MWCNT içeren kompozitlerden daha düşüktür, ancak yine de saf reçineden çok daha yüksektir. Eğme dayanımı ve modülündeki düşüş CNT içeriğinin artmasıyla aglomerasyonun artmasına bağlanmıştır. İşlevselleştirilmiş MWCNT ile epoksi arasındaki güçlü bağlar nedeniyle, % 1 MWCNT içeren küçük aglomerasyona sahip epoksinin eğilme dayanımı % 0,25 MWCNT içeren kompozitten daha yüksektir [108].

Bru ve arkadaşları tek dokuma karbon fiber kıvrımsız kumaş (NCF) ile güçlendirilmiş bir epoksi polimerinin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Testler tek yönlü tabakalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tabakalar reçine transfer ve vakum infüzyon ile üretilmiştir. Çekme testi boyuna (fiber yönünde) ve enine yönde yapılmıştır ve değerler kaydedilmiştir [25] .

Huayamares ve arkadaşları yarı izotkopik CFRP kompozitin 3 noktadan eğme testini yapmışlardır. Numuneler kesilirken fiber yönüne dikkat edilmiştir. Numuneler, her iki durumda da aynı yarı izotkopik düzenlemeyi elde etmek için iki dikey yönde (yatay ve dikey) kesilmiştir. Testler ASTM D5023-07 ve ASTM E1640-18 standardına göre yapılmıştır. Karbon fiber liflerin daha az sertliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir [134].

Faulstich de Paiva ve arkadaşları bu çalışmalarında 4 farklı CFRP tabakanın çekme dayanımını incelemişlerdir, (0/90) fiber yönüne sahip prepreg malzemelerdir. ASTM D3039 Standardına göre testleri yapılmıştır (250 mm uzunluk, 25 mm genişlik x 2-3 mm kalınlık). Çekme dayanımı ve elastisite modülü sırasıyla, F155/PW kompozit için 950,5 MPa, 57,8 GPa; F155/8HS kompozit için 810 MPa, 67,8 GPa; F584/PW kompozit için 1185,4 MPa, 65,6 GPa; F584/8HS kompozit için 985,9 MPa, 1,5 GPa bulunmuştur [135].

Kim ve arkadaşları tarafından karbon fiber dokuma kumaşlar ve karbon fiber keçeler ile takviye edilmiş epoksi reçine matrisli kompozitlerin düzlem içi çekme ve basma özellikleri karşılaştırılmış ve örgü deseni ile iğne delme yoğunluğunun etkileri araştırılmıştır. Takviye edici fiber için, poliakrilonitril (PAN) esaslı karbon fiberler kullanılmıştır. Matris olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Karbon fiberler üç farklı örgü deseni, düz örgü, 2/2 dimi örgü ve 8 koşum saten dokuma ile kumaşlar haline getirilmiştir. Kompozit tabakalar vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. CFRP epoksinin çekme dayanımı yaklaşık 0,6 GPa, elastisite modülü ise yaklaşık 50 GPa bulunmuştur [110].

Zhang ve arkadaşları çalışmalarında işlevselleştirilmiş MWCNT-COOH ve MWCNT NH₂ (ağırlıkça % 0,25, % 0,5, % 0,75 ve %1), epoksi reçinesine ekleyerek karıştırmışlardır.

Sertleştirici ekleyerek kalıplara dökerek kürlenmeye bırakmışlardır. Tek yönlü T300 CF epoksi kompozitler ve T700 CF epoksi kompozitler manuel sarım ile hazırlanmıştır, numuneler termal kürlenme için bir fırına yerleştirilmiştir. ASTM D638 standardına göre epoksi numunelere çekme testi yapılmıştır. CF epoksi kompozitlere ise eğme testi yapılmıştır. MWCNT-NH₂ içeriği ağırlıkça % 0,5'e yükseldiğinde, gerilme özelliklerinde en dikkate değer gelişmeyi sergilemiştir. MWCNT-NH₂ ile karşılaştırıldığında, MWCNT-COOH'nin daha zayıf dispersiyon sergilediği görülmüştür. MWCNT-COOH içeren epoksi numunelerde ağırlıkça % 0,25 MWCNT içeren epoksiler en yüksek dayanımı göstermişlerdir. MWCNT-NH₂ epoksi kompozitler çekme dayanımı ve gerinimde önemli gelişme gösterirken, MWCNT-COOH elastisite modülünde büyük bir artış göstermiştir [70].

Tomita ve Mitsunori çalışmalarında 2 farklı tek yönlü uzun karbon fiberli epoksi kompozit kullanmışlardır. Sırasıyla fiberlerin ortalama kopma gerilmesi 3,5 GPa ve 5,5 GPa'dır. 3,5 GPa CF/RE (karbon fiber epoksi kompozit) 16 katlı prepreg tabakadan oluşmaktadır, basınç altında sıcak presleme yöntemi ile üretilmiştir. 3,5 mm kalınlığındadır. 5,5 GPa CF/RE 19 katlı prepreg tabakadan oluşmaktadır. Pürüzsüz ve çentikli çekme testleri oda sıcaklığında yapılmıştır. Pürüzsüz çekme testinde, 3,5 GPa sahip fiberli kompozitin kopma gerilmesi yaklaşık 1300 MPa, 5,5 GPa sahip fiberli kompozitin 1600 MPa bulunmuştur. Çentikli çekme testinde ise 5,5 GPa fibere sahip kompozitin değerlerinde azalma görülmüştür. SEM mikroskobu ile kırılma yüzeyleri gözlemlenmiştir. SEM gözlemleri, 3,5 GPa CF / RE kompozitinin kırılma işleminin, fiberdeki kırılma kırılmadan oluştuğunu, ardından kırılma bir şekilde matrise doğru uzadığını ve fiberlerin dışarı çekildiğini göstermiştir. 5,5 GPa karbon fibere sahip kompozit için SEM gözlemleri, fiber-matris arayüzey kırığının meydana geldiğini ve kırılma işleminin, epoksi matrisinden fiber ayrılmasından oluştuğunu göstermiştir. Çentikli çekme testinde ise makroskopik incelemeler, yükleme yönüne yaklaşık olarak paralel olan kırığın, kompozit tiplerinden bağımsız olarak V çentikleri altında olduğunu göstermiştir. SEM gözlemleri ise, kırığın fiber-matris arayüzeylerinde meydana geldiğini ortaya koymuştur [111].

Al-Mosawe ve arkadaşları düşük, normal ve yüksek modüle sahip CFRP plakaların çekme dayanımlarını araştırmışlardır.

CFRP plakalar darbe yükünün mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için statik ve dinamik yük altında test edilmiştir. Sonuçlar yüksek gerinim oranları altında mühendislik özelliklerinde önemli bir artış gösterirken, çekme gerilimi % 55'e kadar artırılırken, elastik modülü ve nihai gerilim, yüksek gerinim oranları altında sırasıyla % 20 ve % 36'ya kadar artmıştır [112].

Okayasu ve Tsuchiya uzun tek yönlü (UD) ve çapraz (CR) CFRP kompozitlerin mekanik özelliklerini (eğme, çekme, yorulma) oda sıcaklığında ve düşük bir sıcaklıkta incelemişlerdir. Karbon fiber prepreg kumaşlar 1 mm kalınlığında dizilerek CFRP plakalar halinde sıcak presleme ile üretilmiştir. % 60 karbon fiber içeren UD-CFRP ve CR-CFRP kompozitlerinin mekanik özellikleri birbirinden farklı bulunmuştur. UD-CFRP'nin eğme dayanımı, CR-CFRP'nin eğme dayanımının yaklaşık iki katıdır. UD-CFRP kompozitte epoksinin mekanik özellikleri sıcaklık düştükten sonra artmıştır. Oda sıcaklığında CR-CFRP eğme dayanımı 1000 MPa iken, UD-CFRP 1800 MPa'dır. Oda sıcaklığında çekme dayanımı UD-CFRP 2300 MPa'dır [113].

Zhang ve arkadaşları tek yönlü CFRP (UT70-30G / CFSR-AB) ve düz dokuma CFRP (CFS-400 / CFSR-AB) olmak üzere iki tip CFRP kompozit kullanmışlardır. CFRP kompozit malzemenin hazırlanmasında elle yatırma yöntemi kullanılmıştır. Tek yönlü CFRP plakanın fiber dayanımı 4319,78 MPa, Elastisite modülü 252 GPa, gerinim % 1,8'dir, düz dokuma CFRP'de ise fiber dayanımı 2102,96 MPa, elastisite modülü 194,12 GPa, gerinim % 1,06 olarak bulunmuştur. Her iki CFRP tipinin gerilim-gerinim eğrileri, CFRP fiberinin kopmasına kadar lineer kalmıştır. Tek yönlü CFRP plakalarda fiberlerin yaklaşık tamamı kopmuştur, düz dokuma CFRP'de ise kopması çok düzgün ve küçük bir alanla sınırlı olmuştur. Bunun nedeni, fiberlerin atkı yönünde, yani test yönüne dik yönde tutulması olduğu sonucuna varılmıştır [114].

Durgun ve arkadaşlarının çalışmalarında polimer esaslı karbon ve cam fiber takviyeli kompozit bir malzemenin farklı üretim teknikleri ile üretilmesi durumundaki mekanik özellikleri incelenmiştir. Matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Karşılaştırılması yapılan üretim teknikleri el yatırma, vakum torbalama ve vakum infüzyondur.

Mekanik özelliklerin tespitinde kullanılacak olan çekme ve üç nokta eğme deneyleri için 1 mm kalınlığındaki plakalardan standartlara uygun numuneler kesilerek test edilmiştir. Karbon fiber kompozitin el yatırması ile üretilenin numunesinin çekme dayanımı 299 (N/mm²), vakum torbalama 619 (N/mm²) ve vakum infüzyon ile üretilen kompozitin çekme dayanımı ise 634 (N/mm²)'dir. Elastisite modülü ise sırasıyla, 21200 (N/mm²), 32300 (N/mm²), 35200 (N/mm²). Eğme mukavemeti; 387 (N/mm²), 583,8 (N/mm²), 796,6 (N/mm²). Eğme modülü 25360 (N/mm²), 49940 (N/mm²), 59200 (N/mm²) [136].

Sudarisman tek yönlü karbon fiber prepreg plakaları hazırlamada farklı oranlarda reçine kullanmıştır. Reçine oranının eğme testleri sonuçlarına etkisi incelenmiştir. Elde edilen prepreg plakalar, beş farklı basınçta (0,25 – 1,25 MPa) ve farklı tutma süresi (20 - 40 dakika) kullanılarak 120 C ° sıcaklıkta otoklavda vakum altında kürleme işlemine tabi tutulmuştur. Basınç değerlerinin ve tutma süresinin eğme sonuçlarına etkisi araştırılmıştır. Numunelere, ASTM D790-03 standardında üç nokta eğme testi yapılmıştır. Eğilme dayanımı; ağırlıkça % 50 epoksi reçine kullanıldığında, 1,0 MPa basınç altında ve 30 dakika tutma süresi içerisinde kürlendiğinde maksimum 1292 MPa'dır [137]. Tomita ve arkadaşları tek yönlü (0°), ortotropik (0° / 90°) ve izotropik (0 / 90° / + 45° / -45°) prepreg kumaşlar kullanarak 3 noktadan eğme testi yapmışlardır. Ortotropik (0°/90°) numunelerin 45° ve 90° yönünde mekanik özellikleri önemli ölçüde azalmıştır. Yarı izotropik (0° / 90° / + 45° / -45°) kompozitte mekanik özellikler artmıştır [138].

Azimpour Shishevan ve arkadaşları çalışmalarında CFRP kompozit malzeme kullanmışlardır. Reçine içerisine % 0,1 CNT, % 0,5 CNT eklenerek ASTM D3039 standardına göre çekme numuneleri hazırlanmıştır. CFRP nanokompozit malzemeler vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Saf CFRP kompozit malzemenin elastisite modülü yaklaşık 80 GPa yaklaşırken, % 0,1 CNT katkılı kompozitin ise 100 GPa'ı biraz geçtiği görülmüştür. % 0,5 CNT'li kompozit ise 140 GPa'ı çok az geçmiştir.

Çekme dayanımı değerleri ise saf CFRP için yaklaşık 500 MPa, % 0,1 CNT katkılı kompozit için 600 MPa'ı biraz geçtiği, % 0,5 CNT katkılı kompozitte ise yaklaşık 650 MPa olduğu görülmüştür. % 0,5 CNT eklenmesi diğer nano malzeme ve oranlara göre malzemenin mekanik özelliklerini daha fazla etkilediği sonucuna varılmıştır [139].

Okabe ve arkadaşları çalışmalarında tek yönlü CFRP kompozit kullanmışlardır. Çekme testi oda sıcaklığında yapılarak deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Çekme dayanımı değeri 3570 MPa olarak bulunmuştur [140]. Bru ve arkadaşlarının çalışmalarında tek örgü karbon fiber kıvrımsız kumaş kullanılmış, karbon fiber demetleri cam fiber poliamid atkı iplikleri ile bağlanmıştır. Tabakalar reçine transfer yöntemi ve vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Gerilim-gerinim eğrisini oluşturmak için sadece iki gerinim ölçer okuması arasındaki ortalama dikkate alınmıştır. Çekme testinde poisson oranını değerlendirmek için; yükleme yönüne enine olan gerinim ölçülmüştür. 0° ve $0^\circ/90^\circ$ yönünde farklı tabaka kalınlıklarına sahip plakalar üretilerek çekme testi sonuçları incelenmiştir. Plakaların boyuna çekme dayanımları sırasıyla 1506, 1889, 1891, 1851, 1796 MPa olarak bulunmuştur [25].

Mishaluk ve arkadaşları çalışmalarında dört yönlü ($45^\circ/90^\circ-45^\circ/0^\circ$)_s NCF kumaş kullanmışlardır. Çapraz (bias) yöndeki çekme testi sonuçları incelenmiştir. Çapraz yön -45° tabakadaki fiber yönüne eşit olduğu için, enine çatlama ters yönde -45° tabakada meydana gelmiştir. Bu çalışmada çekme işlemi, kumaştaki $+45^\circ$; yükleme yönüne paralel tabakadır, 90° ; yükleme yönüne çapraz tabakadır, 0° ; yükleme yönüne çapraz, -45° ; yükleme yönüne enine yöndür. Numunenin sertliği yaklaşık sabit bir değerdedir. Plaka yarı izotropiktir, bu nedenle kopmadan önce oluşan hasar, özellikle matris çatlakları ve yerel delaminasyonlar malzemenin sertliğini önemli ölçüde düşürmemiştir. Gerilme değeri yaklaşık 450 MPa, gerinim değeri ise % 1,73 bulunmuştur [141].

Protz ve arkadaşları cam fiber NCF (GF-NCF) kumaş üzerine çalışma yapmışlardır. Tabakanın yerleşimi $[0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ]$ _s. Anizotropik malzeme olması nedeniyle 0° , 45° , 90° yönünde kesilen numunelerin testi yapılmıştır. Malzemenin yüksek hızlarda karakterizasyonunu incelemek için çekme testi yapılmıştır. Uygulanan yük 160 kN. 90° fiber yönünde fiber içeriği çok azdır ve çekme dayanımı artışı % 25 ile en düşük düzeyde elde edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı 0° yönünde elde edilmiştir [142]

Vallons ve arkadaşlarının çalışmalarında kıvrımsız kumaş CFRP kompozit numunelerin yorulma ömrü $\pm 45^\circ$ fiber yönlerinde (çapraz yön-CD ve makine yönü-MD) incelenmiştir. Sonuç olarak uygulanan yük seviyesinde kompozitlerin MD ve CD yönlerindeki yorulma performansının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [143]. Gojny ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarda nanotübün epoksi reçinenin eğilmeyen doğasını, kırılma sağlamlığını ve esneklik modülünü iyileştirdiği sonucuna varılmıştır [103].

Zhang ve arkadaşları [144] ağırlıkça % 0,5 CNT'ün eklenmesiyle epoksinin zayıflamasında ve çatlak yayılımında önemli bir azalma olduğunu kaydetmiştir. Aynı zamanda çatlağın köpülenmesinin, çatlak hattı arayüzüne bağlı nanotüplerin çekilmesiyle gerçekleştiğini bildirmişlerdir. Zhang ve arkadaşları [145] CNT'lerin etkisi üzerine yaptıkları benzer bir çalışmada, yorulma çatlağı gelişme hızının CNT'lerin çapını azaltarak, CNT'lerin uzunluğunu genişleterek ve nanotüplerin dağılımını artırarak etkili bir şekilde azaltılabileceğini bulmuşlardır. Böylece yorulma çatlağının çoğalma oranında 20 kat azalma tespit edilmiştir.

Diğer çalışmalarda [146–149], farklı tipte fiber takviyeli kumaşlar ve üretim yöntemleri kullanılarak nanokompozit malzemelerin yorulma dayanımı araştırılmıştır.

2.3. CFRP KOMPOZİT MALZEMELERİN DELİNEBİLİRLİĞİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Kumar ve Singh [88] cam fiber katkılı polimer kompozitin delinmesinde MWCNT'ün etkilerini incelemişlerdir. Epoksi içerisinde MWCNT etkisini değerlendirmek için delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Delme deneyleri % 0,5 MWCNT, %1,0 MWCNT, % 1,5 MWCNT içerikli GFRP nanokompozit malzemeler üzerinde yapılmıştır. Delme işlemi için Ø8 mm ALTIN kaplamalı matkap kullanılmıştır. Delme parametreleri devir sayısında 500, 1000, 1400, 2000 devir/dakika, İlerleme değerlerinde ise 0,10 mm/dev., 0,15 mm/dev., 0,30 mm/dev., 0,50 mm/devir olarak seçilmiştir. Sonuçlar nanotüp ve katkısız GFRP kompozit ile karşılaştırılmıştır. MWCNT miktarının artmasıyla delaminasyon değerleri düşük çıkmıştır.

İlerleme oranıyla delaminasyonun arttığı buna göre itme kuvvetinin de arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Fakat artan devir sayısı ve MWCNT miktarındaki artışla giriş ve çıkış delaminasyonlarının azaldığı görülmüştür. Delme işlemi esnasında minimum delik hasarı % 1,5 MWCNT katkılı nanokompozit malzemede görülmüştür. Deliklerin yüzey pürüzlülüğü ilerleme oranıyla artmıştır, bunun sebebinin daha yüksek ilerleme oranında hasarların daha şiddetli olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat yüksek devir sayısında yüzey pürüzlülüğü azalmış bunun sebebinin takım-talaş arayüzeyinde yüksek kesme sıcaklığı ile polimer matrisinin yumuşamasından ve aynı zamanda MWCNT'ün takım-talaş arayüzeyinde yağlama etkisi yaparak yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğünden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Heidary ve arkadaşları [150] çalışmalarında fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüplerle güçlendirilmiş dokuma E-cam fiber-epoksi kompozitlerin delinmesinde itme kuvveti ve delaminasyon faktörünü analiz etmek için deneyler yapmışlardır. Deneyler için dikkate alınan delme parametreleri, ilerleme oranı (0,04 mm/dev., 0,06 mm/dev., 0,08 mm/dev., 0,1 mm/dev.), devir sayısı (315 dev./dak., 630 dev./dak.), matkap çapı ($\varnothing$ 4 – $\varnothing$ 5) ve nanokompozit plakalarda bulunan karbon nanotüplerin ağırlık yüzdesidir (% 0, % 0,1, % 0,5, % 1). Çalışmalarda delme işleminin çoklu performans özelliklerini aynı anda optimize etmek için gri ilişkisel analizli ortogonal dizi kullanılmıştır. Sonuçlara göre, ilerleme oranı; itme kuvveti ve delaminasyon faktörü üzerinde en büyük etkiye sahip olan faktördür ve bunu devir sayısı takip etmektedir. Yazarlara göre bunun nedeni ilerleme oranının artmasıyla kesici ağızların fiberlere uyguladığı daha yüksek etkidir. Delik çapının delaminasyon faktörü üzerine çok az etkisi vardır. İlerleme oranı düşük bir seviyede tutulduğunda, itme kuvveti küçülmüş; yani deliğin çevresinde daha az hasar meydana gelmiştir. Nanotüp içeriği % 0 'dan % 0,5'e çıktığında delaminasyon faktöründe ve itme kuvvetinde önemli düşüş gözlemlenmiştir. Optimum parametreler % 0,5 nanotüp içeriği, 0,04 mm/dev. İlerleme oranı ve 630 dev./dak. devir sayısında görülmüştür.

Karimi ve arkadaşları [151] yaptıkları çalışmalarında nanotüp olarak karboksil grup ile fonksiyonelleştirilmiş MWCNT kullanmışlardır. Çalışmalarında epoksi ağırlığının % 0, % 0,1, % 0,5, % 1 değerinde MWCNT'ler epoksi içerisine karıştırılarak mekanik bir karıştırıcı ile 3 saat karıştırılmıştır.

Bu araştırmada nano içerik, ilerleme oranı (0,04 mm/dev., 0,06 mm/dev., 0,08 mm/dev., 0,1 mm/dev.), devir sayısı (315 dev./dak., 630 dev./dak.), matkap çapı ($\varnothing 4$ – $\varnothing 5$) olmak üzere dört parametre seçilmiştir. Takviye elamanı olarak cam fiber dokuma kumaşlar kullanılmıştır. Cam fiber epoksi nanokompozitler, 12 kat cam fiber kumaş serilerek el yatırma tekniği kullanılarak vakum altında üretilmiştir. L16 ortogonal diziye dayalı taguchi yöntemi kullanılarak delaminasyon faktörü elde edilmiştir. Sonuçlara göre; düzeltilmiş delaminasyon faktörü, ilerleme oranından (% 62,8) ve ardından kesme hızından (% 16,6) ve nano içeriğinden (% 12,6) önemli ölçüde etkilenir. Matkap çapının etkisi önemsizdir (% 0,2). Delaminasyon alanı, artan ilerleme oranı ve azalan kesme hızı ile genişlemiştir. Daha yüksek itme kuvvetinin de, daha fazla delaminasyon yayılmasına yol açtığı sonucuna varılmıştır. Nano içerik başlangıçta delaminasyon faktörü üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir ve ardından etkisi negatif olarak değişmektedir. Optimum işlem parametreleri, seviye 2’de ağırlıkça % 0,1 nano içerik, seviye 1 de 0,04 mm / devir ilerleme oranı, seviye 2’de 630 dev./dak. devir sayısı ve seviye 2 de $\varnothing 5$ mm matkap çapı şeklindedir.

Suman ve arkadaşları [152] MWCNT-CFRP kompozit malzeme üzerine $\varnothing 4$, $\varnothing 6$, $\varnothing 8$ mm çaplı TIN kaplamalı karbür matkaplar kullanarak delme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Kesme parametreleri olarak devir sayısı (1200 dev./dak., 1500 dev./dak., 1800 dev./dak.), ilerleme hızı (10 mm/dak., 15 mm/dak., 20 mm/dak.), matkap uç açısı (90° , 108° , 118°) ve farklı matkap çapları ($\varnothing 4$, $\varnothing 6$, $\varnothing 8$) kullanılmıştır. Bu çalışmada karbon fiber epoksi kompozit ve karbon nanotüplü karbon fiber epoksi kompozit üzerine delinen deliklerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme parametrelerinin etkisi RSM yöntemi ile analiz edilmiştir. 30 adet deney yapılmıştır. Minimum yüzey pürüzlülüğü için optimum parametreler 1800 dev./dak., 10 mm/dak. İlerleme hızı ve $\varnothing 4$ mm çaplı 90° uç açılı matkap bulunmuştur. Çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ilavesi yüzey pürüzlülük değerini % 27,96 oranında azaltmıştır.

Joshi ve arkadaşları [153] kuru ve kriyojenik şartlarda CFRP delinmesinde kesme hızının ve ilerleme oranının delaminasyon, itme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini incelemişlerdir. Kullanılan karbon fiber kumaşlar tek yönlüdür. Kumaşlar 0° ve 90° yönünde yerleştirilerek 22 kat olacak şekilde serilmiş el yatırması ile reçine her kata sürülmüştür daha sonra vakum torbalama ile üretimi yapılmıştır.

Delme işlemi için Ø 8, 3 kanallı ve 130° uç açılı K10 kaplamasız tungsten karbür kullanılmıştır. Delme işleminde kesme hızı 100 m/dak., 125 m/dak., 150 m/dak., ilerleme oranı 0,03 mm/dev., 0,06 mm/dev., 0,09 mm/dev. olarak seçilmiştir. İtme kuvvetleri kriyojenik ve kuru delme işlemlerinde karşılaştırıldığında, işleme sıcaklığındaki düşüş nedeniyle kuru delme işleminde daha düşüktür. Kesme hızının kuru delme için itme kuvveti üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı da gözlemlenmiştir. Bu çalışmada; artan ilerleme oranı, hem kuru hem de kriyojenik delme için itme kuvvetinin artmasına neden olmuştur. Kesme hızının kuru delme için itme kuvveti üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı da gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, kriyojenik delme için, artan kesme hızı ile itme kuvveti azalmıştır. Delaminasyon faktörü, hem kuru hem de kriyojenik koşullarda ilerleme oranının artmasıyla artmıştır. Artan kesme hızı ile delaminasyon faktörü başlangıçta azalırken ve daha sonra kuru koşullarda artmıştır, kriyojenik koşullarda ise azalan bir eğilim izlenmiştir. İlerleme oranlarındaki artış, hem kuru hem de kriyojenik koşullarda yüzey pürüzlülüğünde bir artışa neden olmuştur. Artan kesme hızı ile yüzey pürüzlülüğü azalmış ve daha sonra çok yüksek kesme hızlarında artmıştır. Kriyojenik koşullar altında yapılan delme işleminde yüzey pürüzlülüğün kuru ortama göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Qiu ve arkadaşları [154] çalışmalarında farklı parametrelerde spiral matkapta radyal ağzın CFRP plakanın delinmesinde delaminasyon üzerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında tek yönlü 4,9 mm kalınlığında CFRP plaka kullanılmıştır, fiberler aynı yönlüdür. Matkaplar, 6 mm'lik aynı çapa sahip ultra ince taneli karbür çubuklardan yapılmıştır. T1, kaplanmamış spiral matkaptır. T2, T3 ve T4, sırasıyla 4,5 mm, 3 mm ve 2 mm'lik birinci matkap çapına sahip ve 6 mm'lik ikinci matkap çapına sahip adım matkaplarıdır. Radyal ağız uzunluğu 0,376 mm'dir. Kesme parametreleri devir sayısı 1500 dev./dak., 3500 dev./dak., 5500 dev./dak., ilerleme oranı 0,01 mm/dev., 0,02 mm/dev., 0,03 mm/dev., 0,04 mm/dev., 0,055 mm/dev. seçilmiştir, tüm testler kuru şartlar altında yapılmıştır. Delik giriş ve çıkış morfolojisini incelemek için dijital mikroskop kullanılmıştır. Sonuç olarak radyal ağız üzerinde itme kuvveti değeri devir sayısı ve ilerleme hızı arttıkça artmıştır. Devir sayısı arttıkça, delaminasyon pozisyonunun plakanın altından uzaklığı artmıştır. Yüksek devir sayısının radyal ağzın etkisi altında arka yüzeyi kırmak ve daha küçük bir delaminasyon faktörü ile çapaksız bir delik oluşturmak için avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Gaugel ve arkadaşları [155] çalışmalarında tek yönlü ($0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ$) 6 mm kalınlığında prepreg plakalar kullanmışlardır. 90° uç açısına sahip $\varnothing$ 6 mm çapında kaplamasız ve elmas kaplamalı tungsten karbür matkaplar kullanılarak delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kesme parametreleri devir sayısı 5000 dev./dak., ilerleme oranı 0,07 mm/dev., kesme hızı 94 m/dak., ilerleme hızı 350 mm/dak. olarak seçilmiştir. Çalışmalarında; delik boyutunun ve daireselliğin kesme şartlarında takım aşınmasından önemli ölçüde etkilenmediği sonucuna varılmıştır. Kaplamasız takımlar CFRP delinmesinde aşınmaya maruz kalmıştır.

Cédric ve arkadaşları [156] ilk olarak havacılıkta kullanılan reçine emdirilmiş farklı yönlerde karbon fiberden oluşan 140 katlı plaka üretmişlerdir. İkinci olarak, çıkış yüzeyinde meydana gelen fiber yöneliminin etkilerini incelemek için sadece bilimsel ihtiyaçlar için tasarlanmış tek yönlü bir plaka üretmişlerdir. Çalışmalarda $\varnothing$ 12 mm farklı uç açılara sahip CVD kaplı iki kanallı tungsten karbür matkap kullanılmıştır. Kesme parametreleri olarak ilerleme oranı için 0,025 mm/dev. 0,050 mm/dev. 0,100 mm/dev., kesme hızı için ise 10 m/dak., 50 m/dak. ve 100 m/dak. değerlerini kullanmışlardır. İlerleme oranı 0,05 mm /dev. olduğu değerlerde delaminasyon hasarı artmıştır. İlerleme oranı artıkça delaminasyon artmıştır. En iyi sonuçlar yüksek kesme hızı (100 m/dak.), düşük ilerleme(0,05 mm/dev.) değerlerinde elde edilmiştir.

Xu ve arkadaşları [157] çalışmalarında yüksek dayanıma sahip CFRP plakaların delinmesinde delme kuvvetlerinin, çapak oluşumu, delik yüzey morfolojisi ve çıkış delaminasyonu üzerinde etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarda $\varnothing$ 4,9 mm çapında elmas kaplamalı sementit karbür dagger matkap ve spiral matkap kullanılmıştır. Devir sayısı 6000 dev/dak., 8000 dev./dak. ve 10000 dev./dak. ilerleme oranı 0,01 mm/dev., 0,02 mm/dev. ve 0,03 mm/dev. seçilmiş ve delme işlemi kuru şartlarda yapılmıştır. Farklı özelliklerde 3 farklı CFRP kullanılmıştır. Çalışma sonucunda ilerleme oranının CFRP malzemelerin delinmesinde; delme kuvvetlerini (itme kuvveti ve tork), çapak alanını ve delaminasyon hasarını etkileyen baskın parametre olduğu bulunmuştur. Yüksek devir sayısı değerinin, itme kuvveti, çapak kusuru ve delaminasyon hasarının azalmasında etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sebeple minimum çapak ve delaminasyon kusurları için her zaman yüksek devir sayıları ve düşük ilerleme oranları tercih edilmesi gerektiği önerilmiştir.

Ayrıca çapak kusuru oluşumu genellikle fiber kesme açısının θ geniş olduğu belirli bölgelerde görülmüştür. CFRP delinmesinde mikro çatlaklar, reçine kaybı, fiber çekilmesi ve matris bozulması gibi delik hasarları görülmüştür. Spiral matkapta, kısa radyal ağza sahip dagger matkaptan daha az itme kuvveti oluşmuştur. Delaminasyon faktörünün itme kuvveti ile yakın ilişki içinde olduğu sonucuna varılmıştır. İtme kuvvetinin artması, delaminasyon hasarını büyük ölçüde kötüleştirmiştir. Spiral matkap, delinmiş delik sayısı (N) yükseldikçe hızlı yükselen bir delaminasyon faktörü üretirken, dagger matkabı $40 \leq N \leq 100$ olduğunda kararlı bir delaminasyon faktörü oluşturmuştur. Dagger matkap yüksek itme kuvvetleri göstermesine rağmen spiral matkaptan daha iyi delme performansı (düşük delaminasyon faktörü ve daha az çapak bölgesi) göstermiştir. Bu sebeple dagger matkabın CFRP delinmesinde daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Melentiev ve arkadaşları [158] çalışmalarında kesme hızının ve ilerlemenin delaminasyon üzerindeki etkisi üzerine çalışmışlardır. 4 mm kalınlığında CFRP plakanın delinmesinde TİAIN (Titanyum Alüminyum Nitrür) kaplamalı karbür spiral matkap ve elmas karot matkap kullanılmıştır. Elmasla delme esnasında ilerleme oranı 0,02 mm/dev. ve 0,06 mm/dev. kesme hızı 30 m/dak. ve 40 m/dak. kullanılmıştır. Konvensiyonel delmede ilerleme oranı 0,02 mm/dev. 0,06 mm/dev. ve 0,12 mm/dev., kesme hızı ise 30, 40, 50 m/dak. değerlerinde kullanılmıştır. Deneyler üç kez yeni takımlarla gerçekleştirilmiştir ve delaminasyon faktörü delik girişinde ve delik çıkışında hesaplanmıştır. Spiral matkap kullanıldığında, yüksek ilerlemelerde delaminasyon artmıştır. Bu durum ilerleme oranının çıkış delaminasyonu üzerindeki önemli etkisini göstermiştir. Bunun aksine yapılan çalışma her iki matkap geometrisinde de, kesme hızının delaminasyon üzerinde etkisinin önemsiz olduğunu göstermiştir. Delik çıkışındaki delaminasyon, giriş delaminasyonu ile karşılaştırıldığında, karot matkabın spiral matkaptan daha büyük delaminasyona sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Eneyew ve arkadaşı [159] çalışmasını tek yönlü, otoklav fırında kürlenmiş 33 kat prepreg tabakadan oluşan 6,35 mm kalınlığında CFRP plakalar üzerinde gerçekleştirmiştir. Çalışmada kompozitler için özel olan Ø 6,35 PCD 8 yüzölçümlü matkap ucu kullanılmıştır.

Delme işlemi kuru şartlar altında yapılmıştır soğutma suyu kullanılmamıştır. Kesme parametreleri olarak devir sayısı değerleri; 1500 dev./dak. 3000 dev./dak., 4500 dev./dak. ve 6000 dev./dak. ilerleme oranları ise; 64 $\mu\text{m}/\text{dev.}$, 128 $\mu\text{m}/\text{dev.}$, 192 $\mu\text{m}/\text{dev.}$, 256 $\mu\text{m}/\text{dev.}$ ve 320 $\mu\text{m}/\text{dev.}$ 'dir. İlerleme oranına bakılmaksızın, devir sayısı 1500 dev./dak.'dan 6000 dev./dak.'ya yükseldiğinde itme kuvvetinde % 6 azalma görülürken, ilerleme oranı 64 $\mu\text{m}/\text{dev.}$ ' den 320 $\mu\text{m}/\text{dev.}$ yükseldiğinde % 47 artış göstermiştir. İtme kuvveti kesme hızından daha çok ilerleme oranından etkilenmiştir. Yüzey Pürüzlülüğünün devir sayısından bağımsız olarak ilerleme oranına bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. 1500 dev./dak. ve 64 $\mu\text{m}/\text{dev.}$ kesme parametrelerine kıyasla 6000 dev./dak. ve 64 $\mu\text{m}/\text{dev.}$ kesme parametrelerinde daha düşük pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. 6000 dev./dak. devir sayısına kıyasla 320 $\mu\text{m}/\text{dev.}$ ilerleme oranında 1500 dev./dak. devir sayısında, daha düşük değerler elde edilmiştir. Bu durum yüksek devirlerde ve düşük ilerleme oranlarında daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde edileceği sonucuna varılmıştır. Daha yüksek kesme hızında, tabaka kalınlığının üçte biri olan 64 $\mu\text{m}/\text{dev.}$ ilerleme oranında daha iyi bir yüzey elde edilmiştir. Delikten kesit alınarak yüzey morfolojisi SEM ile analiz edilmiştir. 1500 dev./dak. ve 320 $\mu\text{m}/\text{dev.}$ 'de delik girişinde küçük hasarlar görülmüştür. 1500 dev./dak. ve 320 $\mu\text{m}/\text{dev.}$ ilerlemede hasarlı bölgede fiber çekilmesi görülmüştür. Optimum delme şartları devir sayısında 4500 dev./dak. ve 6000 dev./dakikada, ilerleme oranında 64 $\mu\text{m}/\text{devirde}$ elde edilmiştir.

Merino-Pérez ve arkadaşları [160] çalışmalarında itme kuvveti ve tork üzerinde kesme parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Kesme parametreleri devir sayısı 2500 dev./dak. 5000 dev./dak., 7500 dev./dak., 10000 dev./dak.; kesme hızı 50 mm/dak., 100 mm/dak., 150 mm/dak., 200 mm/dak., ilerleme hızı 125 mm/dak., 250 mm/dak., 375 mm/dak., 500 mm/dak. seçilmiştir. Delme işlemi boyunca tüm şartlarda ilerleme oranı 0,05 mm/dev. olarak sabit tutulmuştur. 40 kat CFRP prepreg serilmiş, kürlendirilmiştir ve 10 mm kalınlığında plakalar elde edilmiştir. Ø 6,35 mm çapında kaplamasız WC-%10 Co içeren matkap kullanılmıştır. Termal kamera ile her bir delik için delme işleminde çıkan talaşların sıcaklığı ölçülmüştür. Sonuç olarak; termoset matrisinin türü, hem maksimum itme kuvveti hem de geliştirilen tork üzerinde önemli bir etki gösterirken, karbon fiber kumaş türü ve devir sayısı, maksimum itme kuvveti üzerinde ihmal edilebilir etkiler göstermiştir.

Devir sayısı, maksimum tork üzerinde güçlü bir etki sergilemiştir; yüksek modüllü CFRP kompozitleri, orta modüllü kompozitlere kıyasla kesme hızına ve gerilme oranına karşı daha fazla hassasiyet göstermiştir.

Merino-Pérez ve arkadaşları [161] çalışmalarında kaplanmamış WC-%10 Co içeren Ø 6,35 mm çaplı matkap kullanarak CFRP kompozitlerin delinmesinde malzeme özelliklerinin ve kesme hızının ısı dağılımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmanın ilk aşamasında, termokupllar ve bir kızılötesi kamera kullanılarak deliğin etrafındaki farklı mesafelerde geliştirilen sıcaklıkları ölçerek üç farklı CFRP sisteminin delinmesinde ısı dağılımını karşılaştırmışlardır. İkinci aşamada, kesme hızının, iş parçası üzerinde meydana gelen maksimum sıcaklıklar üzerinde etkisini incelemişlerdir. Kullanılan takımların uç açıları 120° ve 40°'dir. Bu çalışmada deliklerin etrafına 4 adet termokupl için delikler delinmiştir ve sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Termokuplları gömmek için, her bir plakanın çıkış yüzüne, Ø 1,25 mm matkap ucu kullanılarak dört adet 1 mm derinlikte delikler açılmıştır. Delikleri doldurmak ve hava boşluklarını gidermek için kullanılan iletken macun daha iyi bir sıcaklık kazanımı sağlamıştır.

Kesme hızı ve sıcaklık arasındaki korelasyonu bulmak için 4 farklı kesme şartında delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Devir sayısı; 2500 dev./dak., 000 dev./dak., 7500 dev./dak., 10000 dev./dak., kesme hızı ; 49,8 m/dak., 99,6 m/dak., 149,4 m/dak., 199,2 m/dak., ilerleme oranı 0,05 mm/dev., ilerleme hızı ; 125 mm/dak., 250 mm/dak., 375 mm/dak., 500 mm/dakikadır. Deney sonucunda ise düşük kesme hızlarında kesme sürelerinin uzamasıyla maksimum sıcaklıklar meydana gelmiştir. Yüksek kesme hızları, delik kenarının dışında düşük kesme hızlarına göre daha yüksek termal eğim göstermiştir. Termal görüntü alma uygulaması; termokupl yöntemine göre daha iyi sonuç vermiştir.

Henerichs ve arkadaşları [162] çalışmalarında, CFRP delinmesinde aşınma direncini ve iş parçası kalitesini analiz etmişlerdir. Çalışmada iki farklı nanokristalin elmas kaplamalı Ø 6,35 mm çaplı matkap kullanılmıştır (model I ve model II). İş parçasının kalınlığı 8 mm'dir.

Kesme parametreleri 4 parametre ve 3 seviyeden oluşmuştur; devir sayısı 7519 dev./dak. 4512 dev./dak., 4512 dev./dak., kesme hızı 150 m/dak., 90 m/dak., 90 m/dak., ilerleme oranı 0,06 mm/dev., 0,06 mm/dev., 0,10 mm/dev. verilmiştir. Deney sonucunda model II genel olarak daha kötü bir delik kalitesi üretmiştir ve model I'den daha zayıf bir aşınma direnci göstermiştir. Elmas kaplamanın karbür takımların takım ömrünü artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. İtme kuvvetinin, ilerleyen takım aşınmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. İtme kuvveti eğiminin takım tasarımına ve elmas kaplamanın tabaka yapışmasına bağlı olduğu anlaşılmıştır. CFRP kompozitin delinmesinde en fazla matkabın boşluk yüzeyinde aşınma meydana geldiği görülmüştür. Bu aşınma mikroskop ile görüntülenmiştir. Yüksek kesme hızının elmas kaplı takımların kesme kenarlarının aşınmasını engellediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca tungsten karbür kaplamalı matkabın kesme hızının artmasıyla daha fazla aşındığı ve itme kuvveti üzerinde ilerlemenin bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Feito ve arkadaşları [163] delme işlemini 120 x 29 x 2,2 mm ölçülerinde CFRP plaka üzerine yapmışlardır. Farklı uç açılara sahip Ø 6 mm çaplı kaplamasız karbür matkaplar kullanmışlardır. Kesme parametreleri 3 faktör ve 3 seviyeden oluşmaktadır. 25 m/dak. 50 m/dak., 100 m/dak., ilerleme oranı 0,05 mm/dev., 0,10 mm/dev. ve 0,15 mm/dev. matkap uç açıları 90°, 118°, 140°'dir. Toplam 81 adet delme işlemi yapmışlardır. 3 kesme parametresinden sadece ilerleme oranının ve takım uç açısının itme kuvvetiyle ilişkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Takım ucunda aşınmalar meydana gelmektedir. İtme kuvveti önemli ölçüde artış göstermiştir bunda ilerleme oranının etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Kesme hızının etkisinin önemsiz olduğu anlaşılmıştır.

Kullanılan takım yeniyse, kesme parametrelerinden daha çok etkilenmektedir. İlerleme oranının giriş delaminasyonu üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülürken takım uç açısının da çıkış delaminasyonu üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Sonuç olarak ilerleme oranında 0,05 mm/dev. matkap uç açıları 90° ile 114° aralığında uç açıları tavsiye edilmiştir.

Kaybal ve arkadaşları [164] % 0,3 CNT ilaveli CFRP nanokompozit malzeme üzerinde Ø 6 mm çapında kaplamasız sementit karbür kullanarak delme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Kesme parametreleri 37 m/dak. 50 m/dak., 67 m/dak., 90 m/dak., 121 m/dak., ilerleme oranları 0,005 mm/dev., 0,05 mm/dev., 0,1 mm/dev., 0,2 mm/dev., 0,4 mm/dev.'dir. Deney sonucunda giriş delaminasyonu için optimum kesme parametreleri; düşük kesme hızı ve düşük ilerleme oranıdır. Çıkış delaminasyonu için ise optimum kesme parametresi olarak orta seviye kesme hızı ve orta seviye ilerleme oranıdır. Her iki kompozit malzemenin delinmesinde giriş ve çıkış delaminasyonunu etkileyen kesme faktörü ilerleme oranıdır. Kesme hızının etkisi düşüktür. CFRP malzemenin delinmesinde itme kuvveti için optimum kesme parametreleri düşük kesme hızı ve düşük ilerleme oranı olarak elde edilmiştir. Karbon nanotüp katkılı CFRP malzemenin delinmesinde en düşük itme kuvveti için yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme oranı optimum kesme parametreleri olarak belirlenmiştir. İtme kuvveti CFRP malzemelerde karbon nanotüp katkılı CFRP malzemedan daha yüksek çıkmıştır. Delik girişindeki delaminasyon faktörünün, delik çıkış yüzeyindekinden daha düşük olduğu görülmüştür.

Xu ve arkadaşları [165] çok yönlü $[45^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 0^\circ]$ fiberlerden oluşan 9,16 mm kalınlığında 48 tabakadan meydana gelen CFRP plaka üzerine delik delme işlemi gerçekleştirmişlerdir. 3 farklı geometriye sahip matkaplar kullanmışlardır. Mahbuzlu matkap, spiral matkap ve hançer matkap. İlk takım, 118° uç açısı ve 38° helis açısına sahip matkap çevresinde iki çıkıntılı kenara sahip CVD elmas kaplı mahbuzlu matkaptır. Spiral matkap ise 140° uç açısına ve 35° helis açısına sahip kaplamasız tungsten karbürdür. Hançer matkap, 10° helis açısı, 64,89 mm uzunluğunda talaş kanal uzunluğu ve $118^\circ \times 25^\circ$ iki aşamalı uç tasarımı ile tanımlanmaktadır. Kesme parametrelerinde devir sayısı 4 seviyedir (1000, 1500, 2000, 2500 dev./dak.). İlerleme oranı da 4 seviyedir (0,010 mm/dev., 0,015 mm/dev. 0,020 mm/dev., 0,025 mm/dev.). Hem mahbuzlu matkap hem de spiral matkap, delme işlemi süresince benzer itme kuvveti sinyalleri sergilemişlerdir. Bununla birlikte, mahbuzlu matkap, delme kuvvetlerinin en aza indirilmesini destekleyen işlevsel olarak tasarlanmış matkap ucu yapısı nedeniyle spiral matkaba kıyasla çok daha yavaş bir artış oranına sahip itme kuvvetleri üretmiştir.

Her iki matkap için, matkapların konik şekli numunenin iç kısmına tam olarak girdiğinde ve matkap ucu numune tabanına baktığında itme kuvvetleri maksimum büyüklüğüne ulaşmıştır. Mahpuzlu matkap ve spiral matkabı için, kesici kenar CFRP plakanın alt yüzeyinin dışına çıktığında, kesici kenarlar delikten çıktıkça itme kuvvetinin kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Spiral matkap ve mahpuzlu matkapta devir sayısı arttıkça itme kuvvetinde artış meydana gelmiştir. Bu çalışmada CFRP delinmesinde gözlemlenen deney sonuçlarına aykırı olarak devir sayısının artmasıyla delme işleminde oluşan itme kuvveti azalmaktadır. Bunun açıklaması, test edilen parametrik aralık altında artan devir hızlarına bağlı olarak yüksek delme sıcaklıklarının karbon/epoksi sisteminin yumuşaması üzerinde ihmal edilebilir bir etki yaratmasıdır. Mahpuzlu matkap kullanımında elde edilen itme kuvveti değerleri diğerlerine göre daha düşük çıkmıştır.

Geier ve arkadaşları [166] 55 katlı tek yönlü karbon fiber kumaşları, epoksi ve sertleştiriciyi el yatırması ile kalıp içerisine sermişler 60° sıcaklıkta hızlıca kürleştirmişlerdir. Üretmiş oldukları karbon fiber epoksi plakaları 110 x 25 x 6 mm ölçülerinde su jetinde kesmişlerdir. Delme işleminde Ø 11,2 mm çapında uç açısı 118° kaplamasız spiral matkap kullanmışlardır. Delme işlemi esnasında soğutma ve yağlama sıvısı kullanılmamıştır. Kesme hızı değerleri 50 m/dak. 64,6 m/dak., 100 m/dak., 135 m/dak., 150 m/dak., ilerleme hızı değerleri 70 mm/dak., 103,7 mm/dak., 185 mm/dak., 266,3 mm/dak., 300 mm/dak.'dır. Deney sonuçlarına göre; yüksek ilerleme oranının itme kuvvetini artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. En yüksek ilerleme hızında (300 mm / dak.) işlenen deliğin diğerlerine göre daha az kesilmemiş fiberlere sahip olduğu bulunmuştur. Düşük kesme hızlarında (50-100 m/dak.) kesilmemiş fiberlerin azaldığı sonucuna varılmıştır. Optimum kesme parametreleri; düşük itme kuvveti için ilerleme hızında 70 mm/dak. kesme hızında ise 105 m/dak. bulunurken, kesilmemiş fiberleri azaltmak için ise ilerleme hızında 300 mm/dak. kesme hızında 88 m/dak. bulunmuştur.

Raj ve arkadaşı [167] çalışmalarında yarı izotropik $[0^\circ / -45^\circ / 90^\circ / 45^\circ]_{2s}$ yönünde fiberlere sahip infüzyon yöntemi ile üretilmiş 4 mm kalınlığında CFRP plaka kullanmışlardır. İnce uçlu WC düz shaftlı spiral matkap (Ø 6,35 mm) kullanılmıştır.

Kesme şartlarında tavsiye edilen kesme hızı değerleri 40 m/dak., 100 m/dak., ilerleme oranı 0,05 mm/dev., 0,15 mm/dev.'dir. Yazarlar çalışmalarında delaminasyon oluşmaması için önerilen yüksek kesme hızı düşük ilerleme yöntemine uygun olması için 90 m/dak. kesme hızı, 0.05 mm/dev. ilerleme değerlerini seçmişlerdir. Delme işlemi kuru şartlar altında soğutma sıvısı kullanılmadan gerçekleşmiştir. Çalışmada takım aşınması araştırılmıştır.

Yaşar ve Günay [168] çalışmalarında CFRP malzemelerin delinmesinde itme kuvveti ve delik kalitesine kesme parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. İş parçası 40 tabaka prepreg serilerek vakum torbalama ile üretilmiştir. Kalınlığı 10 mm'dir. Kullanılan matkap çeşitleri; Ø 5 mm çaplı kaplamasız tungsten karbür, TIALN kaplamalı tungsten karbür ve elmas kaplamalı tungsten karbürdür. İtme kuvvetinin, hem kesme hızı hem de ilerleme oranındaki artışla doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Literatürde artan kesme hızı ile kesme sıcaklığının arttığını bunun da itme kuvvetini düşürdüğü belirtilmiştir. Yazarların çalışmalarında ise kesme hızının artmasıyla itme kuvvetinin arttığı görülmüştür. Bu durumu iki şekilde açıklamışlardır ilki kuru şartlarda kesme işleminin, kesme kırılması yerine bükülme yırtılması ile tetiklendiği ve itme kuvvetini artırdığıdır. İkincisi ise itme kuvvetindeki artışın nedeni, esas olarak kesilmemiş talaş kalınlığının ve kesme derinliğinin artmasıyla birlikte talaş enine kesit alanından kaynaklanan talaş oluşumundan kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. TIALN kaplamalı matkapla yapılan delme işleminde diğer matkaplara göre itme kuvvetleri yüksek çıkmıştır. Bu, esas olarak, kaplama malzemesine bağlı olarak, kaplamalı matkapların kenar yuvarlaklığının artmasıyla matkap geometrisinin değişmesinden kaynaklanmıştır. Delaminasyon faktörünü etkileyen parametre ilerleme oranıdır. Düşük ilerleme oranında görülen kesme sıcaklığındaki artış, daha yüksek kesme hızı nedeniyle iş parçasının işlenmesindeki değişkenliğe ve termal genişlemesine dayandırılmıştır. Delaminasyonun minimum olması için düşük ilerlemenin uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Delik çapı, yüzey pürüzlülüğü ve özellikle delaminasyonda delik kalitesinin artırılması için değişken ilerleme oranı tavsiye edilmiştir.

Theophilus Rajakumar ve arkadaşları [89] CNF CFRP (nano fiber katkılı karbon fiber epoksi kompozit) üzerine Ø 6 mm matkap ile delikler delerek deney çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Kesme parametreleri CNF içeriğinde % 0,5 CNF, % 1 CNF, % 1,5 CNF, ilerleme oranında 0,02 mm/dev. 0,05 mm/dev., 0,08 mm/dev., kesme hızında 9,42 m/dak., 18,85 m/dak., 28,27 m/dak.'dır. AE (Akustik emisyon) tekniği kullanılarak delme işlemi yapılmıştır. Nano fiber içeriği arttıkça delaminasyon faktörü düştüğü görülmüştür. AE ve itme kuvveti, delaminasyondaki artışı simgeleyen ilerlemenin artışı ile artmıştır. AE ve itme kuvveti, delaminasyondaki azalmayı gösteren kesme hızındaki artışla azalmıştır. Polimer nanokompozit tabakaları delerken oluşan delaminasyonun, AE ve itme kuvveti ölçülerek hassas bir şekilde izlenebileceği sonucuna varılmıştır.

Othman ve arkadaşları [169] CFRP plakaya 3 farklı matkapla delik delmişlerdir. HSS spiral matkap, merkezleme uçlu burgulu matkap ve hançer matkap. Kesme parametreleri 800 dev./dak. 1000 dev./dak., 1200 dev.dak. delik kalitesi açısından merkezleme uçlu matkap önerilmiştir. Kesme parametrelerinde optimum değerler 800 dev./dak. devir sayısı ve 0,04 mm/dev. ilerleme oranı bulunmuştur. Yüksek devir sayısı 1200 dev./dak. 0,08 mm/dev. İlerleme oranı ve spiral matkap kullanıldığında düşük itme kuvveti değerlerine ulaşılmış ve az delik kusurları görülmüştür. Bu yüzden takım ömrü uzamıştır. Merkezleme uçlu matkap ile delme işleminde ise; 800 dev./dak. düşük devir, 0,04 mm/dev. ilerleme oranı değerleri kullanıldığında maksimum itme kuvvetinde düşüş ve delik kusurlarında azalma gözlemlenmiştir. Hançer matkabın kullanımında ise yüksek devir (1200 dev./dak.) ve orta değerde ilerleme oranında (0,06 mm/dev.) en yüksek takım ömrü elde edilmiştir.

2.4. UV-SPEKROSKOPİ ANALİZİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Gaurav ve arkadaşları araştırmalarında UV Vis spektroskopi kullanarak % Pc'nin (perkölasyon eşiği), % 0,5 MWCNT, % 1.0 MWCNT, % 1.5 MWCNT ve % 2.0 MWCNT'lerin epoksi içindeki dağılımını araştırmışlardır. UV Vis Spektroskopi analizinde 256 nm dalga boyunda pik gözlemlenmiştir. % 2 MWCNT içerikli epoksi, % 1,5 MWCNT ile karşılaştırılmıştır.

%2 MWCNT'ün pik değerinin biraz arttığı gözlemlenmiş bu durum karıştırma süresi aynı olsa da, reçinede pul pul dökülebilen nanotüplerin miktarının belirli bir sınırın ötesine geçemeyeceği şeklinde açıklanmıştır. % Pc, %0,5 ve %1,0 nanotüp içeriğine sahip epoksi numuneler daha az aglomerasyon gösterirken, %1,5 ve % 2 MWCNT içeriğine sahip epoksilerin absorbands değerindeki ani düşüş, daha çok aglomerasyon olduğunu göstermiştir [117].

Alafogianni ve arkadaşları MWCNT'ün dispersiyon kalitesini araştırmışlardır. Dağıtıcı olarak SDBS sürfaktan ve plastikleştirici Viscocrete Ultra 300 kullanmışlardır. Karıştırma işlemi ultrasonik karıştırıcı ile yapılmıştır. Soğutma işlemi için karışım buzlu suya daldırılmıştır. Sürfaktanın dispersiyon üzerine etkisini araştırmak için karışımdaki SDBS/CNT oranı 0,5 / 1, 1 / 1 ve 2 / 1 olarak hazırlanmış, SDBS içerikli karışımlar için ağırlıkça % 0,5 ve % 1 CNT kullanılmıştır. Viscocrete içerikli karışımda oran 1,5/1 iken CNT miktarı ağırlıkça % 0,4 ila % 1,6 arasında değişmiştir. Çalışmada tüm karışımlar 300 nm dalga boyunda pik göstermiştir. Sonikasyon süresi ne kadar yüksek olursa, karakteristik zirvenin yoğunluğu o kadar yüksek olurken, ölçüm yoğunluğu UV'den IR'ye yakın bir dereceye kadar yavaş yavaş azalmıştır. Sürfaktana kıyasla Viscocrete plastikleştirici, daha az dispersiyon kalitesi sağlamıştır daha yüksek miktarlarda kullanıldığında bile karışımdaki aglomerasyonu yeterince ortadan kaldıramadığı sonucuna varılmıştır [170].

Garg ve arkadaşları epoksi reçinede MWCNT'ün dispersiyon derecesini belirlemek için UV Vis spektroskopi kullanmışlardır. MWCNT kimyasal fonksiyonelleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Karboksil grup a-MWCNT, amin ile işlevselleştirilmiş t-MWCNT olarak adlandırılmıştır. Kompozitin üretiminde iki farklı yöntem izlenmiştir. İlkinde epoksi reçine 50 C° sıcaklığa ısıtılarak viskozitesi düşürülmüştür. MWCNT'ler ayrı ayrı epoksi içerisine ilave edilmiştir. Karışım 24 saat 60 C°'de manyetik olarak karıştırılmıştır. Sertleştirici eklenerek karışım kalıplara dökülmüştür. Diğer işlemde ise MWCNT 3 saat boyunca aseton içerisinde ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Epoksi eklendikten sonra karışım manyetik olarak 60 C° sıcaklıkta 24 saat karıştırılmıştır. Ağırlıkça % 0,05 MWCNT, % 0,1 MWCNT, % 0,2 MWCNT, % 0,25 MWCNT, % 0,3 MWCNT, % 0,4 MWCNT, % 0,5 MWCNT ayrı ayrı epoksi reçine içerisine eklenmiştir.

UV sonuçlarına göre; solvent içerisinde MWCNT dispersiyon sonuçlarına bakıldığında 230 dakika ile 170 dakika arasında çok fark görülmemiştir. Maksimum absorbans 300 nm dalga boyu civarında görülmüştür. MWCNT'ün solvent içerisinde maksimum dispersiyonu 170 dakikalık sonikasyondan sonra görülmüştür. Aynı şekilde epoksi MWCNT karışımında da absorpsiyon maksimum 300 nm dalga boyu civarında görülmüş ve pik yoğunluğu 24 saat sonra sabit kalmıştır. Bu aşamada MWCNT epoksi içerisinde en iyi şekilde dispers olmuştur. Bu nedenle kompozit üretiminde karıştırma süresi 24 saat olarak uygulanmıştır [100].

Jiang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada sulu çözeltide, CNT absorbansı 253 nm dalga boyunda ortaya çıkmıştır. Sürfaktan olarak SDS (sodyum dodesil sülfat) kullanılmıştır. Sürfaktanın CNT aglomerasyonunu önlediği sonucuna varılmıştır. CNT'ün homojen dağılımı için en uygun miktarlar ağırlıkça % 0,5 CNT ve ağırlıkça % 2,0 SDS olarak bulunmuştur [118].

Yue ve arkadaşları CNT ve grafen (CNT: GNP) 8:2 oranında epoksi reçine içerisine karıştırarak epoksi kompozitler üretmişlerdir. Dispersiyon durumunu ölçmek için UV spektroskopi kullanmışlardır. CNT ve GNP her ikisinde literatürle uyumlu olarak 260-270 nm dalga boyunda absorpsiyon göstermişlerdir. Karışımdaki CNT içeriğinin azalmasıyla absorbans piki azalmış, bu durum CNT'lerin hibrid karışımlarda UV bölgesindeki absorbansda daha etkili olduğu görülmüştür [120].

Rastogi ve arkadaşları 4 farklı sürfaktan kullanarak her bir sürfaktanda MWCNT'ün dispersiyonunu inceleyerek karşılaştırma yapmışlardır. Sürfaktanlar Triton X-100, Tween 20, Tween 80, Tween 20, SDS. Triton X-100 ve SDS sırasıyla maksimum ve minimum dispersiyon sağlamıştır. MWCNT'lerin dispersiyonu UV Vis spektroskopi kullanılarak karakterize edilmiştir. Absorbans değerleri 500 nm dalga boyunda kaydedilmiştir [17].

Rezazadeh ve arkadaşları hidroksille işlevselleştirilmiş MWCNT'leri ultrasonik karıştırıcı kullanarak klisen solventi içerisinde dispers etmişlerdir. Daha sonra BYK163 sürfaktan eklemişlerdir. Sonikasyon işlemi 2 dakika ile 20 dakika aralığında farklı sürelerde yapılmıştır.

Sonikasyon işlemi boyunca sıcaklık artışı önlemek için karışım su banyosuna yerleştirilmiştir. UV Vis spektroskopisinin sonuçlarına bakılarak, MWCNT homojen dispersiyonunu elde etmek için karıştırma süresi ve koşullar belirlenmiştir. Epoksi reçinenin ağırlığının % 0,5 MWCNT, % 1 MWCNT, % 2 MWCNT, % 3 MWCNT ve % 4 MWCNT ilave edilerek farklı nanokompozitler hazırlanmıştır. Karışıma epoksi eklenmiş ve kesme mikseri ile 800 devirde 4 saat karıştırılmıştır. Solventin ve hava kabarcıklarının uzaklaştırılması için vakum fırınında 1 saat bekletilmiştir. İçerisine sertleştirici eklenerek nanokompozitler hazırlanmıştır. Çalışmada sürfaktan ile karıştırılmış MWCNT içeren numunelerde, dağılımdaki kararlılık daha uzun bir süre gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışmada farklı miktarlarda seyreltilmiş epoksi reçinesi (ağırlıkça % 5 ve ağırlıkça % 10) % 1 CNT ilaveli karışım içerisine eklenerek karıştırılmış CNT / epoksi karışımı elde edilmiştir. Ağırlıkça % 10'dan yüksek epoksi ilavesiyle, yüksek viskoziteli çözelti oluşturulmuştur bu nedenle karıştırma işleminin verimliliğinin azaldığı görülmüştür. Spektroskopiye bakıldığında ağırlıkça % 5 epoksi ilavesi ile yüksek absorban değerine ulaşılmıştır [12].

Korayem ve arkadaşları 4 farklı tip MWCNT ve sürfaktan kullanmışlardır. Solvent olarak ise etanol kullanılmıştır. Sonikasyon enerjisinin etkilerini araştırmak için Ø19 mm çaplı ultrasonik karıştırıcı probu kullanılarak karıştırma işlemi yapılmıştır. Sonikasyon süreleri 5, 10, 15, 30, 45 ve 60 dakika olarak sabitlenmiştir. Sıcaklığın yükselmesini önlemek için, sonikasyon süresince karışım buz banyosunda bekletilmiştir. CNT çapının ve uzunluğunun CNT dispersiyonu üzerine etkisini araştırmışlardır yine CNT dispersiyonunda sürfaktanın etkisini araştırmak için 3 farklı kopolimer (BYK9077, BYK9076, BYK2150) ve oleik asit kullanmışlardır. Dispersiyonun kalitesi UV spektroskopi ile ölçülmüştür. Karışıma epoksi eklenmiş 10 dakika boyunca kesme mikseri ile 3500 devirde karıştırılmış sonrasında 45 dakika sonikasyona tabi tutulmuştur. Karışım solventin ve hava kabarcıklarının uzaklaştırılması için vakum fırınında bekletilmiştir. Daha sonra sertleştirici eklenerek çekme testi numunesi elde etmek için silikon kalıba dökülerek kürlenmeye bırakılmıştır. Çalışmada tüm örnekler 260 nm dalga boyunda pik yapmıştır, bu CNT'lerin iyi bir dağılım gösterdiğinin kanıtıdır. Ultrasonikasyon enerjisinin artmasıyla pik daha belirginleşmiştir ve CNT dağılımının daha iyidir. 85785 J giriş sonikasyon enerjisi, en yüksek dispersiyonu sağlamıştır.

Aşırı sonikasyon enerjisinin CNT'leri kısalttığı ve en boy oranının azalmasına neden olduğu bulunmuştur. Daha büyük çaplı CNT'lerin pul pul dökülmelerinin daha iyi olduğu ve CNT uzunluğunun CNT'lerin dağılımını etkilemediği sonucuna ulaşılmıştır. CNT'leri sterik itme kuvveti ile dağıtan kopolimerler, CNT'leri elektrostatik itme ile dağıtan oleik asitten daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır [61].

Zhao ve arkadaşları MWCNT'ü etanol içerisine eklemişler daha sonra kopolimeri de ekleyerek çözeltinin stabilite ve absorbands davranışlarını araştırmışlardır. Etanol içerisinde MWCNT'ün absorbands değeri 260 nm dalga boyunda görülmüştür, kopolimer eklendiğinde bariz bir değişiklik görülmemiştir. MWCNT'lerin çözelti içinde homojen dispersiyonuna katkıda bulunan önemli faktör kopolimer ve MWCNT'ler arasındaki kimyasal ara madde bağıdır [14].

Yu ve arkadaşları MWCNT'ü sürfaktan (SDS) içerisine eklemiş ve sonikasyon işlemine tabi tutmuştur. Karışımın sıcaklığının yükselmesini önlemek için sonikasyon sırasında karıştırma kabı bir buzlu su banyosuna yerleştirilmiştir. Farklı sonikasyon sürelerinden sonra MWCNT-SDS çözeltileri UV spektroskopi ile incelenmiştir. Sonikasyondan sonra MWCNT çözeltilerinin absorbands değeri maksimum 200 ila 300 nm dalga boyu aralığında çıkmıştır [16].

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR MATERYAL VE YÖNTEM

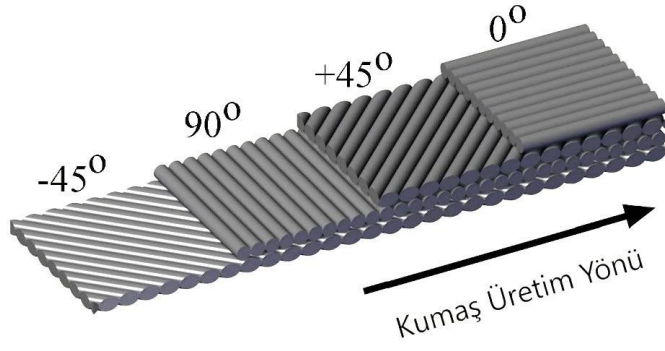
2.5. NANOKOMPOZİT MALZEME ÜRETİM MATERYALLERİ VE YÖNTEMİ

2.5.1. MWCNT Katkılı NCF CFRP Kompozit Malzemenin Üretim Prosesi

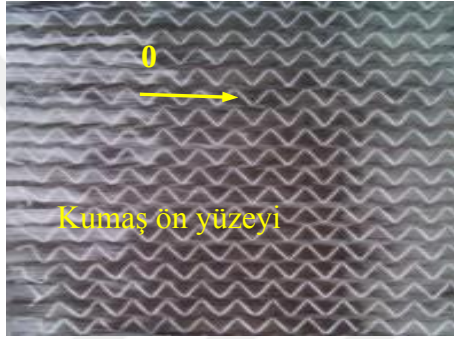
Bu bölüm 3 aşamadan oluşmaktadır. 1 aşamada MWCNT'lerin ultrasonik karıştırıcı yardımıyla reçine içerisinde homojen dispersiyonu. 2 aşama vakum infüzyon yöntemi ile mekanik testler (çekme testi ve yorulma testi) için gerekli NCF CFRP plakalarının hazırlanması ve 3 aşama ise el yatırması yöntemi ile 10 mm kalınlığında delme işlemi için gerekli NCF CFRP nanokompozit plakaların üretilmesi.

2.5.1.1. Nanokompozit Malzeme Üretim Materyalleri

Üretim için gerekli malzemeler; reçine ve hardener (Eposis 120) Bisfenol A-F 'dir, fonksiyonelleştirilmiş nanotüp olan COOH-MWCNT (hidroksil ile fonksiyonelleştirilmiş Çok duvarlı karbon nanotüp), Sürfaktan; polyethylene glycol tert-octylphenyl ether (Triton X-100), solvent; etanol ve kumaş ise 4 eksenli yönlendirilmiş kırırımsız karbon fiber kumaştır (Quadriaxal Non Crimp Fabric CFRP). NCF CFRP kumaş Şekil 3.1' de gösterildiği gibi $-45^{\circ} / 90^{\circ} / +45^{\circ} / 0^{\circ}$ açılarda yönlendirilmiş fiberlerden oluşmaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.1. NCF-CFRP kumaş a) Fiber Yönleri b) Kumaş ön yüzeyi c) Kumaş arka yüzeyi.

2.5.1.2. Nanokompozit Malzeme Üretim Yöntemi

Bu çalışmada MWCNT katkılı NCF CFRP nanokompozit malzemenin üretimi için, farklı ağırlık yüzdelerinde MWCNT kullanılmıştır (% 0,5 MWCNT, %1 MWCNT, % 1,5 MWCNT). Yüksek homojenlik elde etmek için sürfaktan Triton X-100, epoksi ve MWCNT'den oluşan çözeltiye eklenmiştir. Triton X-100 sürfaktanın moleküler ağırlığı ortalama 650 g/mol ve kritik misel konsantrasyon değeri ise 25 C° oda sıcaklığında 0.2 mM'dir. Triton X-100 çözelti içerisinde nonotüplerin güçlü bir şekilde dispersiyonunu sağlayan benzen halkasına sahiptir [107]. Kritik misel konsantrasyonunda, CNT'nin yüzeyi triton X-100 ile kaplanır, dolayısıyla sürfaktan ile CNT arasındaki arayüz doymuş hale gelir böylelikle CNT'ün optimum homojen dispersiyonu sağlanabilir [171,172].

Nanotüplerin homojen dağılımını sağlayan ana parametrelerden biri sürfaktan kullanımıdır. MWCNT'ün NCF CFRP nanokompozitin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için, saf NCF CFRP ve ayrı ayrı sürfaktan ile işlenmiş % 0,5 MWCNT ,%1 MWCNT ve %1,5 MWCNT katkılı NCF CFRP nanokompozit olmak üzere dört farklı numune hazırlanmıştır.

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi; MWCNT katkılı NCF CFRP kompozit iki aşamada hazırlanmıştır. 300x300 mm boyutlarında bir levha elde etmek için; ilk aşamada çözelti hazırlanmıştır. Beher içerisine 200 ml etanol (Şekil 3.3) daha sonra MWCNT (Şekil 3.4) miktarı epoksi ağırlığının yüzde % 0,5, % 1 ve % 1,5 oranında eklenmiştir. Son olarak eklenen Triton X-100 (Şekil 3.5) sürfaktanın çözelti hacmine oranı ise: 0.13 mg/ml dir. Tüm bunlar beher içerisinde el ile karıştırıldıktan sonra geri dönüşüm tankına (Şekil 3.6) boşaltılmıştır.

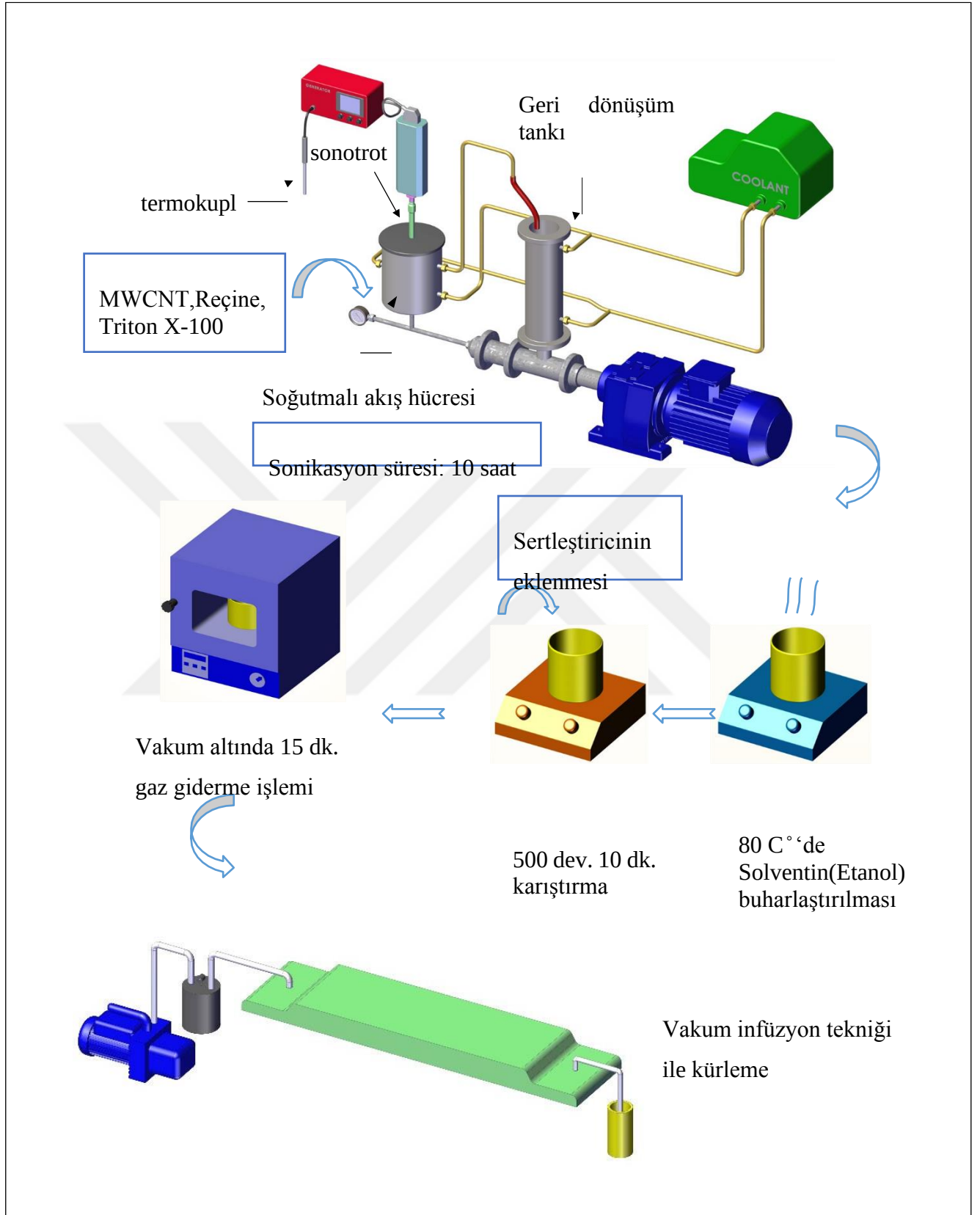
Sonikasyon işlemi akış hücresi içerisinde 19 mm çapında sonotrod kullanılarak % 80 genlik değerinde 1 saat karıştırılarak yapılmıştır. Hemen sonrasında 300 gr epoksi reçine (Şekil 3.7) çözeltiye eklenerek toplamda 10 saat sonike edilmiştir. Bu süre boyunca genlik değeri % 80'de sabit tutulmuştur. Solvent içerisinde sürfaktanı ve MWCNT'ü dağıtmak için Ultrasonik karıştırıcı (UIP2000hdT, Hielscher) kullanılmıştır. MWCNT'ün yüksek sıcaklıklarda bozunmasını önlemek çözelti sıcaklığı i 30 C ° -35 C ° 'de (Şekil 3.8) sabit tutulmuştur.

Ultrasonik karıştırma boyunca akış hücresi ve geri dönüşüm tankı çevresinde soğuk su (Şekil 3.9) dolaştırılarak soğutma işlemi sağlanmıştır. İkinci aşamada solvent olarak kullanılan etanolün buharlaştırılması için, çözelti, 80 C ° 'ye ayarlanan sıcak plaka (hot plate) üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.10). Çözelti içerisine sertleştirici (hardener) 60:100 (Şekil 3.11) oranında eklenerek 10 dakika boyunca 500 devirde dönen plaka üzerinde karıştırılmıştır. Çözelti vakum fırınında (Şekil 3.12) 15 dakika bekletilerek içerisindeki hava kabarcıklarından arındırılmıştır.

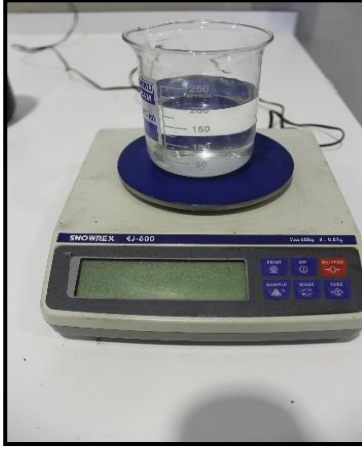
Çözelti, vakum infüzyon Yöntemi ile doğrudan 0° /+45° /90° /-45° fiber yönlü NCF karbon fiber kumaş üzerine transfer edilmiştir. Vakum infüzyon yönteminde önce kumaşlar istenilen ölçülerde kesilmiştir (Şekil 3.13).

Kompozit üretiminin yapılacak olduğu alana kalıp ayırıcı sürülmüştür (Şekil 3.14). Etrafına sızdırmazlık bandı çekilmiştir (Şekil 3.15). 2 adet NCF kumaş [$0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$]_s yönlerinde serilerek kalıp ayırıcı sürülen alana yerleştirilmiş üzerine sıyırma kumaşı ve reçine akış filesi serilmiştir (Şekil 3.16). Sıyırma kumaşının kullanılmasının amacı vakum torbası ile akış filesini üretilen parçadan rahatça ayırmaktır. Daha sonra reçine tankından reçinenin akışını sağlayacak reçine hattı hazırlanmıştır, vakum hattı ise reçine hattının tam karşı kenarına hazırlanmıştır (Şekil 3.17). Vakum torbası, sızdırmazlık bandına yapıştırılmıştır (Şekil 3.18). Reçine hattının ucu hava kaçmaması için tıkanmıştır (Şekil 3.19). Vakum poMPası çalıştırılarak sistem içerisindeki hava tamamen çekilmiştir. Daha sonra reçine hattı çözelti (Şekil 3.20) içerisine daldırılarak NCF CF kumaşın çözeltiyi tamamen emmesi sağlanmıştır.

Kumaş içerisindeki havanın da tahliye edilmesinden sonra vakum pompası kapatılarak NCF CFRP kompozit oda sıcaklığında kürlemeye bırakılmıştır. Böylelikle çekme numunesi ve yorulma numunesi plakaları elde edilmiştir (Şekil 3.21). Daha sonra mekanik test numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 3.22). Delme işleminde gerekli olan 10 mm kalınlığında plakaların oluşturulması için reçine miktarı artırılarak MWCNT yüzdesi, sürfaktan ve sertleştirici miktarları hesaplanmıştır. 10 mm kalınlığında NCF CFRP nanokompozit plakaların elde edilmesi için 14 adet NCF CF kumaş [$0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$] kullanılmıştır (Şekil 3.23) . Delme işlemi için NCF CFRP nanokompozit malzeme üretim aşaması Şekil 3.24, Şekil 3.25, Şekil 3.26, Şekil 3.27, Şekil 3.28 ve Şekil 3.29’da fotoğraflanarak anlatılmıştır.



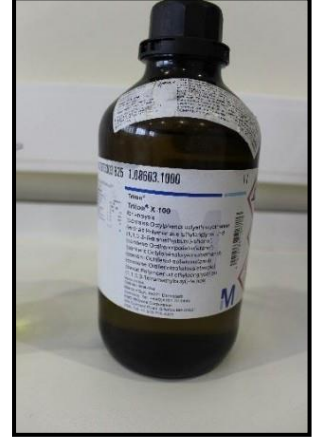
Şekil 3.2. MWCNT katkılı NCF-CFRP epoksi kompozitin üretim prosesinin akış diyagramı .



Şekil 3.3. 200 ml ethanol.



Şekil 3.4. MWCNT miktarının hesaplanarak tartılması.



Şekil 3.5. Triton X-100



Şekil 3.6. Etanol, MWCNT, sürfaktanın geri dönüşüm tankına boşaltılarak soğutmalı akış hücresi içerisinde sonotrod ile karıştırılması.



Şekil 3.7. Reçine miktarının (300 gr) tartılması.



Şekil 3.8. Genliğin % 80'de, sıcaklığın 31 C°'de sabit tutulması.



Şekil 3.9. Soğutma tankı içerisindeki su sıcaklığı -30 C°.



Şekil 3.10. 80 C ° de solventin (Etanol) buharlaştırma.



Şekil 3.11. Sertleştirici miktarının hesaplanması.



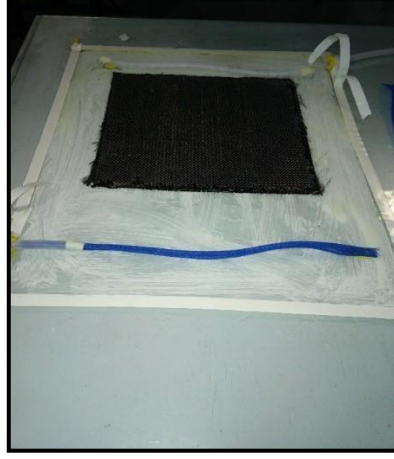
Şekil 3.12. Çözeltinin vakum fırınında gazdan arındırılması.



Şekil 3.13. NCF CF kumaşın kesilmesi.



Şekil 3.14. Kalıp ayırıcının sürülmesi.



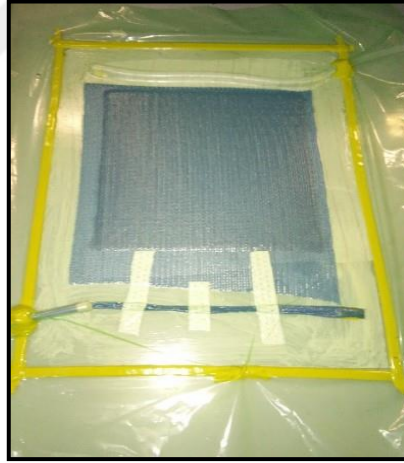
Şekil 3.15. Sıdırmazlık bandının yapıştırılması.



Şekil 3.16. Sıyırma kumaşı ve reçine akış filesinin serilmesi.



Şekil 3.17. Reçine ve vakum hattının yerleştirilmesi.



Şekil 3.18. Vakum torbasının yapıştırılması.



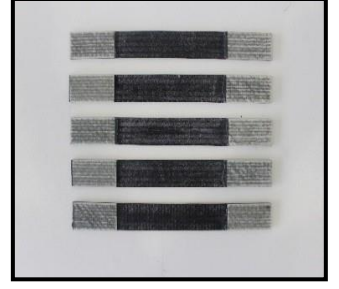
Şekil 3.19. Reçine hattının kapatılarak vakumlama işleminin yapılması.



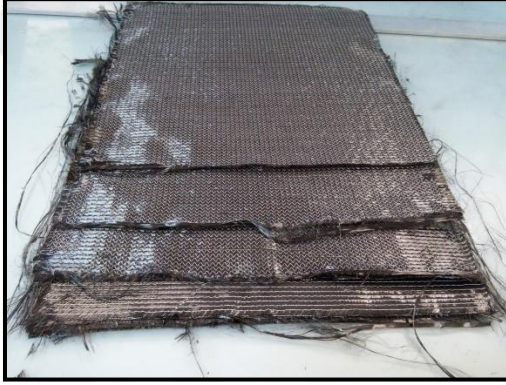
Şekil 3.20. Reçine hattından sisteme verilen çözelti.



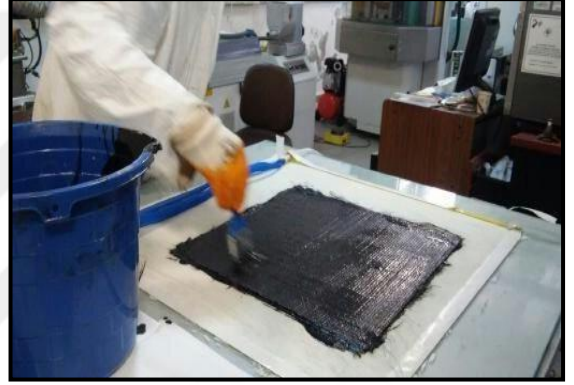
Şekil 3.21. Çekme ve yorulma numuneleri için kompozit plakanın üretilmesi.



Şekil 3.22. Kesme işlemi sonrası çekme ve yorulma numunelerinin elde edilmesi.



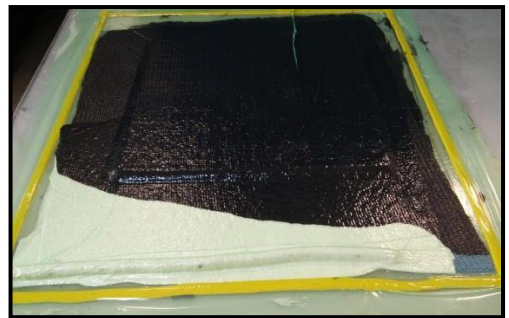
Şekil 3.23. NCF CF kumaşlardan 14 adet hazırlanması.



Şekil 3.24. Her bir kata el yatırma yöntemi ile reçine emdirilmesi.



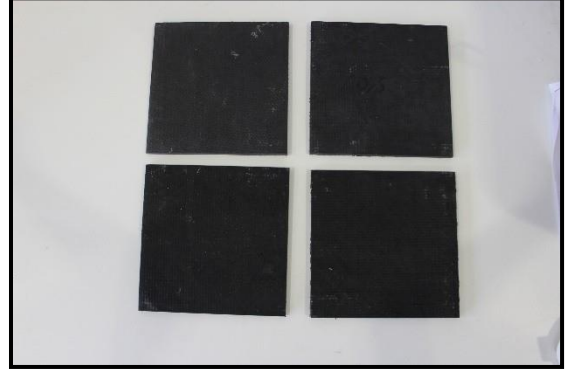
Şekil 3.25. Vakum torbalama yapılması.



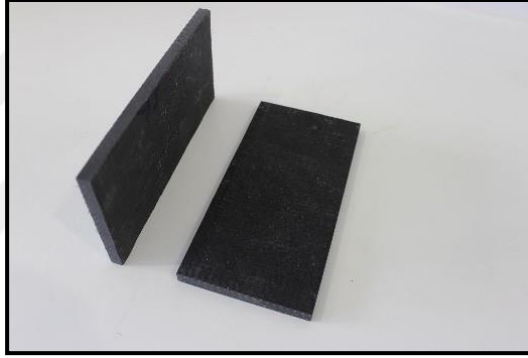
Şekil 3.26. Vakum pompası açılarak reçinenin tüm katlara emdirilmesi, fazla reçinenin ve havanın sistemden tahliyesi.



Şekil 3.27. Delme işlemi için 10 mm kalınlığındaki NCF CFRP Kompozitin elde edilmesi.



Şekil 3.28. Plakanın 4 eşit parçaya kesilmesi.



Şekil 3.29. Delme işlemi plakalarının hazırlanması.

2.6. MWCNT'ÜN EPOKSİ İÇERİSİNDE DAĞILIMININ KARAKTERİZE EDİLMESİ

2.6.1. UV VİS Spektroskopi

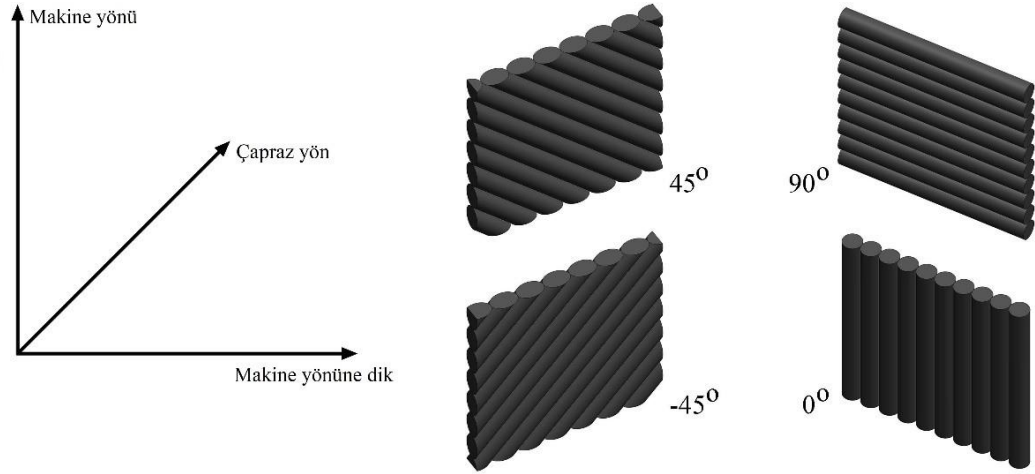
MWCNT-epoksi reçine sıvı çözeltilerinin UV VIS Spektroskopi analizleri 200-1000 nm dalga boyu ölçme aralığında yapılmıştır. Çözelti aseton ile seyreltilmiştir. Seyreltme işlemi çözeltinin dağılımını önemli ölçüde etkilemez [120]. Absorbans spektrumundaki pik epoksi reçine içerisinde MWCNT'ün dağılım durumunu ölçmek için kullanılmaktadır. Demetlenmiş CNT'lerin aksine, tamamen dağılmış CNT'ler, 200 ila 1200 nm dalga boyu bölgesinde oldukça aktiftir.

2.6.2. Çekme Testi

Çekme testi 100 kN yük hücresine sahip INSTRON 5982 çekme testi cihazı kullanılarak 1 mm.min⁻¹ çekme hızında yapılmıştır. Tekrarlanabilirlik değerlendirmesi için en az beş örnek test edilmiştir. Örneklerin eksenel gerinimini ölçmek için video ekstansometre kullanılmıştır. Laminatlar, su soğutmalı daire elmas testere ile kesilmiş; ASTM D3039'a göre her kompozit plakadan beş numune elde edilmiştir (Şekil 3.30). Şekil 3.31 çekme testi yönlerini (a) göstermektedir ; sırasıyla MD (Makine işleme Yönü), BD (Çapraz yön), CD (Makine işleme yönüne dik) ve makine işleme yönüne göre fiberlerin doğrultusu görülmektedir (b). Kompozit üzerinde yapılan çekme testinin yönü, üretim sırasında kumaşın makine içindeki akış yönü olan makine yönüdür (MD). 0 ° fiber yönü makine işleme yönüdür.



Şekil 3.30. ASTM D3039 standardına göre çekme testi numunesi.



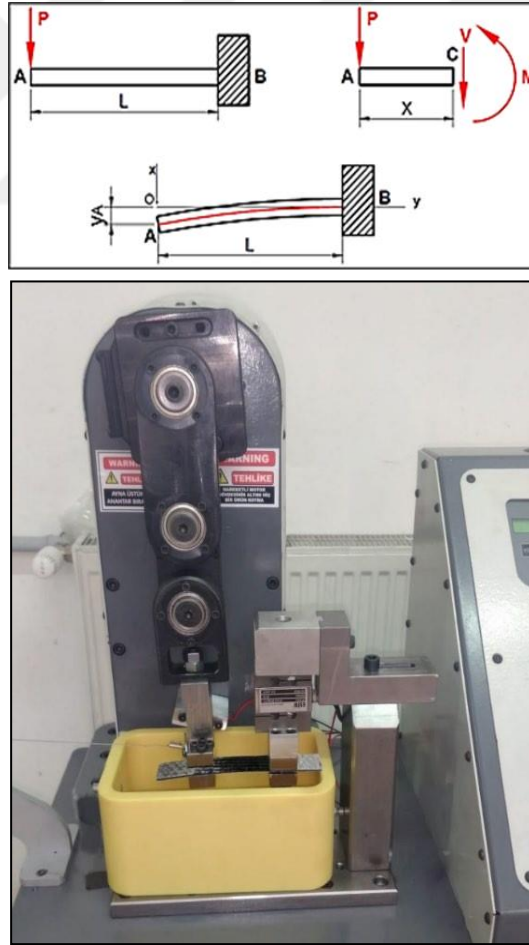
Şekil 3.31. Çekme testi numunesi a) Çekme yönleri, b) Makine işleme yönüne göre fiber doğrultuları.

2.6.3. Yorulma Testi

Üretilen kompozit malzemenin yorulma özelliğini araştırmak için, eğilme yorulma test makinesi kullanılarak ASTM D3039 standardına göre hazırlanmış test numunelerinin yorulma testi gerçekleştirilmiştir. Tüm yorulma testleri oda sıcaklığında TURKYUS yorulma test cihazı ile yapılmıştır. Yorulma testi yük kontrollü olup, minimum stresin maksimum gerilime oranı olarak tanımlanan gerilim oranı 0,1 olarak ayarlanmıştır. Yükleme frekansı 10 Hz. [173–176]. Yorulma testi ve çekme testi örnekleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan yorulma test makinesinin çalışma prensibini gösteren şema Şekil 3.32 ’de verilmiştir.

Çizelge 3.1.Yorulma testi ve çekme testi numune detayları.

Numune No	Takviye elamanı	Matris	MWCNT (wt%)	Sürfaktan
1	Dört eksenli [-45 ° 90 /+45 / 0] NCF CF (Kıvrımsız Karbon Fiber Kumaş)	Epoksi reçine	0	-
2	Dört eksenli [-45 ° 90 /+45 / 0] NCF CF kumaş	Epoksi reçine	0.5	Triton X- 100
3	Dört eksenli [-45 ° 90 /+45 / 0] NCF CF Kumaş	Epoksi reçine	1	Triton X- 100
4	Dört eksenli (quadriaxial) [-45 ° 90 /+45 / 0] NCF-CF Kumaş	Epoksi reçine	1,5	Triton X- 100



Şekil 3.32. Yorulma test cihazı çalışma prensibi.

2.6.4. SEM

Çekme testi ve yorulma testi ile elde edilen MWCNT katkılı NCF CFRP kompozit numunelerinin kırılma yüzeyleri elektriksel iletkenlik için altınla kaplanmış ve ardından taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gözlemlenmiştir (Carl Zeiss Ultra Plus Gemini FESEM).

2.7. DELME İŞLEMİ MATERYAL VE YÖNTEM

2.7.1. Delme İşleminde Kullanılan Materyaller

NCF CFRP kompozitler Marmara üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliğinde bulunan Jonford VMC-550 Model CNC Freze Tezgâhı kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. Delme işlemi deneylerinde kullanılan tezgâhın teknik özellikleri.

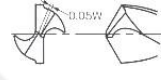
Hareket sınırları	X: 31,5" (800 mm) Y: 20" (500 mm) Z: 17,7" (450 mm)
Tabla çalışma yüzeyi	1000 x 500 mm
İş mili motor Gücü	10 HP (30 min.) / 7,4 HP (cnot)
Tezgâh zemin alanı	92,5" x 98,4" (2350 x 2500)

Dinamometre bir kuvvetin üç eksenli bileşenlerini ölçmede kullanılır, iç yapısının rijit olmasından dolayı yüksek frekansa sahiptir. Dört adet üç eksenli kuvvet sensörü iki metal plaka arasına monte edilmiştir. Sensörde üç çift kuartz plaka vardır ve bunlardan biri Z yönünde etki edince, diğer ikisi X ve Y yönlerindeki itme kuvvetine karşı hassastırlar. Kistler 9443B dinamometrenin teknik özellikleri Çizelge 3.3'de verilmiştir. Deneyde 5019b tipi yük amplifikatörü kullanılmıştır. Amplifikatör kuvvet sensöründen üç eksen (x,y,z) gelen voltaj sinyallerini ayrı ayrı değerlendirmektedir. Üç kanallı ve mikroişlemci kontrollü olan bu amplifikatör, dinamometreden gelen sinyalleri yükselterek volt olarak çıkış vermektedir.

Çizelge 3.3. Kistler 9443B Tipi Dinamometre Teknik özellikleri.

Ölçme aralığı F_x, F_y	-1515 kN
F_z	-1030 kN
Aşırı Yük F_x, F_y	-20/20 kN
F_z	-12/40 kN
Hassasiyet F_x, F_y	≈ -8 pC/N
F_z	≈ -3.7 pC/N
Rijitlik C_x, C_y	$\approx 0.8 -1$ kN/ μ m
C_z	≈ 2 kN/ μ m
Doğal Frekans $F_0 (x,y)$	$\approx 1.5 -1.7$ kHz
$F_0 (z)$	$\approx 2.5 -2.7$ kHz

Çizelge 3.4. DLC kaplamalı kesici takım özellikleri.

Takım Malzemesi	Kaplama Türü	Çap (mm)	Ağız sayısı	Uç açısı	Helis açısı	Matkap kesici kenar şekli	Matkap öz kalınlığı şekli
HSS (Yüksek Hız Çeliği)	DLC (Elmas Benzeri karbon kaplamalı)	Ø 6	2	135	32 38	3Rake 	



Şekil 3.33. Ø6x57x99 mm boyutlarında DLC kaplamalı matkap görüntüsü.

DLC kaplamalı matkap radyal ağza sahip olmadığı için, iyi bir merkezlenme özelliğine sahiptir. İtme kuvveti değerleri de düşük çıkmaktadır [177].



Şekil 3.34. Ø6 x50 ALTIN kaplamalı matkap görüntüsü.

Çizelge 3.5. ALTIN kaplamalı kesici takım özellikleri.

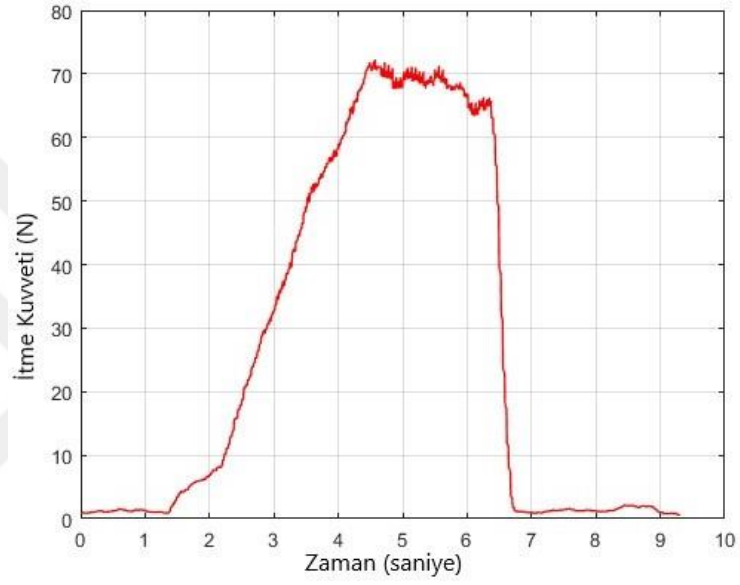
Takım Malzemesi	Kaplama Türü	Çap(mm)	Ağız Sayısı	Uç açısı	Helis Açısı	Alın boşluk açısı değerleri
Sert Karbür (WC)	ALTIN (Alüminyum titanyum Nitrür)	Ø6	2	140		1. Boşuk açısı 11 2. boşuk açısı 24

2.7.2. Delme İşleminde Kullanılan Yöntemler

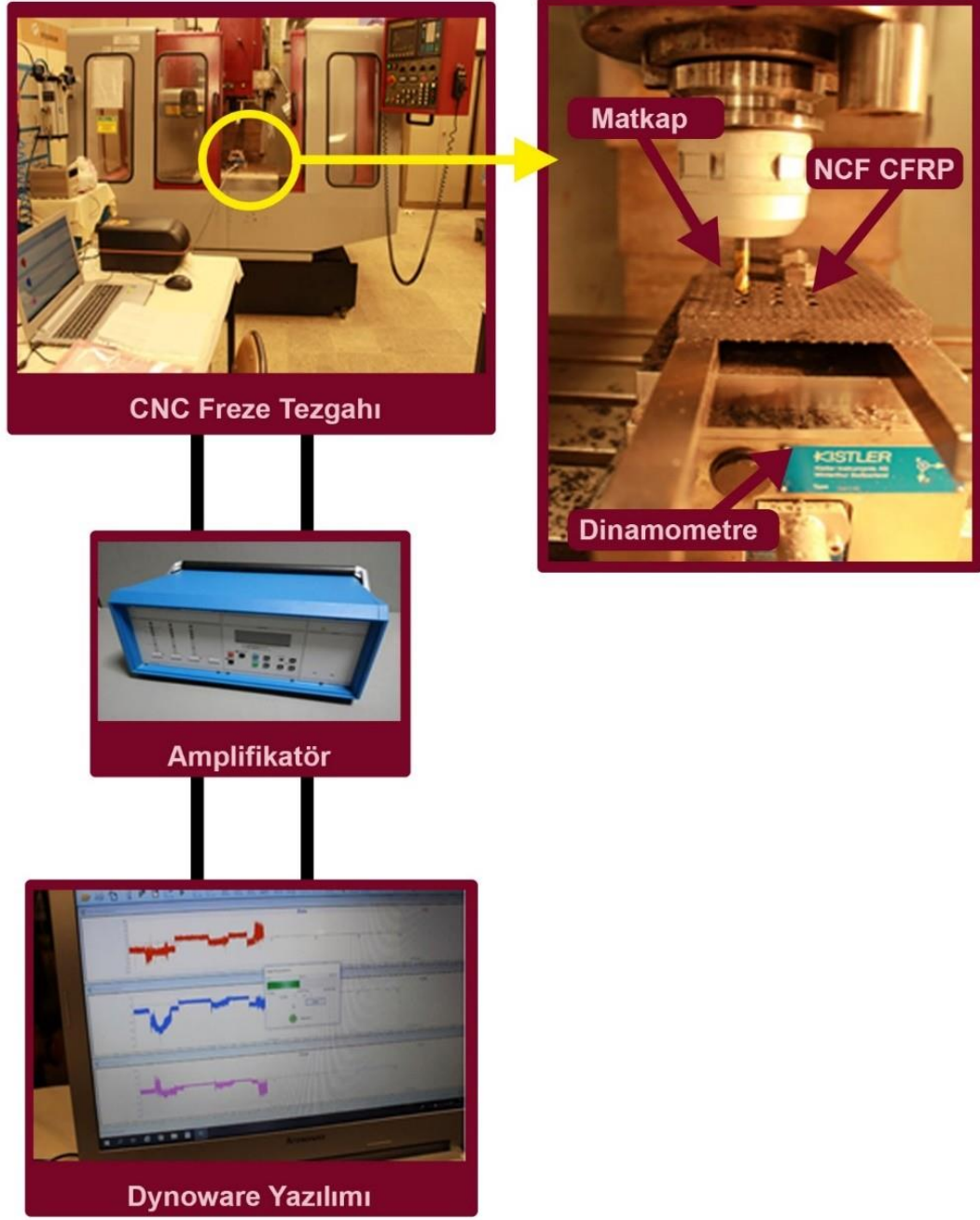
2.7.2.1. İtme Kuvveti Ölçümü

İtme kuvveti malzemeden talaş kaldırılması için takım tarafından uygulanan kuvvet olarak tanımlanır. Takım tezgâhı tarafından uygulan bu kuvvetin bilinmesi takım tezgâhının tasarımında titreşimsiz ve rijit tasarım için gerekli bir büyüklüktür. Kesme kuvvetleri, kesici takım tasarımını da etkilediği için kesici takıma gelen yüklere göre tasarım değişiklik göstermektedir. Talaş kaldırma işleminde talaş-takım arasındaki temas uzunluğu itme kuvveti büyüklüğünü etkiler. Talaş-takım temas uzunluğunun az olması kesme kuvvetlerini düşürür. İtme kuvveti kullanılan takımın geometrik özelliklerine de bağlıdır. Talaş açısındaki artış itme kuvvetini düşürürken, bu artış takımın dayanımını azalttığı için aşınmayı artırır ve aşınan takım, kuvvetleri artırır [178]. NCF CFRP nanokompozitlerin delinmesi esnasında meydana gelen itme kuvvetlerini ölçmek için Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan Kistler 9443B piezoelektrik dinamometre kullanılmıştır.

5019b yük amplifikatöründen alınan dataların değerlendirilmesi ve grafiksel olarak ifade edilmesi için geliştirilen DynoWare (Şekil 3.35) isimli yazılım programı kullanılmıştır. Bu program sayesinde 3 eksenle iş parçasına etki eden kuvvetler grafiksel olarak görülmekte ve istenildiği takdirde data olarak Microsoft Office Excel programına aktarılabilmektedir. Delme işlemi kuru şartlar altında yapılmıştır. Delme işlemi İtme kuvveti ölçüm düzeneği Şekil 3.36’ da gösterilmiştir.



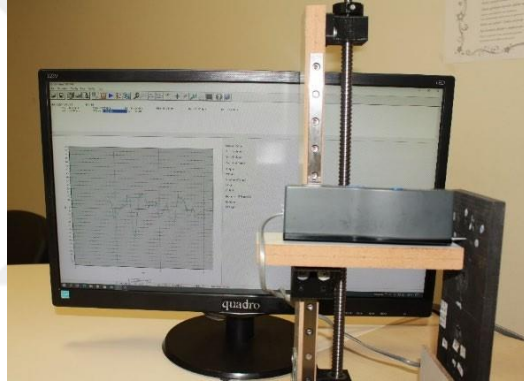
Şekil 3.35. İtme kuvveti sonuçlarının grafiksel olarak alınması.



Şekil 3.36. Delme işlemi itme kuvveti ölçme düzeneği.

2.7.2.2. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

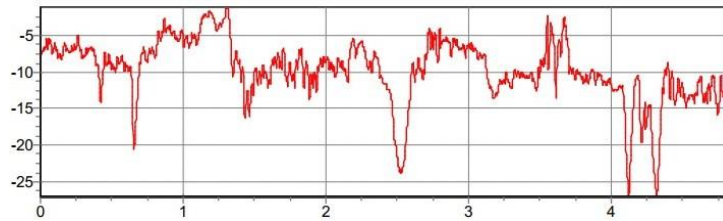
NCF CFRP nanokompozitlerin delik yüzey kalitesini belirlemek amacıyla, ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerlerini ölçmek için Şekil 3.37.b 'de gösterilen Time 3200 marka cihaz kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmadan önce kalibrasyonu master üzerinde ölçüm yapılarak kontrol edilmiştir. Ölçme işlemi için her bir delik içerisinde 4 noktadan 3'er defa yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır. Bu sonuç bir deney için elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değeri (R_a) olarak kabul edilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçüm düzeneği Şekil 3.37'de belirtilmiştir.



(a)



(b)



(c)

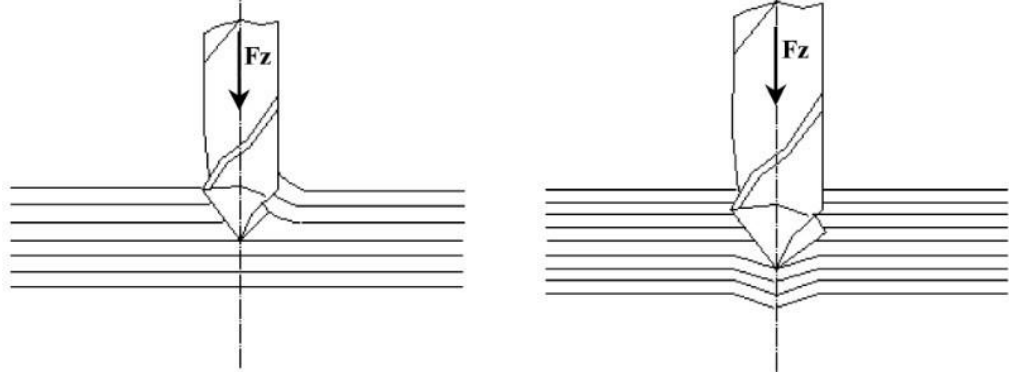
Şekil 3.37. a)Yüzey pürüzlülük ölçüm düzeneği b)Yüzey pürüzlülük cihazı
c) Yüzey pürüzlülük ölçüm grafiği.

2.7.2.3. Delaminasyon Ölçümü

Jin ve arkadaşları (2008), delaminasyonun, daha büyük itme kuvveti nedeniyle tabakalar arasındaki bağ ayrılmasının neden olduğu bir olgu olduğunu açıklamıştır [179]. Giriş delaminasyonu sıyrılma olarak (peel up) isimlendirilir. Matkabın kesici kenarları ilk önce kompozit plakayı aşındırır. Daha sonra matkap ileri doğru hareket ederek aşınmış malzemeyi kanal boyunca geri çekme eğilimi gösterir. Malzeme, matkap tarafından işlenmeden yukarı doğru kıvrılır. Bu hareket, aşağı doğru hareket eden itme kuvveti tarafından tutulan kesilmemiş kısımdan üst tabakaları ayırmak için yukarı doğru bir sıyrılma kuvveti uygular.

Delme sırasında ortaya çıkan yüksek termal gerilimler, takım girişinde iş parçasının yüzeyindeki delaminasyonu da etkileyebilir. Tork tarafından üretilen kesme gerilimi, deliğin girişindeki tabakaların sıyrılmasına (peel up) da katkıda bulunabilir. Çıkış delaminasyonu, dışarı itme olarak tanımlanır. Delme sırasında matkap, iş parçasına her zaman bir basma itme kuvveti uygular. Matkabın altındaki tabakalar bu sebeple deliğin etrafındaki tabakalar arası bağdan çekilme eğilimindedir. Matkap sona yaklaştıkça kesilmemiş kalınlık küçülür ve deformasyona karşı direnç azalır. Bu noktada, uygulanan yük tabakalar arası bağ gücünü aşar ve delaminasyon gerçekleşir. Matkabın radyal ağzının malzemeyi kesememesi gibi kesme şartları da delik çıkışındaki delaminasyonu tetikleyebilir [180]. Hem giriş hem çıkış delaminasyon faktörü (F_d), delaminasyon bölgesinin maksimum çapının (D_{max}) matkap çapına (D) oranından hesaplanır [181].

$$F_d = \frac{D_{max}}{D} \quad (3.1)$$

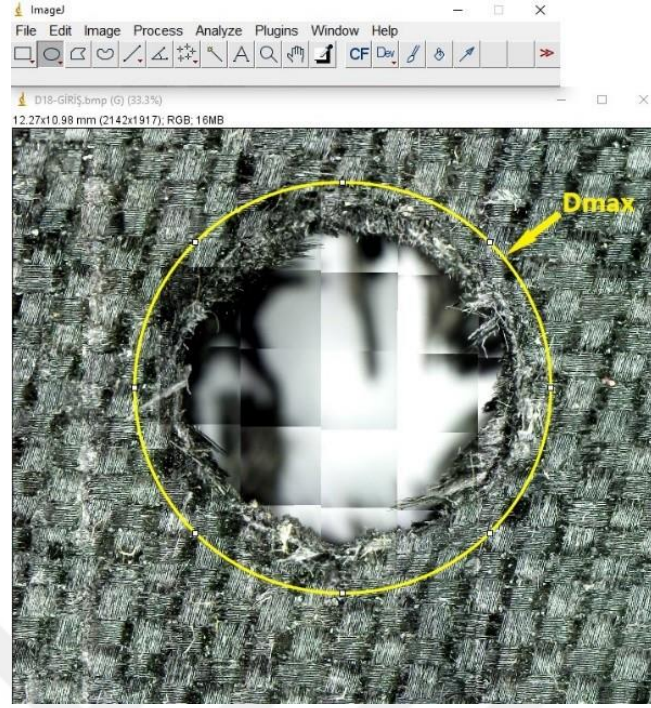


Şekil 3.38. Delaminasyon çeşitleri a) Giriş delaminasyonu sıyrılma(peel up) b) Çıkış delaminasyonu dışarı itme (peel out) [181].

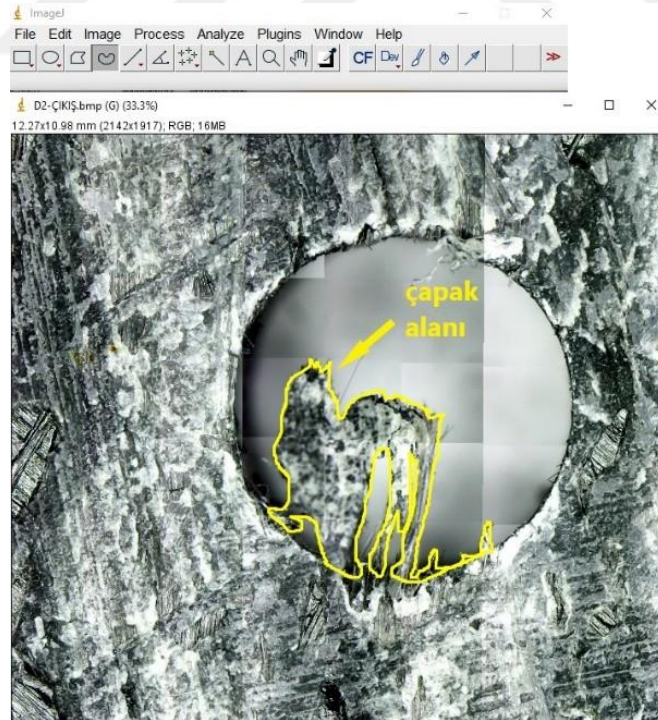
Delaminasyon çeşitleri Şekil 3.39 da gösterilmiştir. Delik giriş delaminasyonu, delik çıkış delaminasyonu, delik giriş çapak alanı ve delik çıkış çapak alanı görüntüleri dijital mikroskop kullanılarak görüntülenmiştir (Şekil 3.40). Delik giriş ve çıkış delaminasyonunu hesaplamak için ImageJ programı yardımı ile Dmax. ölçüsü elde edilmiştir (Şekil 3.41). Ayrıca Delik giriş ve çıkış çapak alanları için de ImageJ programı kullanılmıştır (Şekil 3.42).



Şekil 3.39. Delik görüntüsünün dijital mikroskop ile alınması.



Şekil 3.40. Delaminasyon alanının belirlenmesi için Imagej programının kullanılması.



Şekil 3.41. Delik çapak alanının Imagej programı ile hesaplanması.

2.7.2.4. Deney Tasarımı (Doe)

Tam Faktöriyel

Deney tasarımında klasik yöntemlerin yetersizliği istatistiksel deney tasarım yöntemleri ile giderilmiştir. Tam faktöriyel deney tasarımı deneydeki faktör seviyelerinin veya süreç parametrelerinin tüm olası kombinasyonlarının incelenmesine yardımcı olmaktadır. Bu kombinasyon faktör seviyelerinin birbirleri ile çarpımlarından oluşur. Tam faktöriyel tasarımda; faktör seviyeleri aynı anda değiştirildiğinde, yanıt üzerindeki iki faktörün ortak etkilerini incelemek mümkün olmaktadır. Minitab yazılım programı kullanılarak tam faktöriyel tasarımlar yapılır ve deney sonuçları analiz edilir. Deneylerde faktör sayısı veya süreç parametreleri 4'e eşit veya daha az olduğunda tam faktöriyel tasarım kullanılmaktadır. Faktör sayısı 4'ten fazla olduğunda, kesirli faktöriyel tasarımlar tavsiye edilir.

Tam faktöriyel deneylerin analizinde ANOVA (Varyasyon Analizi) kullanılmaktadır. Bu yöntemler ile bir parametrenin deney üzerindeki etkisi hesaplanabilir. Varyasyon analizi işlem sırasında bir değişiklik yapmadan farklılıkların kaynağının belirlenmesine yardımcı olur.

Gri İlişki Analizi (GRA)

Delme işleminde birden fazla kalite özelliği olduğunda, full faktöriyel analizi, her bir özellik için ayrı ayrı optimum sonuç sağlar. Örneğin, kompozit malzemeyi delme işleminde, yüzey pürüzlülüğünün, itme kuvvetinin en aza indirilmesi için optimum koşul ile delaminasyon faktörünün, delik çıkış çapak alanı değerinin en aza indirilmesi için optimum koşul aynı olmayabilir.

Bu çalışmada, MWCNT NCF CFRP nanokompozit malzemenin delinmesinde optimum deney parametrelerinin elde edilmesi için deney sonuçlarının çoklu performans özelliklerini araştırmada gri ilişkisel analiz (GRA) yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyonu gerçekleştirmek için veri işleme aşağıdaki formüller kullanılarak yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

Gri İlişki Analizinin Tanımı

Gri ilişki analizinde, siyah hiç bir bilgiye sahip olmamayı ifade ederken, beyaz ise tüm bilgiye sahip olmayı ifade etmektedir. Siyah ile beyaz arası bir değer gri sistemdeki bilgi seviyesini belirtir. Bilgilerin bir kısmının bilindiği bir kısmının ise belirsiz olduğu sistem gri sistemdir. Sistem içerisindeki tüm parametrelerin birbirleri ile olan ilişkisinin net bir şekilde bilindiği sistem ise beyaz sistemdir. Sistem içerisindeki parametreler arası ilişkilerde belirsizliğin olduğu sistem gri sistemdir [182–184].

Gri ilişki analizi gri sistemden elde edilir. Gri ilişki analizi bir ana faktör ve diğer tüm faktörler arasındaki ilişkilerin analizinde kullanılmaktadır. Gri ilişki analizi, sekanslar arasındaki veri farkının mutlak değerinin bir ölçümüdür ve sekanslar arasındaki yaklaşık korelasyonu ölçmek için kullanılabilir [184,185] .

Gri ilişki analizi, belirli bir sistemdeki bir ana faktör ile diğer tüm faktörler arasındaki bilinmeyen ilişkileri inceleyen gri sistem teorisinde bir ölçüm yöntemidir. Gri ilişki analizinde deney sonuç değerleri ilk önce 0'dan 1' e kadar kadar normalize edilir. Ardından, normalleştirilmiş araştırma verilerine dayalı olarak, istenen ve gerçek deneysel veriler arasındaki korelasyonu iletmek için gri ilişki katsayı değeri ölçülür. Daha sonra, seçilen yanıtlarla uyumlu olan Gri ilişki katsayısının ortalaması alınarak nihai gri ilişki derecesi bulunur. Bulunan gri ilişki derecesi çoklu performanslı deney sonuçları hakkında bilgi vermektedir. En iyi sonuca ulaşmak için kullanılması gereken parametreler gri ilişki derecesine bağlıdır. Daha sonra en yüksek gri ilişki derece değeri ile optimal parametreler elde edilir [186].

Verilerin hazırlanması (Ön işlem - Normalizasyon)

Veri sekanslarının birimleri ve aralıkları birbirlerinden farklı olabileceğinden bu farklılıkların giderilmesi gerekir. Verilerin birbiri ile karşılaştırılabilir hale getirilmesi işlemine ön işlem (normalizasyon) adı verilir. Gri ilişki analizi, farklı karakteristiklere sahip veri sekansları için farklı veri normalizasyon metodları sunar [184,185]. Eğer, veri sekansının hedef değeri sonsuz ise, karakteristik olarak büyük sonuç daha iyi bir değeri ifade edecektir.

Bu durumda veri sekansının normalizasyonu şu şekilde yapılır;

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^o(k) - \min_i x_i^o(k)}{\max_i x_i^o(k) - \min_i x_i^o(k)} \quad (3.2)$$

Eğer karakteristik olarak küçük olan daha iyi ise normalizasyon işlemi aşağıdaki şekilde yapılır;

$$x_i^*(k) = \frac{\max_i x_i^o(k) - x_i^o(k)}{\max_i x_i^o(k) - \min_i x_i^o(k)} \quad (3.3)$$

Eğer, ulaşılmak istenen net bir hedef değer söz konusu ise normalizasyon işlemi aşağıdaki gibi yapılır;

$$x_i^*(k) = 1 - \frac{x_i^o(k) - x^o}{\max_i x_i^o(k) - x^o} \quad (3.4)$$

Ya da basit şekilde, tüm sekans ilk elemanın değerine bölünerek normalizasyon gerçekleştirilebilir.

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^o(k)}{x_i^o(1)} \quad (3.5)$$

Burada $i=1,...,m$; $k=1,...,n$ olup, m deneysel veri miktarını, n ise parametre sayısını, $x_i^o(k)$ orjinal sekansı, $x_i^*(k)$ ise normalize edilmiş sekansı, $\max_i x_i^o(k)$ orjinal sekansın en büyük değerli elemanını, $\min_i x_i^o(k)$ orjinal sekansın en küçük değerli elemanını, x^o ise hedef değeri ifade eder.

Gri ilişki katsayıları ve gri ilişki puanı

Gri ilişki analizinde, iki sistem veya iki sekans arasındaki alaka düzeyinin ölçüsü gri ilişki puanı olarak tanımlanır. Sadece tek sekansın, $x_o(k)$, referans sekans ve diğer tüm

Beklenilene karşılaşılan sekanslarda yapısal ilişki ölçümü denir.



Normalizasyon işleminden sonra, i inci deneyin k ıncı performans karakteristiğine ait gri ilişki katsayısı $\xi_i(k)$ aşağıdaki şekilde ifade edilir [185,187,188] .

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{oi}(k) + \zeta \Delta_{max}} \quad (3.6)$$

Burada, Δ_{oi} karşılaştıma sekansı olup referans sekansın sapma sekansıdır.

$$\Delta_{oi} = \|x_o^*(k) - x_i^*(k)\| \quad (3.7)$$

$$\Delta_{min} = \min_{\forall jj \in i} \min_{\forall k} \|x_o^*(k) - x_{jj}^*(k)\| \quad (3.8)$$

$$\Delta_{max} = \max_{\forall jj \in i} \max_{\forall k} \|x_o^*(k) - x_{jj}^*(k)\| \quad (3.9)$$

Burada, $x_o^*(k)$ referans sekansı, $x_i^*(k)$ karşılaştırılabilirlik sekansını, ζ ayrıştırıcı ya da tanımlayıcı katsayı : $\zeta \in [0, 1]$ dir. ζ değeri küçüldükçe ayrıştırma kabiliyeti artar. Genellikle $\zeta=0.5$ alınır.

Gri ilişki katsayıları bulunduktan sonra, ortalaması alınarak gri ilişki puanı elde edilir [187,188]. Gri ilişki puanı aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (3.10)$$

Ancak mühendislik uygulamalarında, her bir faktörün sistem üzerindeki önem derecesi farklıdır. Gerçek uygulamalarda, farklı önem derecelerine sahip faktörler farklı ağırlıklandırılarak gri ilişki puan hesaplaması aşağıdaki forma dönüşür [187,188] ;

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \omega_{ik} \xi_i(k), \quad \sum_{k=1}^n \omega_{ik} = 1 \quad (3.11)$$

Burada, ω_k , k faktörünün normalize ağırlığını ifade eder. Tüm faktörler eşit ağırlıklandırıldığında yukarıdaki denklem bir önceki denklemle eşit duruma gelir. γ_i ile ifade edilen gri ilişki puanı, referans sekans ile karşılaştırılabilirlik sekansı arasındaki korelasyon seviyesini ifade eder. Eğer her iki sekans da birbirine eşit ise gri ilişki puanı 1 olur. Gri ilişki puanı ayrıca, karşılaştırılabilirlik dizisinin referans dizisi üzerindeki etki derecesini de gösterir. Bundan dolayı, eğer belirli bir karşılaştırılabilirlik sekansı referans sekans için diğerlerinden daha yüksek öneme sahip ise referans sekans ile arasındaki gri ilişki puanı da diğerlerine göre daha yüksektir [185].

Delme Parametreleri

Bu çalışmada deney tasarımı; giriş delaminasyonunun, çıkış delaminasyonunun, giriş çapak alanının, çıkış çapak alanının, yüzey pürüzlülüğünün ve itme kuvvetinin minimum değerlerde elde edilmesi için delme işlemini etkileyen parametreleri belirlemeyi amaçlamıştır. Delme işleminin parametreleri MWCNT yüzdesi (4 seviye), devir sayısı (3 seviye), ilerleme oranı (3 seviye) ve matkap çeşidinden (2 seviye) oluşmaktadır. Çizelge 3.6 ' da parametreler ve seviyeleri görülmektedir.

Çizelge 3.6. Delme parametreleri ve seviyeleri.

Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
MWCNT(%)	0	0,5	1	1,5
Devir Sayısı (devir/dakika)	500	2000	3500	-
İlerleme oranı (mm/dev)	0,05	0,10	0,15	-
Matkap Çeşidi	ALTIN	DLC	-	-

Deney tasarımında tam faktöriyel yöntem kullanılmış her deneme çalışması tekrarlanmıştır. Hem saf epoksili NCF CFRP hem MWCNT içerikli NCF CFRP nanokompozit üzerinde delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.7'de ful faktöriyel deney tasarımları görülmektedir.

Çizelge 3.7. Ful Faktöriyel Deney Tasarımı

Deney No	MWCNT (%)	Devir Sayısı (dev./dak.)	İlerleme (mm/dev)	Matkap çeşidi
1	0	500	0.05	ALTIN
2	0	500	0.05	DLC
3	0	500	0.10	ALTIN
4	0	500	0.10	DLC
5	0	500	0.15	ALTIN
6	0	500	0.15	DLC
7	0	2000	0.05	ALTIN
8	0	2000	0.05	DLC
9	0	2000	0.10	ALTIN
10	0	2000	0.10	DLC
11	0	2000	0.15	ALTIN
12	0	2000	0.15	DLC
13	0	3500	0.05	ALTIN
14	0	3500	0.05	DLC
15	0	3500	0.10	ALTIN
16	0	3500	0.10	DLC
17	0	3500	0.15	ALTIN
18	0	3500	0.15	DLC
19	0.5	500	0.05	ALTIN
20	0.5	500	0.05	DLC
21	0.5	500	0.10	ALTIN
22	0.5	500	0.10	DLC
23	0.5	500	0.15	ALTIN
24	0.5	500	0.15	DLC
25	0.5	2000	0.05	ALTIN
26	0.5	2000	0.05	DLC
27	0.5	2000	0.10	ALTIN
28	0.5	2000	0.10	DLC
29	0.5	2000	0.15	ALTIN
30	0.5	2000	0.15	DLC
31	0.5	3500	0.05	ALTIN
32	0.5	3500	0.05	DLC
33	0.5	3500	0.10	ALTIN
34	0.5	3500	0.10	DLC
35	0.5	3500	0.15	ALTIN
36	0.5	3500	0.15	DLC
37	1	500	0.05	ALTIN

Çizelge 3.7.(devam ediyor)

Deney No	MWCNT (%)	Devir Sayısı (dev./dak.)	İlerleme (mm/dev)	Matkap çeşidi
38	1	500	0.05	DLC
39	1	500	0.10	ALTIN
40	1	500	0.10	DLC
41	1	500	0.15	ALTIN
42	1	500	0.15	DLC
43	1	2000	0.05	ALTIN
44	1	2000	0.05	DLC
45	1	2000	0.10	ALTIN
46	1	2000	0.10	DLC
47	1	2000	0.15	ALTIN
48	1	2000	0.15	DLC
49	1	3500	0.05	ALTIN
50	1	3500	0.05	DLC
51	1	3500	0.10	ALTIN
52	1	3500	0.10	DLC
53	1	3500	0.15	ALTIN
54	1	3500	0.15	DLC
55	1.5	500	0.05	ALTIN
56	1.5	500	0.05	DLC
57	1.5	500	0.10	ALTIN
58	1.5	500	0.10	DLC
59	1.5	500	0.15	ALTIN
60	1.5	500	0.15	DLC
61	1.5	2000	0.05	ALTIN
62	1.5	2000	0.05	DLC
63	1.5	2000	0.10	ALTIN
64	1.5	2000	0.10	DLC
65	1.5	2000	0.15	ALTIN
66	1.5	2000	0.15	DLC
67	1.5	3500	0.05	ALTIN
68	1.5	3500	0.05	DLC
69	1.5	3500	0.10	ALTIN
70	1.5	3500	0.10	DLC
71	1.5	3500	0.15	ALTIN
72	1.5	3500	0.15	DLC

BÖLÜM 4

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. UV VİS SPEKTROSKOPİ ANALİZİ SONUÇLARI

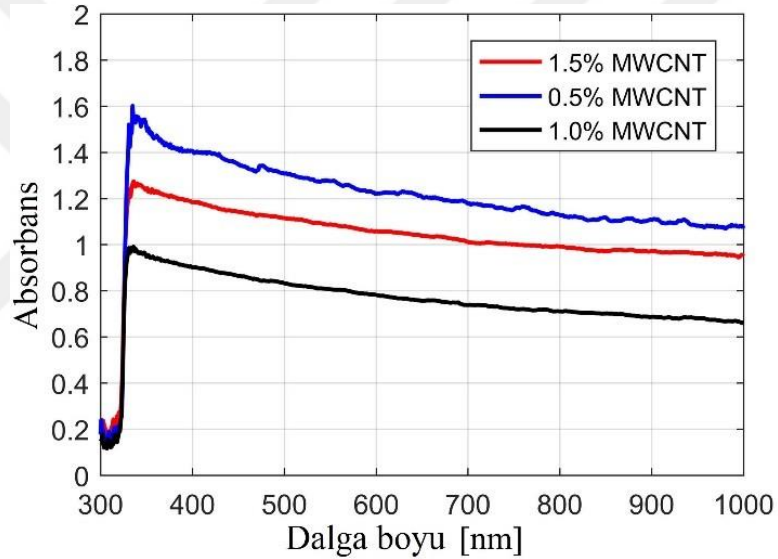
UV Vis spektroskopisi, CNT'lerin dispersiyon durumunu araştırmak için başarıyla kullanılmıştır. Şekil 4.1 MWCNT, etanol, sürfaktan çözeltisinin 1 saatlik (a) ve reçine, sürfaktan, MWCNT çözeltisinin 10 saatlik (b) karıştırma işlemi sonrası renk değişimini göstermektedir. Ultrasonikasyon süresinin artmasıyla MWCNT'ün daha fazla sayıda pul pul dökülmesiyle çözelti koyu siyah hale gelmiştir. CNT dağıldıkça, çözelti koyulaşır ve ışığı absorbe eder, bu nedenle maksimum absorbans, dağılım kalitesinin bir göstergesi olarak kullanılabilir [15].



Şekil 4.1. MWCNT dispersiyonu, a) Süre 1 saat b) Süre 10 saat.

Şekil 4.2 farklı MWCNT konsantrasyonuna sahip çözeltilerde MWCNT'lerin UV spektrumlarını göstermektedir. Tüm çözeltilerde spektrumdaki pik 330 nm dalga boyu civarında gözlemlenmiştir. % 0,5 MWCNT epoksi çözeltisi, 330 nm'de diğer konsantrasyonlardan daha yüksek bir absorpsiyon değeri göstermiştir. Bu, çözeltideki bireysel nanotüp sayısının daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir. MWCNT'ler, Van der waals kuvvetleri nedeniyle birlikte kümelenme eğilimindedir [60]. Sterik itme kuvvetine sahip olan sürfaktan, CNT topaklanmalarının çözülmesinde etkilidir [13].

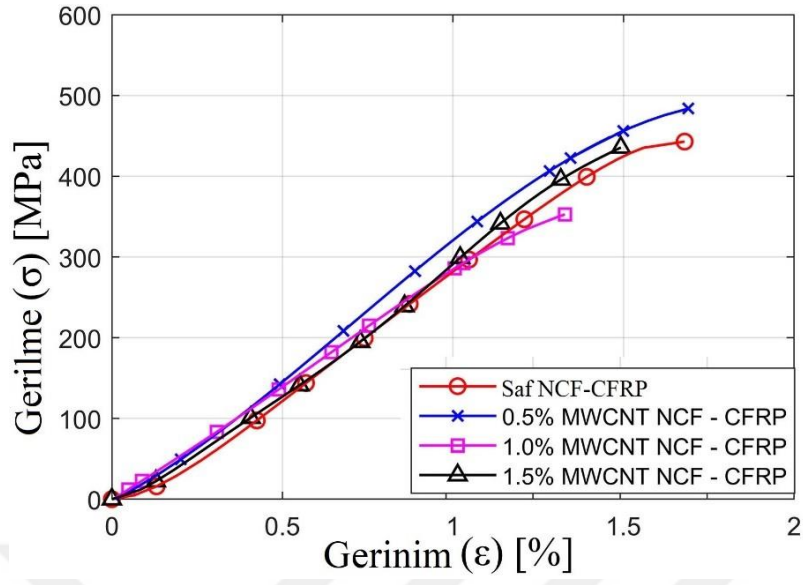
Süpfaktan miktarı, daha az CNT miktarlarında karbon nanotüplerin yüzeyini kaplamak için yeterlidir, ancak nanotüplerin miktarı arttıkça, süpfaktan CNT'lerin aglomerasyonunu tamamen dağıtmak için yetersiz kalır [17] . % 1 ve % 1,5 MWCNT epoksi çözeltiğinde, absorpsiyon değeri anı düşüş görülmüştür, bu MWCNT'lerin aglomerasyon oranını göstermektedir. % 1,5 MWCNT epoksi çözeltisinin absorpsiyon değeri % 1 MWCNT epoksi çözeltisinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, çözeltideki MWCNT'lerin miktarı arttıkça, bireysel MWCNT'lerin sayısı da artmakta ve bu durum absorpsiyon değeri bir artışa yol açmaktadır [117] .



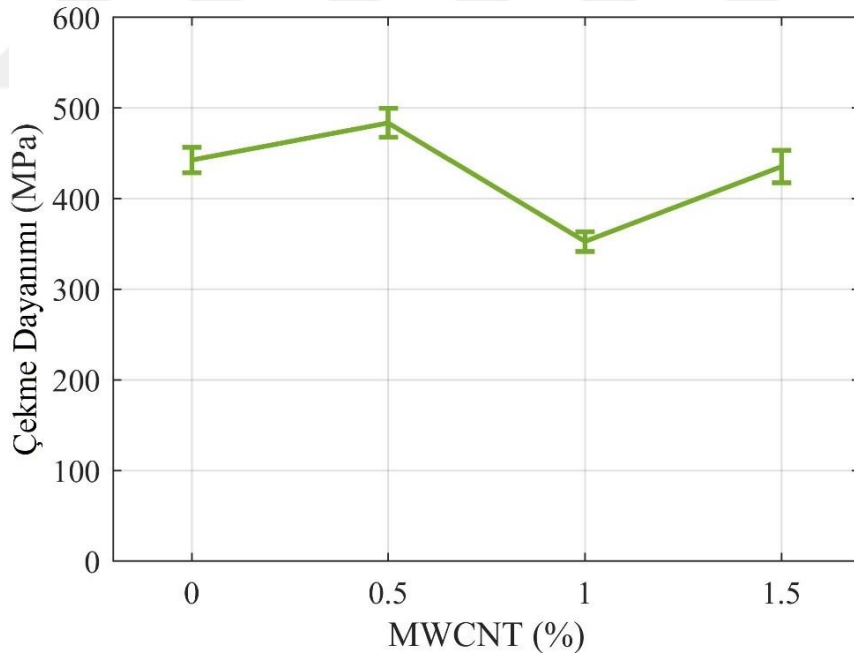
Şekil 4.2. MWCNT katkılı epoksi nanokompozit çözeltilerinin absorpsiyon değeri.

3.2. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI

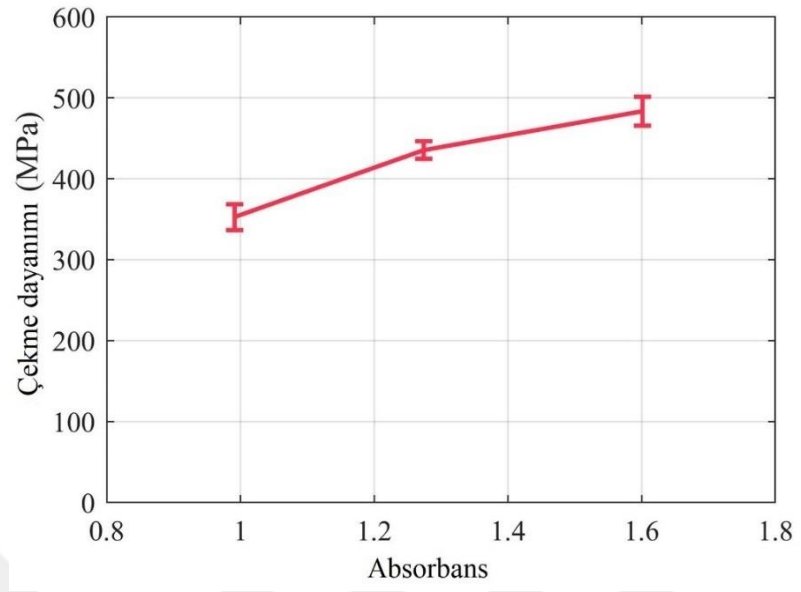
Şekil 4.3 farklı yüzdelerde MWCNT içeren ve saf NCF CFRP kompozit numunelerin gerilim-gerinim (S-S) grafiğini göstermektedir. Bu grafikler, MWCNT yüzdesindeki değışikliğin farklı gerilme davranışlarına neden olduğunu göstermektedir. MWCNT'lerin yüzdesi ile çekme dayanımı arasındaki ilişki Şekil 4.4'de gösterilmiştir. % 0,5 MWCNT ilave edilmesi, saf NCF CFRP'e göre çekme dayanımını % 9,2 artırmıştır. Bu gelişme, çözelti içindeki nanotüplerin homojen dağılımına atfedilir.



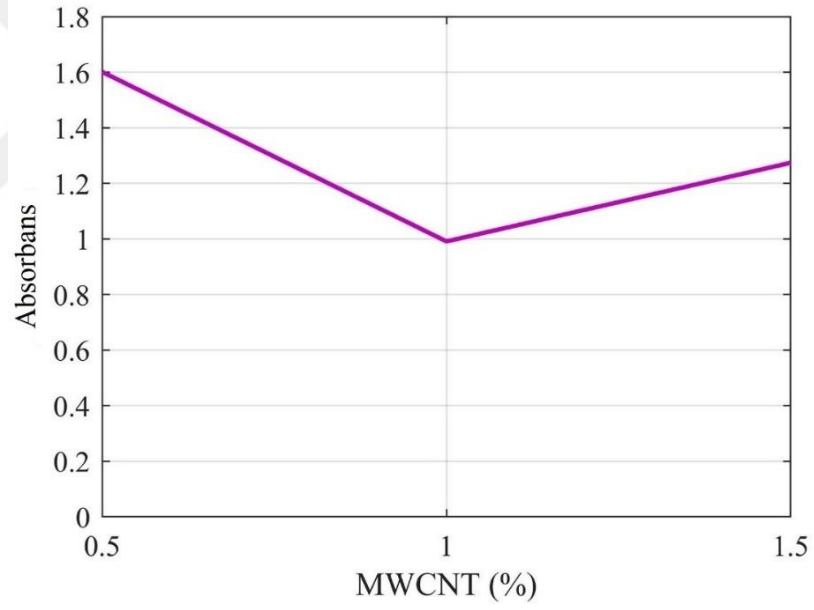
Şekil 4.3. Saf ve %0,5-%1-%1,5 MWCNT katkılı NCF-CFRP nanokompozitin gerilme-gerinim davranışının karşılaştırılması.



Şekil 4.4. MWCNT konsatrasyonunun çekme dayanımı ile ilişkisi.

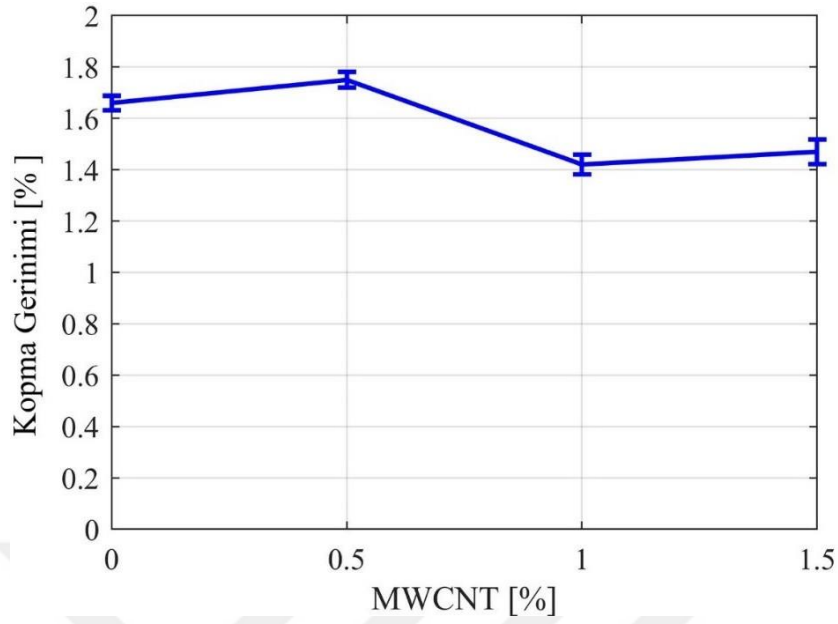


(a)



(b)

Şekil 4.5 a) Absorbans spektrumuna göre çekme dayanımındaki değişim b)MWCNT içeriğine göre absorbans spektrumundaki değişim.



Şekil 4.6. MWCNT konsantrasyonu ile kopma gerinimi arasındaki ilişki.

Şekil 4.5 absorbas spektrumuna göre çekme dayanımındaki değişimi (a) ve MWCNT içeriğine göre absorbas spektrumundaki değişimi (b) göstermektedir. % 0,5 MWCNT'ün diğerine göre daha yüksek absorpsiyon seviyesi göstermesi, daha fazla bireysel nanotüp içerdiğini ve daha iyi homojen dağılım sağladığını ifade etmektedir. Homojen olarak dağılmış MWCNT'ler, epoksi ile MWCNT arasındaki güçlü arayüz yapışmasıyla çekme dayanımını artırmıştır [77,189]. Üiform dağılım nanokompozitlerin özelliklerini iyileştirir. Matris ve fiber arasında homojen olarak dağılmış CNT'ler tarafından ekstra bir yüzey oluşturulur bu durum daha iyi bir arayüzey yapışmasını sağlar [190]. Fakat % 1 ve % 1,5 MWCNT miktarı çözeltide aglomerasyonu artırarak, bireysel nanotüplerin sayısı azaltılmıştır bu durum absorpsiyon pik değerinin aniden düşmesine sebep olmuştur. Sonuç olarak, aglomerasyondaki artış, kompozit malzemelerin çekme dayanımını düşürmüştür. Aglomerasyon, matrisi zayıflatan bir gerilim dağılımı sağladığı için malzemenin çekme özelliklerini azaltır [60]. Bireysel nanotüplerin sayısındaki azalma çözeltideki aglomerasyonun arttığının bir göstergesidir.

Yüksek MWCNT miktarlarında kompozit malzemenin çekme dayanımındaki azalma, aglomerasyondaki artışa, zayıf bir dağılıma veya düşük homojenliğe bağlanabilir. Ayrıca MWCNT'ün aglomerasyonu, epoksi matrisi ve MWCNT takviyesi arasında yük transferini bozar ve kusur gibi davranır [107,191,192].

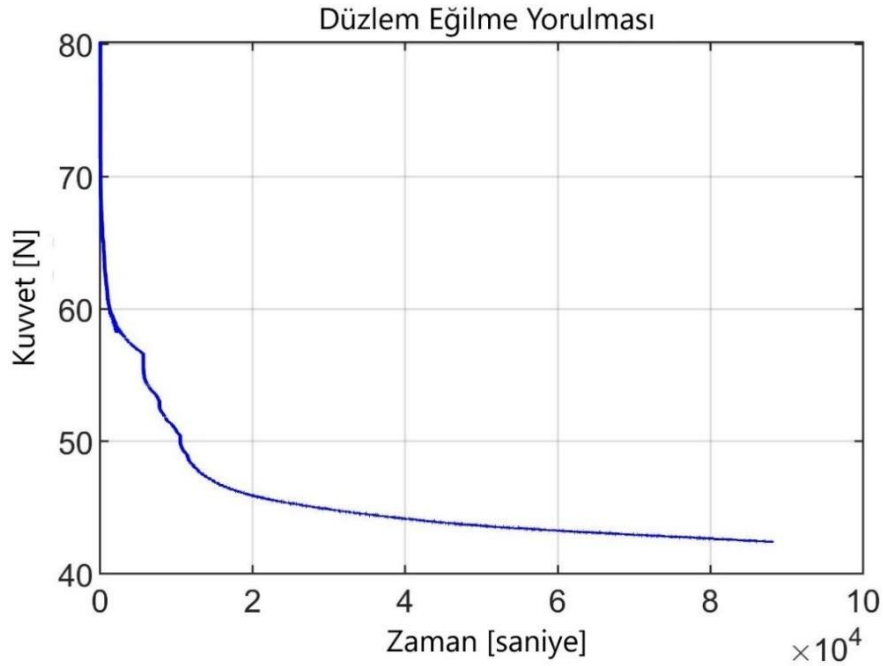
Şekil 4.6, MWCNT konsantrasyonu ile kopma gerinimi arasındaki ilişkiyi gösterir. % 0,5 MWCNT içerikli kompozitlerde, çatlak oluşumu ve ilerleme gecikmesi nedeniyle kopma gerinimi daha yüksektir [193]. Bu durum, matristeki MWCNT'lerin, çekme testi esnasında ortaya çıkan gerinim enerjisinin emilmesine katkıda bulunduğunu gösterir [194]. % 1 ve % 1,5 içerikli MWCNT'e sahip numunelerde gözlemlenen düşük kopma gerinimi, aglomerasyondan kaynaklanan zayıf arayüz bağlantısının bir göstergesidir. Çatlak kolayca oluşur ve hızlı yayılır [69]. Kompozitin daha kırılgan hale gelmesine neden olur. Fiber ve çevresindeki matris arasındaki boşluk, süreksiz gerinimlere yol açan yerel gerinim farklılıklarına neden olur [117].

Van der waals kuvvetlerinin azalmasıyla, nanotüplerin epoksi içinde daha iyi dağılması ve dolayısıyla epoksi matris arasında kovalent bağların oluşması, % 0,5 MWCNT içeriğine sahip numunede gözlenen dayanım ve gerinim artışının nedeni olabilir [195]. Fonksiyonelleştirme işlemi ile nanotüplerin yan zincirlerine kovalent olarak bağlanan karboksil grupları, reçine ve nanotüpler arasında yoğun bir arayüz bağı oluşturarak etkin bir yük transferi sağlamakta, böylece kompozitin dayanımını ve gerinimini artırmaktadır [196].

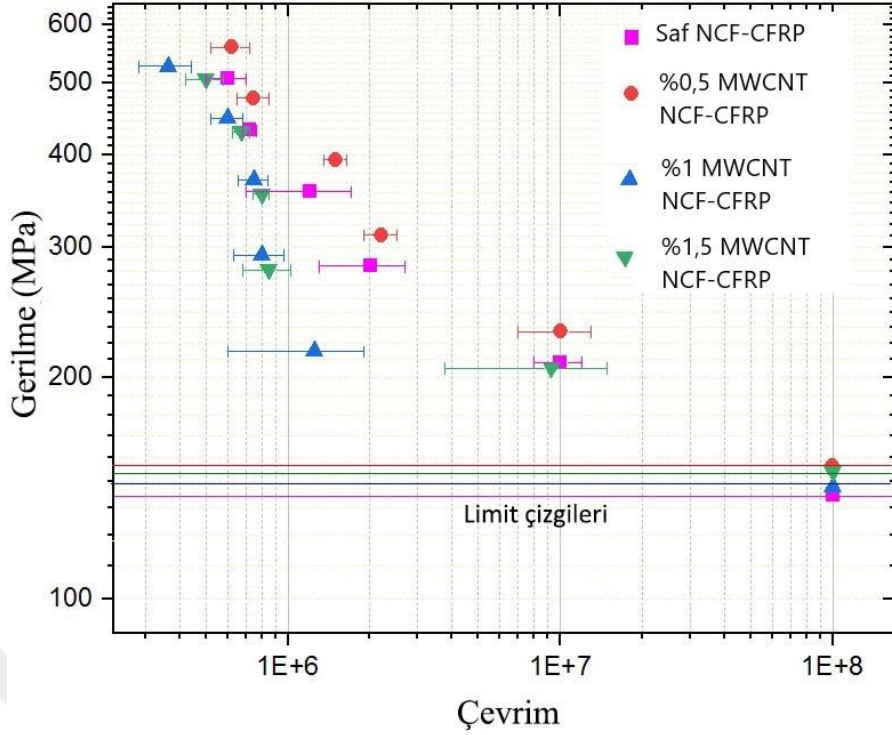
3.3. YORULMA TESTİ SONUÇLARI

Düzlem eğilme yorulma testleri, farklı yer değiştirme genliği gerinim değerlerinde (11, 12, 13, 14, 15 ve 16 mm) ve sabit bir frekans değerinde (10 Hz) gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak elde edilen yük (Newton)-zaman (s) değerleri, maksimum gerinim enerjisi hipotezine göre hesaplamalar yapılarak gerilme-döngü değerlerine dönüştürülmüştür. Düzlem eğilme yorulma testinden elde edilen kuvvet-zaman grafiklerinin bir örneği Şekil 4.7'de verilmiştir. Burada yorulma testi sonuçları Wöhler S-N (yorulma stresi/çevrim) grafikleri olarak ifade edilir.

Tüm örneklerin düzlem eğilme yorulma davranışı Şekil 4.8’de Wöhler S-N olarak gösterilmiştir. En yüksek yorulma ömrü değeri numune % 0,5 MWCNT NCF CFRP numunede elde edilmiştir, bunu saf NCF CFRP, % 1,5 MWCNT NCF CFRP ve % 1,0 MWCNT NCF CFRP takip etmiştir. S/N diyagramında gösterildiği gibi, tüm numunelerin yorulma ömrü, azalan yorulma yüküyle artmıştır. % 0,5 MWCNT NCF CFRP uygulanan tüm gerilme aralığı boyunca,, arızaya kadar olan döngü sayısında artış göstermiştir [197]. UV Vis test sonucunda da görüldüğü gibi % 0,5 MWCNT içeren çözelti en yüksek absorpsiyon seviyesine sahiptir, bu durum diğerlerinden daha fazla bireysel nanotüp içerdiğini gösterir. Bu nedenle deneysel bulgular daha iyi homojen dağılımın bir sonucudur. Ayrıca, MWCNT ve epoksi arasındaki güçlü arayüz bağları ile MWCNT’ün homojen dağılımı kompozitin dayanımını artırmıştır [77,189]. Sonuç olarak, bu morfolojik durum, epoksi reçinede çatlakların başlamasının ve yayılmasının engellendiğini, çatlama için gereken kırılma enerjisinin iyileştirildiğini, yorulma dayanımının arttığını göstermiştir [117]. Diğer bir ifadeyle % 0,5 MWCNT’e sahip numune için yorulma dayanımı değerlerindeki artışın nedeni, Van der waals kuvvetlerinin artmasıyla epoksi matris arasında kovalent bağların oluşması ve nanotüplerin epoksi içerisinde daha iyi dağılımıdır [117,198].



Şekil 4.7. Düzlem eğilme yorulma test sonucu örneği.



Şekil 4.8. Farklı % MCWNT içeren NCF CFRP kompozit numunelerin gerilme döngüsü (S/N) eğrileri.

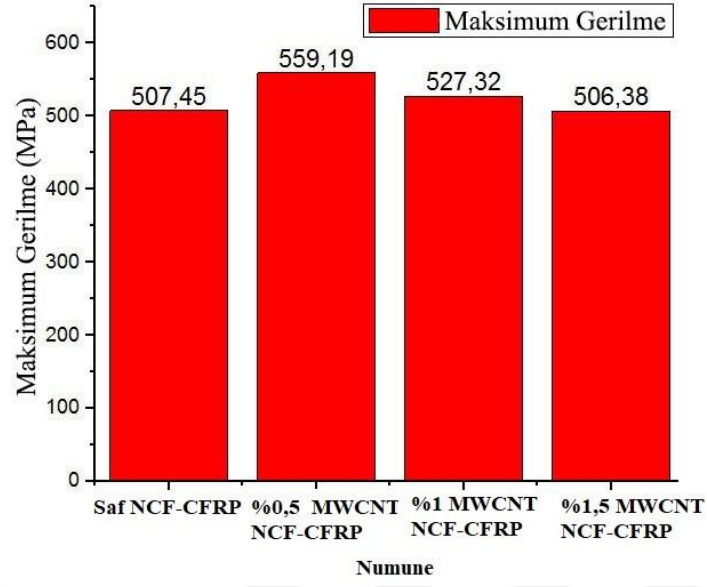
Ağırlıkça % 1,0 ve 15 MWCNT içeren kompozit numunelerin UV Vis spektroskopisi sonuçları bu numunelerde artan aglomerasyondan dolayı düşük değerler göstermiştir. Bu sonuçlar homojen dağılımın düşük olduğunu ve bireysel nanotüplerin sayısının azaldığına işaret etmektedir. Sonuç olarak, aglomerasyondaki artış malzemelerin yorulma dayanımını azaltmıştır.

Hatta bazı araştırmacılar, daha yüksek MWCNT miktarlarında dayanımdaki azalmayı, yerel MWCNT farkları nedeniyle oluşan aglomerasyon ve epoksi matrisine yük transferinin bozunması olarak yorumlamaktadır [194,199–201]. Ağırlıkça % 0,5 MWCNT içeren numunelerde, çatlak oluşumu ve ilerlemesindeki gecikme nedeniyle daha yüksek bir yorulma dayanımı değeri elde edilmiştir. Bir nanokompozit bir yüke maruz kaldığında mikro çatlaklar oluşturur ve yük hareket etmeye devam ettikçe mikro çatlaklar polimer matriste genişler. Yüksek mukavemetli bir CNT, çatlak yayılmasını önler. Mikro çatlaklar CNT'lerle karşılaştığında, çatlaklar sapar [202]. Bu durum, matriste bulunan MWCNT'lerin enerji absorpsiyonunun üretilmesine katkıda bulunduğunu gösterir [203,204].

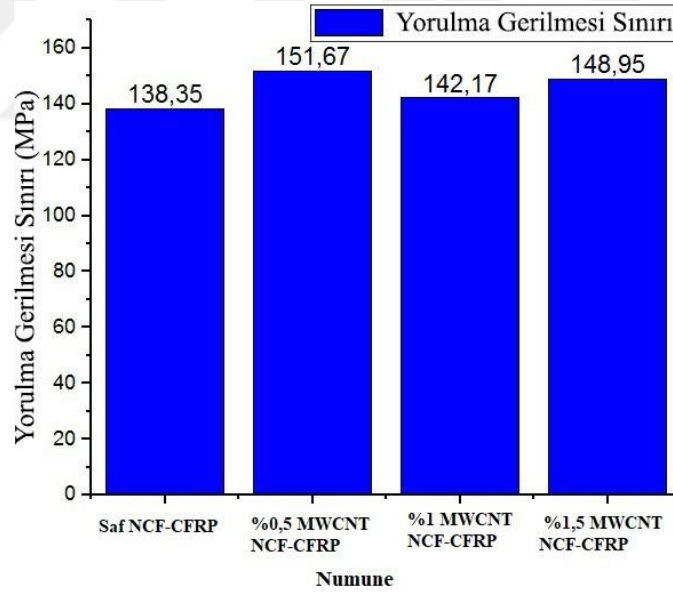
Ağırlıkça % 1,0 ve ağırlıkça %1,5 MWCNT içeren numunelerdeki daha düşük yorulma dayanımı değerleri, aglomerasyonun karbon fiber ve epoksi reçine matrisi arasındaki arayüz yapışma mukavemetini azalttığını ve böylece CFRP'nin yorulma çatlağı yayılmasına karşı direncini düşürdüğünü gösterir [205]. Yorulma yükleme koşulları altında, matristeki MWCNT'lerin aglomerasyonu, takviye ve matris malzemesi arasında zayıf arayüzey bağlanmasına neden olabilir ve matris bölgesinden MWCNT'lere yük transferinin büyüklüğü, kırılma üzerinde olumsuz etkiye sahip olabilir [117]. Reçine matrisindeki aglomerasyon, stres konsantrasyonuna yol açarak dayanımda azalmaya neden olur [201].

Şekil 4.8'deki verilerden elde edilen maksimum gerilmenin sonuçları Şekil 4.9'da gösterilmiştir [206]. En yüksekten en düşüğe MWCNT NCF CFRP numunelerin maksimum gerilme değerleri sırasıyla: % 0,5 MWCNT NCF CFRP, % 1,0 MWCNT NCF CFRP, Saf NCF CFRP ve % 1,5 MWCNT NCF CFRP. Şekil 4.10., Şekil 4.8'deki verilerden elde edilen yorulma sınırı gerilme sonuçlarını göstermektedir. Yorulma sınırı gerilme değerleri sırasıyla en yüksekten en düşüğe doğru; % 0,5 MWCNT NCF CFRP, % 1,5 MWCNT NCF CFRP, % 1,0 MWCNT NCF CFRP ve Saf NCF CFRP. Ancak, Şekil 4.9 (maksimum gerilme) ve Şekil 4.10 (yorulma sınırı gerilme değeri) sonuçları, Şekil 4.8 'dekilerden biraz farklıdır.

Kompozitlerin yorulma sınırı, yorulma testi sırasında üretilen basma gerilmesi ve oluşan ısıdan etkilenir [148]. Yüksek gerilme, daha az sayılarda daha büyük çatlakların oluşmasına yol açsa da, düşük gerilmeler çok sayıda daha küçük çatlaklar oluşturur [207]. Daha küçük çatlakların yayılması ve bağlanması için çok sayıda yorulma döngüsü gerekirken, büyük çatlakların büyük hasara ve nihai arızaya neden olması için daha az döngü yeterlidir [117].



Şekil 4.9 NCF CFRP kompozit numunelerin maks. gerilme değerleri.

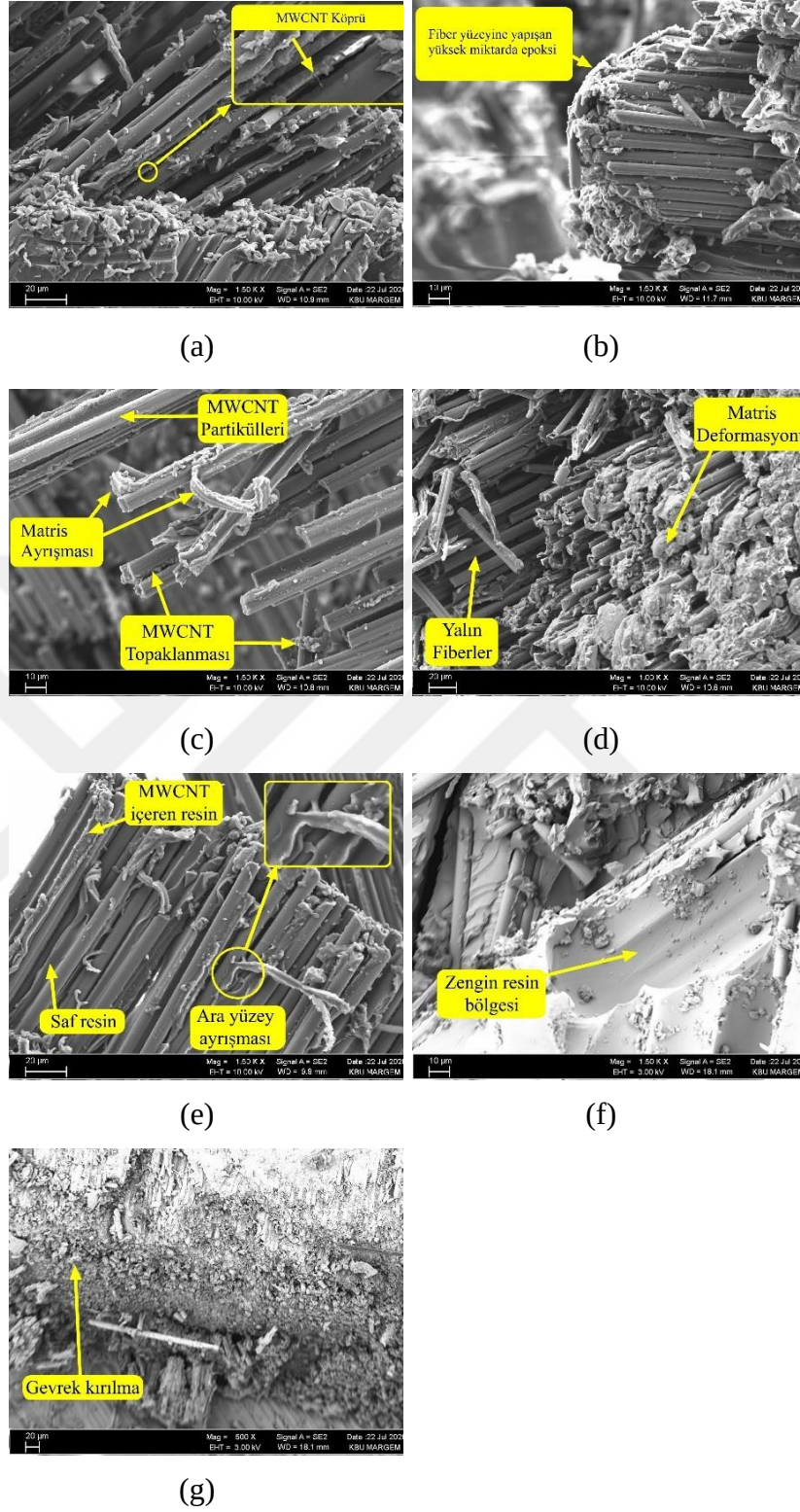


Şekil 4.10. NCF CFRP kompozit numunelerin yorulma sınır gerilme değerleri.

3.4. ÇEKME KIRILMASI YÜZEY MORFOLOJİSİ SONUÇLARI

Şekil 4.11, MWCNT NCF CFRP kompozit numunelerinin kırılma yüzeyinin FESEM görüntülerini göstermektedir. FESEM görüntülerinden matristeki MWCNT'lerin fibere bağlı olduğu görülebilir. MWCNT'ler matris ve fiberler arasında bir köprü görevi görür. Bu özellik çatlak büyümesini kısıtlar ve dayanımı artırır (Şekil 4.11.a) . Benzer çalışma literatürde bildirilmiştir [171,208,209]. % 0,5 MWCNT içeren numunelerde epoksinin fiber yüzeyine yapışma miktarı artarken (Şekil 4.11.b), % 1 ve % 1,5 MWCNT içeren numunelerde ise epoksi yapışmasının olmadığı fiber yüzeyleri görülmüştür (Şekil 4.11.c,d,e). Bu durum, fiber -matris arayüzey yapışmasının daha zayıf olduğunun bir kanıtıdır. Ayrıca, MWCNT aglomeraları, fiberlerin matrise zayıf bir şekilde bağlanmasına sebep olarak, fiberlerin dışarı çekilmesine vedelaminasyonun meydana gelmesine yol açmıştır. Bu durum Şekil 4.11.c ve e'de görülebilir. Aglomeralar stres artırıcı olarak hareket eder bu yüzden çatlak oluşumu veyayılmasını hızlandırarak malzemenin dayanımını azaltır [69].

Saf NCF CFRP Kompozitinin (% 0 MWCNT) kırılma yüzeyi gevrekken (Şekil 4.11.g-f), % 0,5 MWCNT içeren numunenin kırılma yüzeyi, iyi arayüzey yapışması nedeniyle sünektir (Şekil 4.11.b). İyi arayüzey yapışması, matristen nano dolguya verimli yük transferine yardımcı olur. Ağırılıkça % 1,5 MWCNT içeren kompozit Şekil 4.11.e'de, kırılma yüzeyinde saf reçinenin yanı sıra MWCNT'li reçine alanlarının olduğunu göstermektedir. Bu, MWCNT dağılımının homojenliğinin yetersiz olduğunu gösterir. Şekil 4.11.e, fiber ve matris arasındaki arayüzey bağı göstermektedir.



Şekil 4.11. NCF CFRP kompozit numunelerinin çekme testi sonrası kırılma yüzeyinin FESEM görüntüleri a-b) %0,5 MWCNT c-d) %1 MWCNT e) %1,5 MWCNT f) %0 MWCNT.

3.5. YORULMA KIRILMASI YÜZEY MORFOLOJİSİ SONUÇLARI

Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 MWCNT içerikli ve saf NCF CFRP kompozit numunelerin yorulma kırılma yüzeyinin makro ve mikro yapısının FESEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 kırık yüzeylerin makro yapısını göstermektedir. Gerinim genliği arttıkça şiddeti artmış; bununla birlikte, test numunesi % 0,5 MWCNT NCF CFRP gerinim genliğine nispeten iyi direnç göstermiş ve küçük bir kırılma yüzeyi sergilemiştir [201].

Araştırmacılar [210] tarafından bildirildiği gibi, kompozit malzemelerde elyaf kırılması, fiber-matris arayüz hatası, delaminasyon ve matriste mevcut çatlaklar dahil olmak üzere farklı biçimlerde yorulma hatası ve ayrıca eğilme yorulması hatası meydana gelebilir. Düzlem eğilme yorulmasıyla kompozit malzemelerde kırılma hatasının ana nedenleri şu şekilde belirtilmiştir:

Matriste meydana gelen kusur (tipik yorulma)

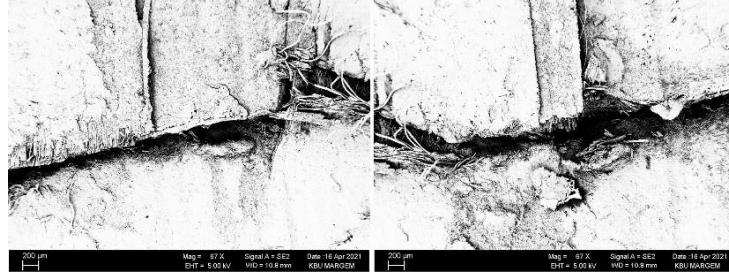
Fiber matris ayrılması (fiber ayrılması)

Tabakaların ayrılması (delaminasyon)

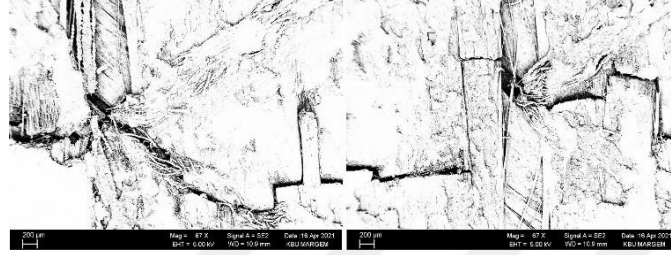
Şekil 4.14.b. (% 1,5 MWCNT NCF CFRP), MWCNT ile modifiye edilmiş matrisin yapısını gösterir. Şekil 4.14.a. (% 0,5 MWCNT NCF CFRP) ve Şekil 4.14.e. (%1 MWCNT NCF CFRP), numunelerdeki mikro çatlakların belirli doygunluğa ulaştıktan sonra fiber ve matris arasındaki arayüzey ayrılmasıyla oluşan yorulma hasarını göstermektedir. Arayüzey ayrılması, devam eden yorulma yükleri nedeniyle arayüz boyunca artmış ve genişlemiştir. Gerilme seviyesi arttıkça ve numunedeki hasar boyunca yanal çatlaklar ortaya çıktıkça fiber kırılma olasılığı daha şiddetli hale gelmiştir. (Şekil 4.14.c - % 0,5 MWCNT NCF CFRP) [211]. Şekil 4.14.d. (saf NCF CFRP) fiber matris arayüzeyini göstermektedir.

Şekil 4.15.a. (%1,5 MWCNT NCF CFRP), kompozitlerin gevrek kırılma özelliklerini göstermektedir. Aglomerasyon, mikro çatlakların başlamasına ve kompozitte çatlak yayılmasının yoğunlaşmasına yol açmıştır. Ayrıca, kompozitte ani bir gevrek çatlama, malzemenin mekanik performansının ve elastikiyetinin önemli ölçüde bozunmasına yol açan uniform olmayan stres dağılımını üretmiştir [212]. Şekil 4.15.b'de (% 0,5 MWCNT NCF CFRP), fiber ve matris arasındaki arayüz iyi bir şekilde bağlanmıştır, böylece uygulanan stres, matris ve fiberler dahil olmak üzere kompozit boyunca daha iyi aktarılmıştır. Bu durum, daha iyi bir fiber-matris arayüz bağının, yorulma özelliklerini iyileştirdiğinin kanıtıdır (Şekil 4.15.c % 0,5 MWCNT NCF CFRP).

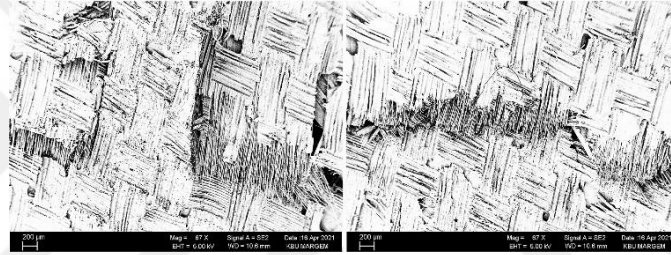
Ağırlıkça % 0,5 MWCNT içeren fiberin yüzeyine yapışan epoksi miktarı daha fazlayken (Şekil 4.15.g. - % 0,5 MWCNT NCF CFRP), ağırlıkça % 1,0 ve 1,5 MWCNT fiber kompozitlerin (Şekil 4.15.f. - % 1 MWCNT NCF CFRP) yüzeyleri pürüzsüzdür. Şekil 4.15.d. (% 1 MWCNT NCF CFRP) ve Şekil 4.15.e. (% 1,5 MWCNT NCF CFRP) sırasıyla matris kalıntısı olmayan fiber yüzeyini ve matrisce zengin alanı gösterir. MWCNT'lerin aglomerasyonu, fiber ve matris arasındaki zayıf arayüz bağının oluşmasına sebep olmuş, bu da fiber geri çekilmesine ve delaminasyona neden olmuştur (Şekil 4.15.h. -% 1,5 MWCNT NCF CFRP).



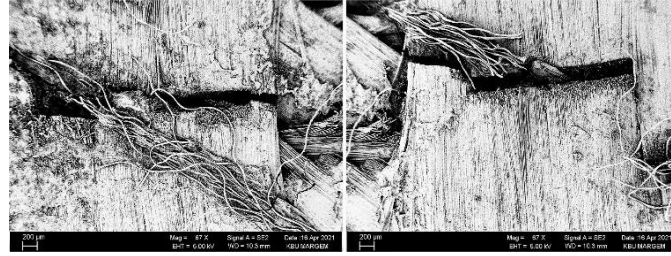
(a)



(b)

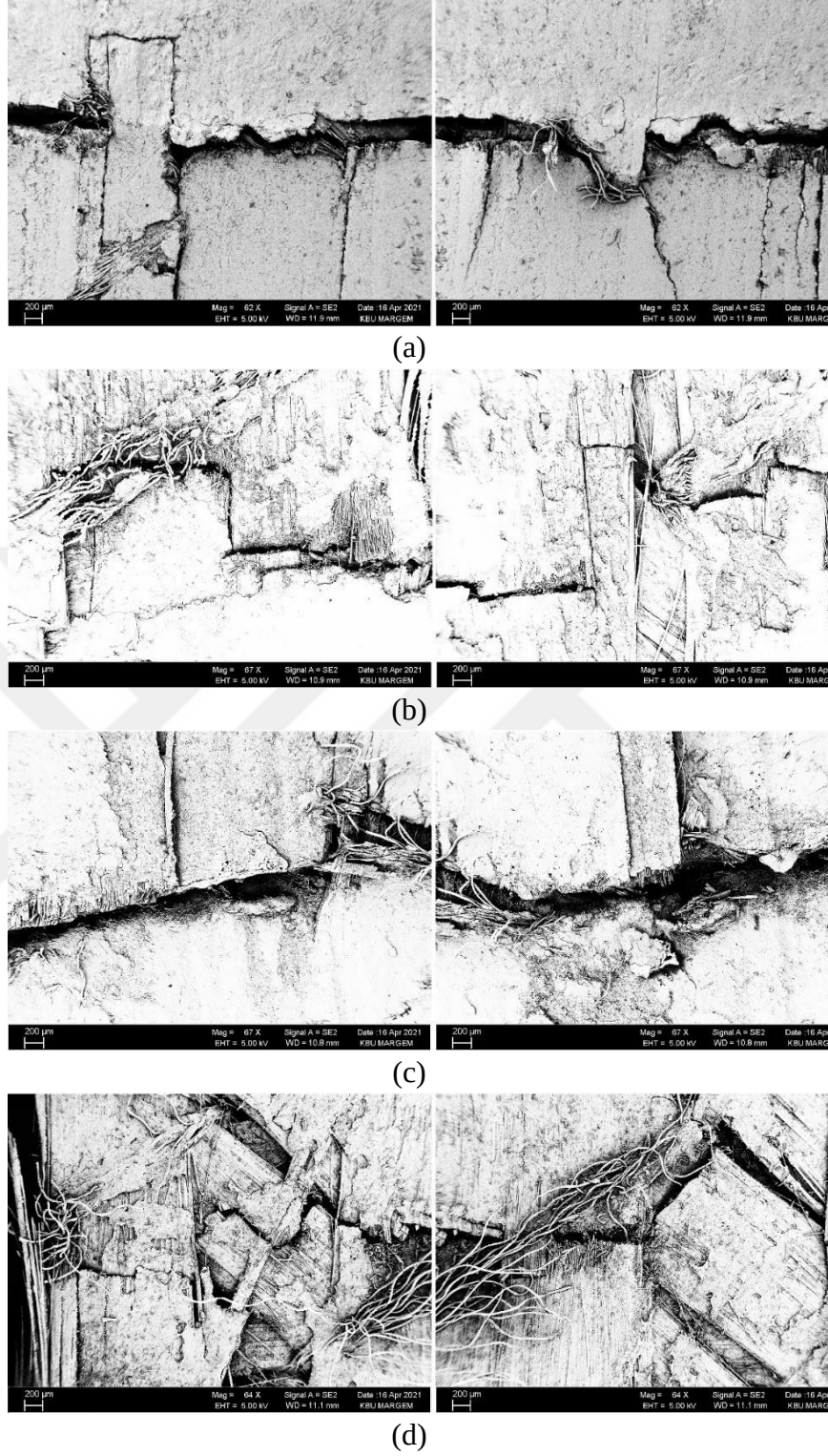


(c)

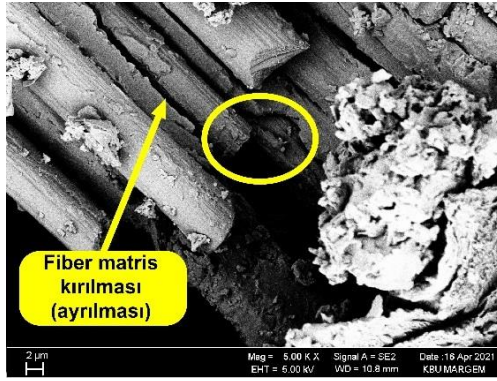


(d)

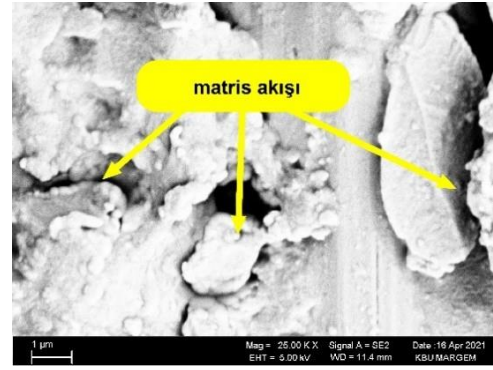
Şekil 4.12. Minimum gerilme genliğinde yorulma testi numunelerinin SEM makro yapı görüntüleri a) Saf NCF CFRP ,b) % 0,5 MWCNT NCF CFRP , c) %1 MWCNT NCF CFRP , d) %1,5 MWCNT NCF CFRP



Şekil 4.13. Maksimum gerilme genliğinde yorulma testi numunelerinin SEM makro yapı görüntüleri a) Saf NCF CFRP , b) %0,5 MWCNT NCF CFRP, c) %1 MWCNT NCF CFRP, d) %1,5 MWCNT NCF CFRP.



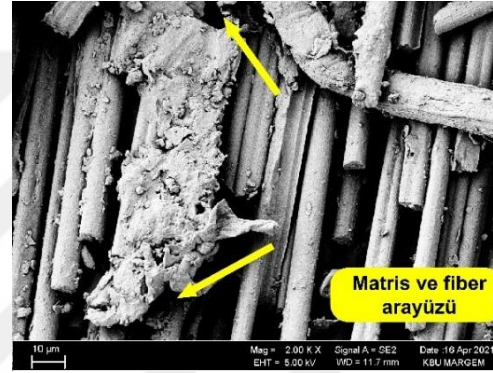
(a)



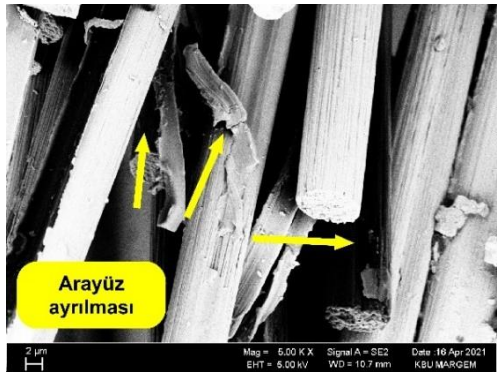
(b)



(c)



(d)



(e)

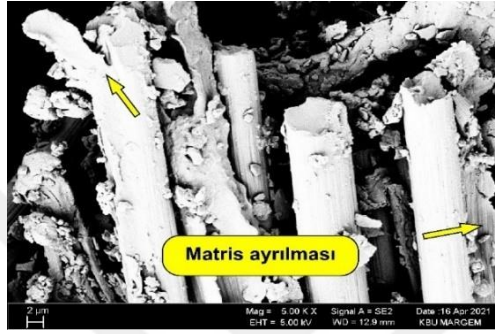
Şekil 4.14. Minimum gerilim genliğinde yorulma testi numunelerinin SEM mikro yapı görüntüleri a) % 0,5 MWCNT b-c) %1,5 MWCNT d) %0 MWCNT e) %1 MWCNT.



(a)



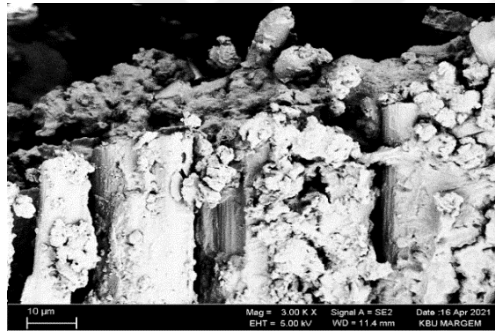
(b)



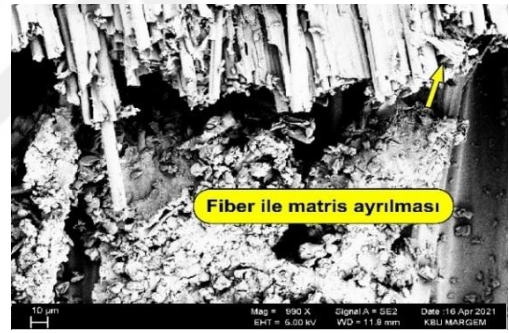
(c)



(d)



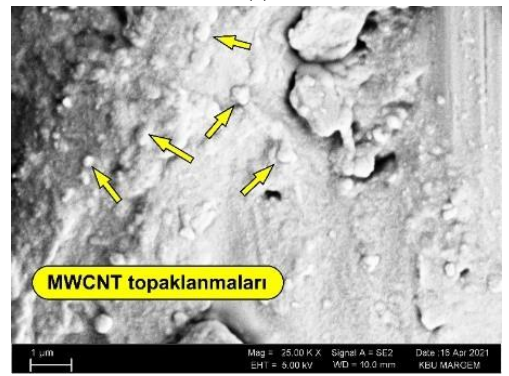
(e)



(f)



(g)



(h)

Şekil 4.15. Maksimum gerilim genliğinde yorulma testi numunelerinin SEM mikro yapı görüntüleri a-e) % 1,5 MWCNT b-c) % 0,5 MWCNT d) % 1 MWCNT f) % 1 MWCNT g) 0,5 MWCNT h) % 1,5 MWCNT

3.6. DENEY TASARIMI VE GRİ İLİŞKİ ANALİZİ SONUÇLARI

Deney tasarımında tam faktöriyel yöntem kullanılmıştır. Hem saf epoksili NCF CFRP hem MWCNT içerikli NCF CFRP üzerinde delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Delme deneyi boyunca 6 mm çapında iki kanallı ALTIN kaplamalı karbür matkap ve DLC kaplamalı HSS matkap kullanılmıştır.

3.6.1. Deney Ölçme Sonuçları

Deney tasarımına göre yapılan delme işlemi yüzey pürüzlülük değeri (R_a , μm), itme kuvveti (N) değeri, giriş delaminasyonu (F_{dg}), çıkış delaminasyonu ($F_{dç}$), delik giriş çapak alanı (mm^2), delik çıkış çapak alanı (mm^2) ölçme sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Ful faktöriyel deney tasarımı ve deney sonuçları.

Deney No	MWCNT (%)	Devir Sayısı (dev./dak.)	İlerleme (mm/dev)	Matkap çeşidi	R_a (μm)	İtme Kuvveti (N)	Delaminasyon Giriş(F_{dg})	Delaminasyon Çıkış($F_{dç}$)	Delik Giriş Çapak alanı (mm^2)	Delik Çıkış çapak alanı (mm^2)
1	0	500	0,05	ALTIN	2,57	35,1	1,2	1,3	0,3200	9,7750
2	0	500	0,05	DLC	7,99	5,3	1,2	1,5	0,4000	16,5234
3	0	500	0,10	ALTIN	6,27	77,12	1,08	1,14	1,2010	11,4950
4	0	500	0,10	DLC	8,40	5,46	1,2	1,35	0,8500	7,0430
5	0	500	0,15	ALTIN	2,30	92,2	1,3	1,52	1,2000	10,4150
6	0	500	0,15	DLC	6,88	9,97	1,4	1,4	1,1000	9,9610
7	0	2000	0,05	ALTIN	4,93	69,53	1,2	1,4	0,0200	6,5960
8	0	2000	0,05	DLC	6,62	9,627	1,2	1,3	0,4000	10,5790
9	0	2000	0,10	ALTIN	3,86	88,2	1,05	1,23	0,1000	6,2220

Çizelge 4.1. (devam ediyor)

Deney No	MWCNT (%)	Devir Sayısı (dev./dak.)	İlerleme (mm/dev)	Matkap çeşidi	Ra (µm)	İtme Kuvveti (N)	Delaminasyon Giriş(F _{d_g})	Delaminasyon Çıkış(F _{d_e})	Delik Giriş Çapak alanı (mm ²)	Delik Çıkış çapak alanı (mm ²)
10	0	2000	0,10	DLC	9,64	15,92	1,3	1,3	0,2500	10,2790
11	0	2000	0,15	ALTIN	2,30	85,72	1,3	1,3	0,7000	4,7180
12	0	2000	0,15	DLC	8,73	12,29	1,25	1,66	0,4100	9,8070
13	0	3500	0,05	ALTIN	4,10	64,98	1,17	1,2	0,1000	5,1980
14	0	3500	0,05	DLC	5,61	16,12	1,15	1,5	0,1100	7,3050
15	0	3500	0,10	ALTIN	5,57	85,97	1,21	1,2	0,6200	0,4680
16	0	3500	0,10	DLC	5,02	18,3	1,19	1,5	0,6600	8,9970
17	0	3500	0,15	ALTIN	4,18	69,87	1,2	1,4	0,3300	2,5240
18	0	3500	0,15	DLC	13,24	33,4	1,2	1,53	0,6900	3,3070
19	0,5	500	0,05	ALTIN	1,41	14,89	1,04	1,3	0,2000	18,8720
20	0,5	500	0,05	DLC	5,50	4,95	1,25	1,2	0,0620	3,5000
21	0,5	500	0,10	ALTIN	1,98	59,36	1,04	1,25	0,1500	9,0790
22	0,5	500	0,10	DLC	2,77	5,466	1,18	1,3	0,4000	3,7850
23	0,5	500	0,15	ALTIN	1,70	72,4	1,09	1,30	0,5300	17,4820
24	0,5	500	0,15	DLC	4,19	10,5	1,2	1,2	3,1020	1,5940
25	0,5	2000	0,05	ALTIN	2,25	73,65	1,02	1,32	0,0000	4,6750
26	0,5	2000	0,05	DLC	11,20	9,824	1,2	1,4	0,4100	7,5710
27	0,5	2000	0,10	ALTIN	4,10	83,08	1,02	1,41	0,1000	10,0170
28	0,5	2000	0,10	DLC	9,40	9,856	1,12	1,1	0,1000	3,3250
29	0,5	2000	0,15	ALTIN	2,08	79,41	1,04	1,42	0,0000	10,7870
30	0,5	2000	0,15	DLC	3,17	12,29	1,11	1,13	0,3000	3,9320
31	0,5	3500	0,05	ALTIN	1,72	70,1	1,05	1,3	0,3000	13,2640
32	0,5	3500	0,05	DLC	8,61	24,6	1	1,25	0,8800	5,7900

Çizelge 4.1. (devam ediyor)

Deney No	MWCNT (%)	Devir Sayısı (dev./dak.)	İlerleme (mm/dev)	Matkap çeşidi	Ra (µm)	İtme Kuvveti (N)	Delaminasyon Giriş(F _{d_g})	Delaminasyon Çıkış(F _{d_e})	Delik Giriş Çapak alanı (mm ²)	Delik Çıkış çapak alanı (mm ²)
33	0,5	3500	0,10	ALTIN	2,15	75,24	1	1	0,0000	0,0000
34	0,5	3500	0,10	DLC	8,02	18,31	1,1	1,1	0,1100	3,6810
35	0,5	3500	0,15	ALTIN	2,84	80,7	1,2	1,25	1,5000	4,0583
36	0,5	3500	0,15	DLC	4,10	25,2	1,1	1,13	0,2000	4,1790
37	1	500	0,05	ALTIN	5,57	24,97	1,08	1,25	0,8220	5,4100
38	1	500	0,05	DLC	10,79	13,3	1,2	1,4	1,9850	8,2840
39	1	500	0,10	ALTIN	3,47	67,55	1,06	1,22	0,0780	7,1650
40	1	500	0,10	DLC	9,15	5,333	1,18	1,4	1,8060	5,8260
41	1	500	0,15	ALTIN	3,87	78,4	1,1	1,3	1,1540	13,2910
42	1	500	0,15	DLC	10,72	11,1	1,2	1,4	1,1960	8,2920
43	1	2000	0,05	ALTIN	3,33	67,86	1,1	1,21	2,0540	8,2100
44	1	2000	0,05	DLC	14,61	10,13	1,45	1,4	2,6180	17,2000
45	1	2000	0,10	ALTIN	4,25	67,49	1,18	1,23	0,4770	14,2940
46	1	2000	0,10	DLC	9,53	21,96	1,4	1,42	2,0700	8,3420
47	1	2000	0,15	ALTIN	5,21	78,68	1,14	1,3	1,2070	7,1470
48	1	2000	0,15	DLC	13,81	10,34	1,2	1,3	2,0110	13,8510
49	1	3500	0,05	ALTIN	5,49	66,72	1	1,22	0,0000	1,4790
50	1	3500	0,05	DLC	12,65	17,58	1,21	1,4	2,7160	9,1220
51	1	3500	0,10	ALTIN	3,59	75,21	1,16	1,4	0,0000	0,3750
52	1	3500	0,10	DLC	12,52	13,34	1,26	1,4	4,8450	15,1680
53	1	3500	0,15	ALTIN	4,57	76,7	1	1,21	0,0940	1,5810
54	1	3500	0,15	DLC	12,30	45,23	1,21	1,2	1,5320	2,7430
55	1,5	500	0,05	ALTIN	7,87	52,14	1,4	1,3	2,0800	10,1550
56	1,5	500	0,05	DLC	6,77	9,31	1,3	1,45	2,3870	10,8450

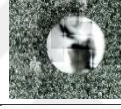
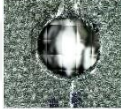
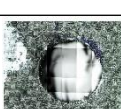
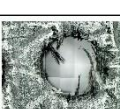
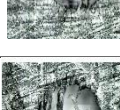
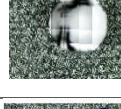
Çizelge 4.1. (devam ediyor)

Deney No	MWCNT (%)	Devir Sayısı (dev./dak.)	İlerleme (mm/dev)	Matakap çeşidi	Ra (µm)	İtme Kuvveti (N)	Delaminasyon Giriş(F _{d_g})	Delaminasyon Çıkış(F _{d_c})	Delik Giriş Çapak alanı (mm ²)	Delik Çıkış çapak alanı (mm ²)
57	1,5	500	0,10	ALTIN	3,71	68,44	1,4	1,15	0,9870	1,3170
58	1,5	500	0,10	DLC	10,14	8,295	1,4	1,4	7,5380	10,6370
59	1,5	500	0,15	ALTIN	3,77	82,21	1,3	1,2	5,8030	8,7690
60	1,5	500	0,15	DLC	4,40	9,34	1,3	1,3	6,8800	7,7020
61	1,5	2000	0,05	ALTIN	4,98	58,59	1,4	1,2	2,1600	7,2890
62	1,5	2000	0,05	DLC	7,91	9,439	1,4	1,43	5,6430	16,3230
63	1,5	2000	0,10	ALTIN	5,36	71,96	1,4	1,3	7,9470	21,9430
64	1,5	2000	0,10	DLC	10,39	12,58	1,3	1,4	6,4500	12,3920
65	1,5	2000	0,15	ALTIN	7,95	83,48	1,41	1,2	5,6640	12,8720
66	1,5	2000	0,15	DLC	9,27	13,05	1,4	1,4	4,1890	13,2290
67	1,5	3500	0,05	ALTIN	4,99	63	1,4	1,08	1,6110	0,1190
68	1,5	3500	0,05	DLC	4,78	23,17	1,42	1,25	12,7820	9,1750
69	1,5	3500	0,10	ALTIN	7,99	66,51	1,42	1,18	4,4480	2,2900
70	1,5	3500	0,10	DLC	4,12	20,26	1,4	1,3	6,1130	12,2450
71	1,5	3500	0,15	ALTIN	3,09	77,18	1,3	1,14	5,0210	5,6820
72	1,5	3500	0,15	DLC	5,93	27,57	1,4	1,25	4,9830	10,7350

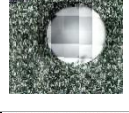
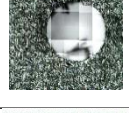
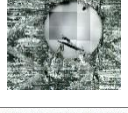
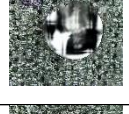
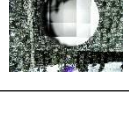
3.6.2. Delaminasyon görüntüleri

Yapılan delme işlemi sonrası deney sonuçlarına göre elde edilen delik görüntüleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

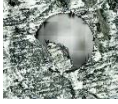
Çizelge 4.2. Giriş delaminasyonu ve çıkış delaminasyonu görüntüleri.

Deney No	MWCNT	Devir Sayısı	İletme	Matkap çeşidi	Giriş delaminasyon görüntüsü	Çıkış delaminasyon görüntüsü
1	0	500	0,05	ALTIN		
2	0	500	0,05	DLC		
3	0	500	0,10	ALTIN		
4	0	500	0,10	DLC		
5	0	500	0,15	ALTIN		
6	0	500	0,15	DLC		
7	0	2000	0,05	ALTIN		
8	0	2000	0,05	DLC		
9	0	2000	0,10	ALTIN		

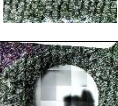
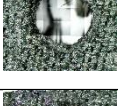
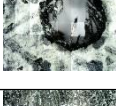
Çizelge 4.2. (devam ediyor)

Deney No	MWCNT	Devir Sayısı	İlerleme	Matkap çeşidi	Giriş delaminasyon görüntüsü	Çıkış delaminasyon görüntüsü
10	0	2000	0,10	DLC		
11	0	2000	0,15	ALTIN		
12	0	2000	0,15	DLC		
13	0	3500	0,05	ALTIN		
14	0	3500	0,05	DLC		
15	0	3500	0,10	ALTIN		
16	0	3500	0,10	DLC		
17	0	3500	0,15	ALTIN		
18	0	3500	0,15	DLC		
19	0,5	500	0,05	ALTIN		
20	0,5	500	0,05	DLC		

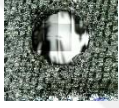
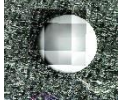
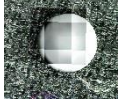
Çizelge 4.2. (devam ediyor)

Deney No	MWCNT	Devir Sayısı	İlerleme	Matkap çeşidi	Giriş delaminasyon görüntüsü	Çıkış delaminasyon görüntüsü
21	0,5	500	0,10	ALTIN		
22	0,5	500	0,10	DLC		
23	0,5	500	0,15	ALTIN		
24	0,5	500	0,15	DLC		
25	0,5	2000	0,05	ALTIN		
26	0,5	2000	0,05	DLC		
27	0,5	2000	0,10	ALTIN		
28	0,5	2000	0,10	DLC		
29	0,5	2000	0,15	ALTIN		
30	0,5	2000	0,15	DLC		
31	0,5	3500	0,05	ALTIN		
32	0,5	3500	0,05	DLC		

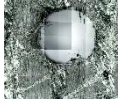
Çizelge 4.2. (devam ediyor)

Deney No	MWCNT	Devir Sayısı	İlerleme	Matkap çeşidi	Giriş delaminasyon görüntüsü	Çıkış delaminasyon görüntüsü
33	0,5	3500	0,10	ALTIN		
34	0,5	3500	0,10	DLC		
35	0,5	3500	0,15	ALTIN		
36	0,5	3500	0,15	DLC		
37	1	500	0,05	ALTIN		
38	1	500	0,05	DLC		
39	1	500	0,10	ALTIN		
40	1	500	0,10	DLC		
41	1	500	0,15	ALTIN		
42	1	500	0,15	DLC		
43	1	2000	0,05	ALTIN		

Çizelge 4.2. (devam ediyor)

Deney No	MWCNT	Devir Sayısı	İletme	Matkap çeşidi	Giriş delaminasyon görüntüsü	Çıkış delaminasyon görüntüsü
44	1	2000	0,05	DLC		
45	1	2000	0,10	ALTIN		
46	1	2000	0,10	DLC		
47	1	2000	0,15	ALTIN		
48	1	2000	0,15	DLC		
49	1	3500	0,05	ALTIN		
50	1	3500	0,05	DLC		
51	1	3500	0,10	ALTIN		
52	1	3500	0,10	DLC		
53	1	3500	0,15	ALTIN		
54	1	3500	0,15	DLC		
55	1.5	500	0,05	ALTIN		

Çizelge 4.2. (devam ediyor)

Deney No	MWCNT	Devir Sayısı	İletme	Matkap çeşidi	Giriş delaminasyon görüntüsü	Çıkış delaminasyon görüntüsü
56	1,5	500	0,05	DLC		
57	1,5	500	0,10	ALTIN		
58	1,5	500	0,10	DLC		
59	1,5	500	0,15	ALTIN		
60	1,5	500	0,15	DLC		
61	1,5	2000	0,05	ALTIN		
62	1,5	2000	0,05	DLC		
63	1,5	2000	0,10	ALTIN		
64	1,5	2000	0,10	DLC		
65	1,5	2000	0,15	ALTIN		
66	1,5	2000	0,15	DLC		
67	1,5	3500	0,05	ALTIN		

Çizelge 4.2. (devam ediyor)

Deney No	MWCNT	Devir Sayısı	İtme	Matkap çeşidi	Giriş delaminasyon görüntüsü	Çıkış delaminasyon görüntüsü
68	1,5	3500	0,05	DLC		
69	1,5	3500	0,10	ALTIN		
70	1,5	3500	0,10	DLC		
71	1,5	3500	0,15	ALTIN		
72	1,5	3500	0,15	DLC		

3.6.3. Tam Faktöriyel Tabanlı Gri ilişki Analiz Yöntemi Kullanılarak Sonuçların Analizi

Optimum delik kalitesini elde etmek için delik giriş delaminasyonunun, delik çıkış delaminasyonunun, delik giriş çapak alanının ve delik çıkış çapak alanının en az olmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün ve itme kuvvetinin de düşük olması istenir bu sebeple gri ilişki analiz yöntemi kullanılmıştır. Çizelge 4.3 deney sonuçları için normalizasyon ve uzaklık matrisini, Çizelge 4.4 gri ilişki katsayısı, gri ilişki derecesi ve sıralama sonuçlarını göstermektedir.

Gri ilişkisel verilerinin ön işleme sürecinde, yüzey pürüzlülüğü, itme kuvveti, giriş delaminasyon faktörü, çıkış delaminasyon faktörü, giriş çapak alanı ve çıkış çapak alanı "düşük daha iyi" metodolojisi kullanılarak normalleştirilmiştir. Bu çalışmada katsayı değeri 0,5 kullanılmıştır.

Çizelge 4.3. Normalizasyon ve uzaklık matrisi değerleri.

Deney No	Normalizasyon						Uzaklık Matrisi					
	Ra (µm)	İtme Kuvveti (N)	Delaminasyon Giriş	Delaminasyon Çıkış	Delik Giriş Çapak alanı (mm ²)	Delik Çıkış çapak alanı (mm ²)	Ra (µm)	İtme Kuvveti (N)	Delaminasyon Giriş	Delaminasyon Çıkış	Delik Giriş Çapak alanı (mm ²)	Delik Çıkış çapak alanı (mm ²)
1	0,91	0,65	0,56	0,55	0,98	0,55	0,09	0,35	0,44	0,45	0,03	0,45
2	0,5	1	0,56	0,24	0,97	0,25	0,5	0	0,44	0,76	0,03	0,75
3	0,63	0,17	0,82	0,79	0,91	0,48	0,37	0,83	0,18	0,21	0,09	0,52
4	0,47	0,99	0,56	0,47	0,93	0,68	0,53	0,01	0,44	0,53	0,07	0,32
5	0,93	0	0,33	0,21	0,91	0,53	0,07	1	0,67	0,79	0,09	0,47
6	0,59	0,94	0,11	0,39	0,91	0,55	0,41	0,06	0,89	0,61	0,09	0,45
7	0,73	0,26	0,56	0,39	1	0,7	0,27	0,74	0,44	0,61	0	0,3
8	0,61	0,95	0,56	0,55	0,97	0,52	0,39	0,05	0,44	0,45	0,03	0,48
9	0,81	0,05	0,89	0,65	0,99	0,72	0,19	0,95	0,11	0,35	0,01	0,28
10	0,38	0,87	0,33	0,55	0,98	0,53	0,62	0,13	0,67	0,45	0,02	0,47
11	0,93	0,07	0,33	0,55	0,95	0,79	0,07	0,93	0,67	0,45	0,05	0,22
12	0,45	0,92	0,44	0	0,97	0,55	0,55	0,08	0,56	1	0,03	0,45
13	0,8	0,31	0,62	0,7	0,99	0,76	0,2	0,69	0,38	0,3	0,01	0,24
14	0,68	0,87	0,67	0,24	0,99	0,67	0,32	0,13	0,33	0,76	0,01	0,33
15	0,69	0,07	0,53	0,7	0,95	0,98	0,32	0,93	0,47	0,3	0,05	0,02
16	0,73	0,85	0,58	0,24	0,95	0,59	0,27	0,15	0,42	0,76	0,05	0,41
17	0,79	0,26	0,56	0,39	0,97	0,89	0,21	0,74	0,44	0,61	0,03	0,12
18	0,1	0,67	0,56	0,2	0,95	0,85	0,9	0,33	0,44	0,8	0,05	0,15
19	1	0,89	0,91	0,55	0,98	0,14	0	0,11	0,09	0,45	0,02	0,86
20	0,69	1	0,44	0,7	1	0,84	0,31	0	0,56	0,3	0	0,16
21	0,96	0,38	0,91	0,62	0,99	0,59	0,04	0,62	0,09	0,38	0,01	0,41
22	0,9	0,99	0,6	0,55	0,97	0,83	0,1	0,01	0,4	0,45	0,03	0,17
23	0,98	0,23	0,8	0,55	0,96	0,2	0,02	0,77	0,2	0,45	0,04	0,8
24	0,79	0,94	0,56	0,7	0,76	0,93	0,21	0,06	0,44	0,3	0,24	0,07
25	0,94	0,21	0,96	0,52	1	0,79	0,06	0,79	0,04	0,48	0	0,21
26	0,26	0,94	0,56	0,39	0,97	0,66	0,74	0,06	0,44	0,61	0,03	0,35
27	0,8	0,1	0,96	0,38	0,99	0,54	0,2	0,9	0,04	0,62	0,01	0,46
28	0,39	0,94	0,73	0,85	0,99	0,85	0,61	0,06	0,27	0,15	0,01	0,15

Çizelge 4.3. (devam ediyor)

Deney No	Normalizasyon						Uzaklık Matrisi					
	Ra (µm)	İtme Kuvveti (N)	Delaminasyon Giriş	Delaminasyon Çıkış	Delik Giriş Çapak alanı (mm ²)	Delik Çıkış çapak alanı (mm ²)	Ra (µm)	İtme Kuvveti (N)	Delaminasyon Giriş	Delaminasyon Çıkış	Delik Giriş Çapak alanı (mm ²)	Delik Çıkış çapak alanı (mm ²)
29	0,95	0,15	0,91	0,36	1	0,51	0,05	0,85	0,09	0,64	0	0,49
30	0,87	0,92	0,76	0,8	0,98	0,82	0,13	0,08	0,24	0,2	0,02	0,18
31	0,98	0,25	0,89	0,55	0,98	0,4	0,02	0,75	0,11	0,45	0,02	0,6
32	0,45	0,77	1	0,62	0,93	0,74	0,55	0,23	0	0,38	0,07	0,26
33	0,94	0,19	1	1	1	1	0,06	0,81	0	0	0	0
34	0,5	0,85	0,78	0,85	0,99	0,83	0,5	0,15	0,22	0,15	0,01	0,17
35	0,89	0,13	0,56	0,62	0,88	0,82	0,11	0,87	0,44	0,38	0,12	0,18
36	0,8	0,77	0,78	0,8	0,98	0,81	0,2	0,23	0,22	0,2	0,02	0,19
37	0,69	0,77	0,82	0,62	0,94	0,75	0,32	0,23	0,18	0,38	0,06	0,25
38	0,29	0,9	0,56	0,39	0,84	0,62	0,71	0,1	0,44	0,61	0,16	0,38
39	0,84	0,28	0,87	0,67	0,99	0,67	0,16	0,72	0,13	0,33	0,01	0,33
40	0,41	1	0,6	0,39	0,86	0,73	0,59	0	0,4	0,61	0,14	0,27
41	0,81	0,16	0,78	0,55	0,91	0,39	0,19	0,84	0,22	0,45	0,09	0,61
42	0,29	0,93	0,56	0,39	0,91	0,62	0,71	0,07	0,44	0,61	0,09	0,38
43	0,85	0,28	0,78	0,68	0,84	0,63	0,15	0,72	0,22	0,32	0,16	0,37
44	0	0,94	0	0,39	0,8	0,22	1	0,06	1	0,61	0,2	0,78
45	0,79	0,28	0,6	0,65	0,96	0,35	0,22	0,72	0,4	0,35	0,04	0,65
46	0,38	0,81	0,11	0,36	0,84	0,62	0,62	0,2	0,89	0,64	0,16	0,38
47	0,71	0,16	0,69	0,55	0,91	0,67	0,29	0,85	0,31	0,45	0,09	0,33
48	0,06	0,94	0,56	0,55	0,84	0,37	0,94	0,06	0,44	0,45	0,16	0,63
49	0,69	0,29	1	0,67	1	0,93	0,31	0,71	0	0,33	0	0,07
50	0,15	0,86	0,53	0,39	0,79	0,58	0,85	0,14	0,47	0,61	0,21	0,42
51	0,84	0,19	0,64	0,39	1	0,98	0,17	0,81	0,36	0,61	0	0,02
52	0,16	0,9	0,42	0,39	0,62	0,31	0,84	0,1	0,58	0,61	0,38	0,69
53	0,76	0,18	1	0,68	0,99	0,93	0,24	0,82	0	0,32	0,01	0,07
54	0,18	0,54	0,53	0,7	0,88	0,88	0,83	0,46	0,47	0,3	0,12	0,13
55	0,51	0,46	0,11	0,55	0,84	0,54	0,49	0,54	0,89	0,45	0,16	0,46
56	0,59	0,95	0,33	0,32	0,81	0,51	0,41	0,05	0,67	0,68	0,19	0,49

Çizelge 4.2. (devam ediyor)

Deney No	Normalizasyon						Uzaklık Matrisi					
	Ra (µm)	İtme Kuvveti (N)	Delaminasyon Giriş	Delaminasyon Çıkış	Delik Giriş Çapak alanı (mm ²)	Delik Çıkış çapak alanı (mm ²)	Ra (µm)	İtme Kuvveti (N)	Delaminasyon Giriş	Delaminasyon Çıkış	Delik Giriş Çapak alanı (mm ²)	Delik Çıkış çapak alanı (mm ²)
57	0,83	0,27	0,11	0,77	0,92	0,94	0,17	0,73	0,89	0,23	0,08	0,06
58	0,34	0,96	0,11	0,39	0,41	0,52	0,66	0,04	0,89	0,61	0,59	0,48
59	0,82	0,11	0,33	0,7	0,55	0,6	0,18	0,89	0,67	0,3	0,45	0,4
60	0,77	0,95	0,33	0,55	0,46	0,65	0,23	0,05	0,67	0,45	0,54	0,35
61	0,73	0,39	0,11	0,7	0,83	0,67	0,27	0,61	0,89	0,3	0,17	0,33
62	0,51	0,95	0,11	0,35	0,56	0,26	0,49	0,05	0,89	0,65	0,44	0,74
63	0,7	0,23	0,11	0,55	0,38	0	0,3	0,77	0,89	0,45	0,62	1
64	0,32	0,91	0,33	0,39	0,5	0,44	0,68	0,09	0,67	0,61	0,5	0,56
65	0,5	0,1	0,09	0,7	0,56	0,41	0,5	0,9	0,91	0,3	0,44	0,59
66	0,4	0,91	0,11	0,39	0,67	0,4	0,6	0,09	0,89	0,61	0,33	0,6
67	0,73	0,33	0,11	0,88	0,87	0,99	0,27	0,67	0,89	0,12	0,13	0,01
68	0,75	0,79	0,07	0,62	0	0,58	0,25	0,21	0,93	0,38	1	0,42
69	0,5	0,29	0,07	0,73	0,65	0,9	0,5	0,71	0,93	0,27	0,35	0,1
70	0,79	0,82	0,11	0,55	0,52	0,44	0,21	0,18	0,89	0,45	0,48	0,56
71	0,87	0,17	0,33	0,79	0,61	0,74	0,13	0,83	0,67	0,21	0,39	0,26
72	0,66	0,74	0,11	0,62	0,61	0,51	0,34	0,26	0,89	0,38	0,39	0,49

Çizelge 4.3’de formüle göre hesaplanmış normalizasyon değerleri ve uzaklık matrisi değerleri görülmektedir.

Çizelge 4.4. Gri ilişki katsayısı, gri ilişki derecesi ve sıralama.

Deney No	Gri İlişki Katsayısı						Gri ilişki derecesi	sıralama
	Ra (µm)	İme Kuvveti (N)	Delaminasyon Giriş	Delaminasyon Çıkış	Delik Giriş Çapık alanı (mm ²)	Çıkış Çapık alanı (mm ²)		
1	0,85	0,59	0,53	0,52	0,95	0,53	0,66	25
2	0,5	0,99	0,53	0,4	0,94	0,4	0,63	38
3	0,58	0,38	0,74	0,7	0,84	0,49	0,62	39
4	0,49	0,99	0,53	0,49	0,88	0,61	0,66	24
5	0,88	0,33	0,43	0,39	0,84	0,51	0,56	56
6	0,55	0,9	0,36	0,45	0,85	0,52	0,61	44
7	0,65	0,4	0,53	0,45	1	0,62	0,61	42
8	0,56	0,9	0,53	0,52	0,94	0,51	0,66	27
9	0,73	0,34	0,82	0,59	0,98	0,64	0,68	19
10	0,45	0,8	0,43	0,52	0,96	0,52	0,61	41
11	0,88	0,35	0,43	0,52	0,9	0,7	0,63	37
12	0,47	0,86	0,47	0,33	0,94	0,53	0,6	48
13	0,71	0,42	0,57	0,62	0,98	0,68	0,66	23
14	0,61	0,8	0,6	0,4	0,98	0,6	0,66	22
15	0,61	0,35	0,52	0,62	0,91	0,96	0,66	26
16	0,65	0,77	0,54	0,4	0,91	0,55	0,63	36
17	0,7	0,4	0,53	0,45	0,95	0,81	0,64	32
18	0,36	0,61	0,53	0,38	0,9	0,77	0,59	51
19	1	0,81	0,85	0,52	0,97	0,37	0,75	5
20	0,62	1	0,47	0,62	0,99	0,76	0,74	9
21	0,92	0,45	0,85	0,57	0,98	0,55	0,72	12
22	0,83	0,99	0,56	0,52	0,94	0,74	0,76	3
23	0,96	0,39	0,71	0,52	0,92	0,39	0,65	30
24	0,7	0,89	0,53	0,62	0,67	0,87	0,71	13
25	0,89	0,39	0,92	0,51	1	0,7	0,73	11
26	0,4	0,9	0,53	0,45	0,94	0,59	0,64	35
27	0,71	0,36	0,92	0,45	0,98	0,52	0,66	29
28	0,45	0,9	0,65	0,77	0,98	0,77	0,75	6
29	0,91	0,37	0,85	0,44	1	0,5	0,68	20
30	0,79	0,86	0,67	0,72	0,96	0,74	0,79	2
31	0,96	0,4	0,82	0,52	0,96	0,45	0,68	18
32	0,48	0,69	1	0,57	0,88	0,65	0,71	14
33	0,9	0,38	1	1	1	1	0,88	1
34	0,5	0,77	0,69	0,77	0,98	0,75	0,74	10
35	0,82	0,37	0,53	0,57	0,81	0,73	0,64	33

Çizelge 4.4. (devam ediyor)

Deney No	Gri İlişki Katsayısı						Gri ilişki Derecesi	Sıralama
	Ra (µm)	İtme Kuvveti (N)	Delaminasyon Giriş	Çıkış Delaminasyon	Delik Giriş Çapak alanı (mm ²)	Çıkış Çapak alanı (mm ²)		
36	0,71	0,68	0,69	0,72	0,97	0,72	0,75	8
37	0,61	0,69	0,74	0,57	0,89	0,67	0,69	15
38	0,41	0,84	0,53	0,45	0,76	0,57	0,59	50
39	0,76	0,41	0,79	0,6	0,99	0,6	0,69	16
40	0,46	0,99	0,56	0,45	0,78	0,65	0,65	31
41	0,73	0,37	0,69	0,52	0,85	0,45	0,6	47
42	0,41	0,88	0,53	0,45	0,84	0,57	0,61	40
43	0,77	0,41	0,69	0,61	0,76	0,57	0,64	34
44	0,33	0,89	0,33	0,45	0,71	0,39	0,52	70
45	0,7	0,41	0,56	0,59	0,93	0,43	0,6	45
46	0,45	0,72	0,36	0,44	0,76	0,57	0,55	60
47	0,63	0,37	0,62	0,52	0,84	0,61	0,6	49
48	0,35	0,89	0,53	0,52	0,76	0,44	0,58	54
49	0,62	0,41	1	0,6	1	0,88	0,75	7
50	0,37	0,78	0,52	0,45	0,7	0,55	0,56	57
51	0,75	0,38	0,58	0,45	1	0,97	0,69	17
52	0,37	0,84	0,46	0,45	0,57	0,42	0,52	69
53	0,68	0,38	1	0,61	0,99	0,87	0,75	4
54	0,38	0,52	0,52	0,62	0,81	0,8	0,61	43
55	0,51	0,48	0,36	0,52	0,75	0,52	0,52	65
56	0,55	0,91	0,43	0,42	0,73	0,5	0,59	52
57	0,74	0,41	0,36	0,69	0,87	0,89	0,66	28
58	0,43	0,93	0,36	0,45	0,46	0,51	0,52	66
59	0,74	0,36	0,43	0,62	0,52	0,56	0,54	62
60	0,69	0,91	0,43	0,52	0,48	0,59	0,6	46
61	0,65	0,45	0,36	0,62	0,75	0,6	0,57	55
62	0,5	0,91	0,36	0,43	0,53	0,4	0,52	67
63	0,63	0,39	0,36	0,52	0,45	0,33	0,45	72
64	0,42	0,85	0,43	0,45	0,5	0,47	0,52	68
65	0,5	0,36	0,35	0,62	0,53	0,46	0,47	71
66	0,46	0,84	0,36	0,45	0,6	0,45	0,53	63
67	0,65	0,43	0,36	0,8	0,8	0,99	0,67	21
68	0,66	0,71	0,35	0,57	0,33	0,54	0,53	64
69	0,5	0,41	0,35	0,65	0,59	0,83	0,55	58
70	0,71	0,74	0,36	0,52	0,51	0,47	0,55	59
71	0,8	0,38	0,43	0,7	0,56	0,66	0,59	53
72	0,59	0,66	0,36	0,57	0,56	0,51	0,54	61

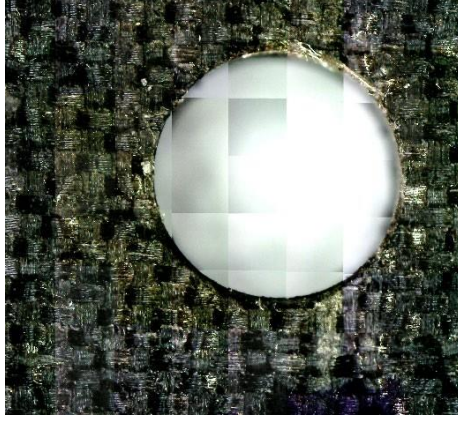
Çizelge 4.4’de; yüzey pürüzlülüğü, itme kuvveti, giriş delaminasyon faktörü, çıkış delaminasyon faktörü, giriş çapak alanı ve çıkış çapak alanı performans özellikleri için gri ilişkisel katsayısı, gri ilişki derecesini ve sıralamasını verir. Buna göre gri ilişki derecesinin en yüksek değeri 0,88 olarak bulunmuştur, sıralamada 1’i göstermektedir aynı zamanda bu değer deney no 33’e karşılık gelmektedir.

Birden fazla performans elde ederek en iyi delik kalitesine ulaşmak için optimum parametre değerleri % 0,5 MWCNT sahip NCF CFRP nanokompozit plakada 0,10 mm/dev. ilerleme oranında 3500 dev./dak. devir sayısı ile ALTIN kaplamalı matkapla yapılan delme işlemidir. Bu değerler ile elde edilen sonuçlar Çizelge 4.5’de gösterilmiştir.

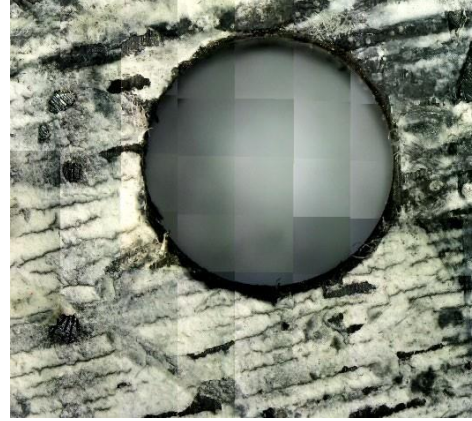
Çizelge 4.5. Optimum parametre sonuçlarına göre elde edilen deney sonuçları.

Deney No	MWCNT (%)	Devir Sayısı (dev./dak.)	İlerleme (mm/dev)	Matkap çeşidi	Ra (μm)	İtme Kuvveti (N)	Giriş Delaminasyon Faktörü (Fd _{giriş})	Çıkış Delaminasyon Faktörü (Fd _{çıkış})	Delik Giriş Çapak alanı (mm ²)	Delik Çıkış çapak alanı (mm ²)
33	0,5	3500	0,10	ALTIN	2,15	75,24	1	1	0,000	0,000

Çizelge 4.5.’de optimum parametrelerle işlenen delikte deney sonuçları görülmektedir.



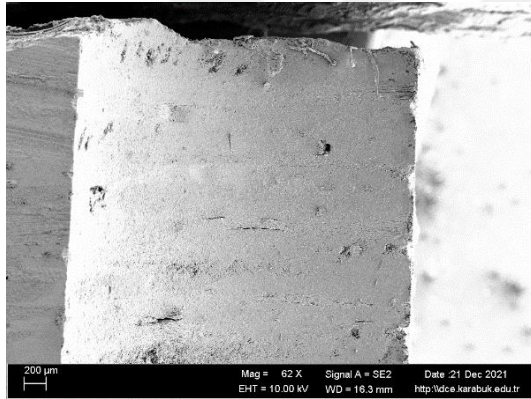
(a)



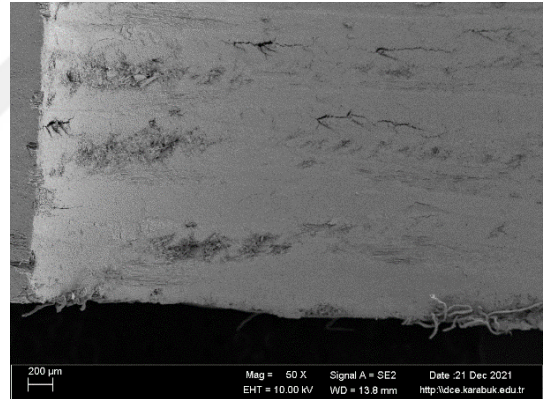
(b)

Şekil 4.16. Deney 33 delik çapak alanı görüntüleri a) Giriş çapak alanı, b) Çıkış çapak alanı.

Şekil 4.16'da giriş ve çıkış delaminasyon görüntülerine bakıldığında giriş ve çıkış çapak alanının mevcut olmadığı görülmektedir.



(a)



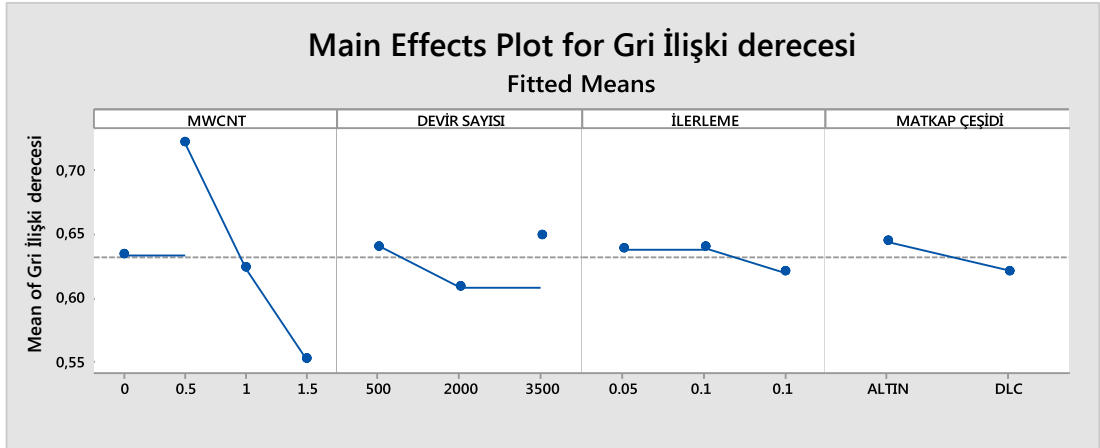
(b)

Şekil 4.17. Delik optimum parametrelerin elde edildiği % 0,5 MWCNT, 3500 dev/dak., 0,10 mm/dev., ALTIN (Deney 33) seviyede delik SEM görüntüsü a) Delik giriş görüntüsü b) Delik çıkış görüntüsü.

Gri ilişki varyans analizi gri ilişki derecesi üzerinde en etkin parametreleri tanımlamak için yapılmıştır. Çizelge 4.6'da gri ilişki varyans analizi sonucunda P değerine bakıldığında en etkin parametre MWCNT'ün yüzde miktarıdır. Bunu devir sayısı ve matkap çeşidi takip etmiştir. Parametreler arası etkileşime baktığımızda ise devir sayısı -matkap çeşidi ve MWCNT- matkap çeşidi arasındaki etkileşim gri ilişki derecesini belirlemede etkili olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.6. Gri ilişki derecesi varyans analizi.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	31	0,393427	0,012691	5,78	0,000
Linear	8	0,300467	0,037558	17,12	0,000
MWCNT	3	0,262868	0,087623	39,93	0,000
Devir Sayısı	2	0,022651	0,011325	5,16	0,010
İlerleme oranı	2	0,005720	0,002860	1,30	0,283
Matkap Çeşidi	1	0,009228	0,009228	4,21	0,047
2-Way Interactions	23	0,092960	0,004042	1,84	0,044
MWCNT*Devir Sayısı	6	0,012211	0,002035	0,93	0,486
MWCNT*İlerleme oranı	6	0,012378	0,002063	0,94	0,477
MWCNT*Matkap Çeşidi	3	0,032561	0,010854	4,95	0,005
Devir Sayısı *İlerleme oranı	4	0,006528	0,001632	0,74	0,568
Devir sayısı*Matkap çeşidi	2	0,016100	0,008050	3,67	0,034
İlerleme oranı*Matkap Çeşidi	2	0,013182	0,006591	3,00	0,061
Error	40	0,087768	0,002194		
Total	71	0,481194			



Şekil 4.18. Gri ilişki derecesi yanıt grafiği.

Gri ilişki derecesinde en yüksek en iyidir yaklaşımına göre oluşturulmuştur. Şekil 4.18’de gri ilişki derecesi yanıt tablosu en iyi delik kalitesini elde etmede optimum parametreleri göstermektedir. Bu değerler MWCNT miktarında % 0.5, devir sayısında 3500 dev./dak, ilerleme oranında 0.10 mm/dev., matkap çeşidinde ise ALTIN kaplamalı matkabı göstermektedir.

3.6.4. İtme Kuvveti Varyans Analizi sonuçları ve değerlendirilmesi

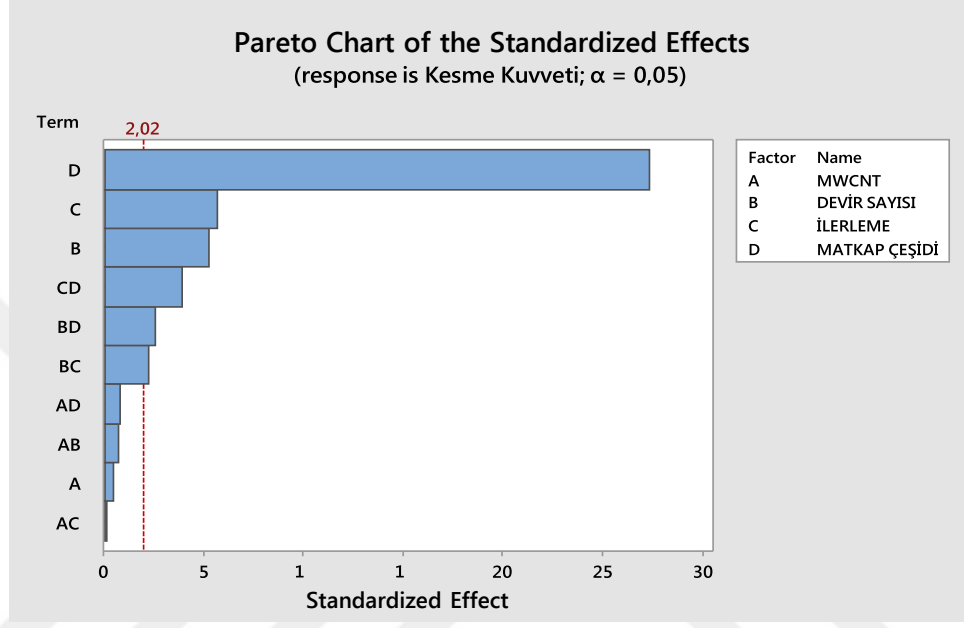
Çizelge 4.7. İtme kuvveti varyans analizi.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	31	63287,4	2041,5	28,16	0,000
Linear	8	59558,0	7444,8	102,69	0,000
MWCNT	3	122,6	40,9	0,56	0,642
Devir Sayısı	2	2418,7	1209,3	16,68	0,000
İlerleme oranı	2	2792,0	1396,0	19,26	0,000
Matkap Çeşidi	1	54224,7	54224,7	747,94	0,000
2-Way Interactions	23	3729,4	162,1	2,24	0,012
MWCNT*Devir Sayısı	6	413,7	68,9	0,95	0,470
MWCNT*İlerleme oranı	6	172,1	28,7	0,40	0,877
MWCNT*Matkap çeşidi	3	215,8	71,9	0,99	0,406
Devir sayısı*İlerleme	4	836,7	209,2	2,89	0,034
Devir sayısı *Matkap çeşidi	2	675,6	337,8	4,66	0,015
İlerleme*Matkap Çeşidi	2	1415,4	707,7	9,76	0,000
Error	40	2900,0	72,5		
Total	71	66187,4			

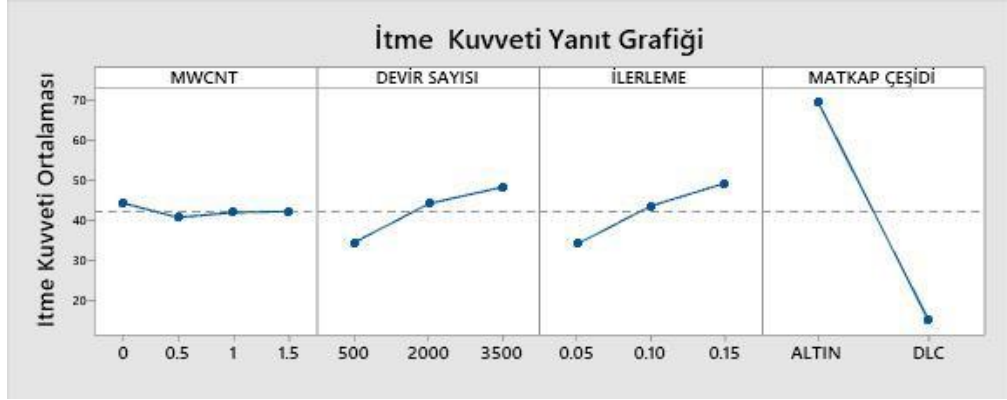
Ortalama itme kuvveti değerlerinin varyans analizi sonuçları Çizelge 4.7’de sunulmuştur. P değeri önem seviyesi hakkında bilgi vermektedir (uygun ya da uygun değil). Varyans analizi % 5’lik anlamlılık değerine göre yapılmış olup analiz sonucunda elde edilen P değeri % 5’lik anlamlılık değerinden büyük olması sebebiyle ($0,642 > 0,05$) MWCNT’ün itme kuvvetleri üzerine anlamlı bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Oluşan itme kuvvetine etkisi olan parametreler devir sayısı, ilerleme oranı ve matkap çeşididir.

Parametreler arası etkileşimlere baktığımızda İlerleme oranı - matkap çeşidi, devir sayısı-matkap çeşidi etkileşiminin itme kuvveti üzerinde etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.8. İtme kuvveti üzerinde araştırılan değişkenlerinin Pareto grafiği.



Çizelge 4.8’de Pareto grafiğinde görüldüğü gibi, incelenen değişkenlerin bazıları referans çizgisini aşıyor, bu da onların itme kuvveti üzerinde güçlü etkileri olduğu anlamına geliyor. Sonuç, bilimsel ve pratik anlamlara sahiptir, çünkü matkap çeşidi, ilerleme oranı, devir sayısı ve bunların birbirleriyle olan etkileşimi delme işlemi üzerinde önemli etkilere sahiptir. En çok öneme sahip olan ise büyük farkla matkap çeşidi olmuştur bunu ilerleme oranı ve devir sayısı takip etmiştir. Matkap çeşidi - ilerleme oranı arasındaki etkileşim, devir sayısı – matkap çeşidi etkileşimi ve devir sayısı – ilerleme oranı etkileşimi itme kuvveti üzerinde etkilidir.



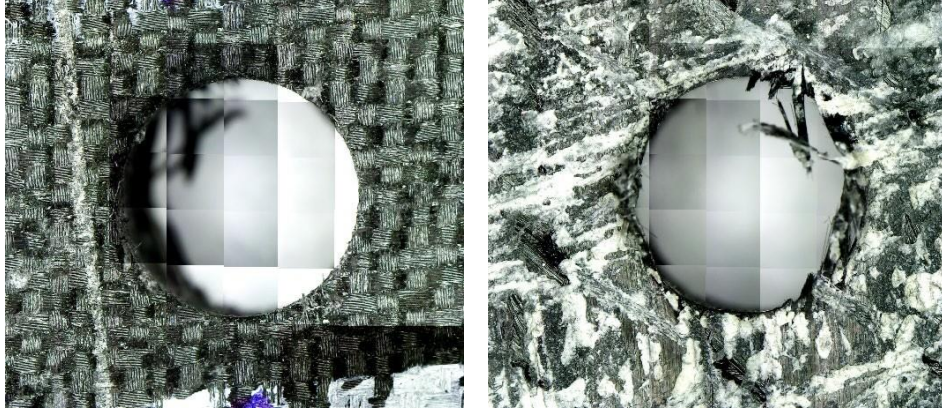
Şekil 4.19. İtme kuvveti yanıt grafiği.

Şekil 4.19'a baktığımızda en düşük en iyidir yaklaşımıyla yapılan optimizasyona göre maksimum itme kuvvetinin en düşük olduğu seviyeler MWCNT yüzde miktarında % 0,5, devir sayısında 500 dev./dak., ilerleme oranında 0,05 mm/dev., matkap çeşidinde ise DLC kaplamalı matkap olmuştur. Bu seviyelerde elde edilen deney sonuçları Çizelge 4.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. İtme kuvvetinde optimum parametre deney sonuçları.

Deney No	MWCNT (%)	Devir Sayısı (dev./dak.)	İlerleme oranı (mm/dev)	Matkap çeşidi	Ra (µm)	İtme Kuvveti (N)	Giriş Delaminasyon Faktörü(Fdgiris)	Çıkış Delaminasyon Faktörü (Fd çıkış)	Delik Giriş Çapak alanı (mm ²)	Delik Çıkış çapak alanı (mm ²)
20	0,5	500	0,05	DLC	5,50	4,95	1,25	1,2	0,0620	3,5000

Çizelge 4.9'da itme kuvvetinin en düşük olduğu seviyelerde yüzey pürüzlülük değeri 5,50 µm, çıkış delaminasyon faktörü 1,2 olarak bulunmuştur.

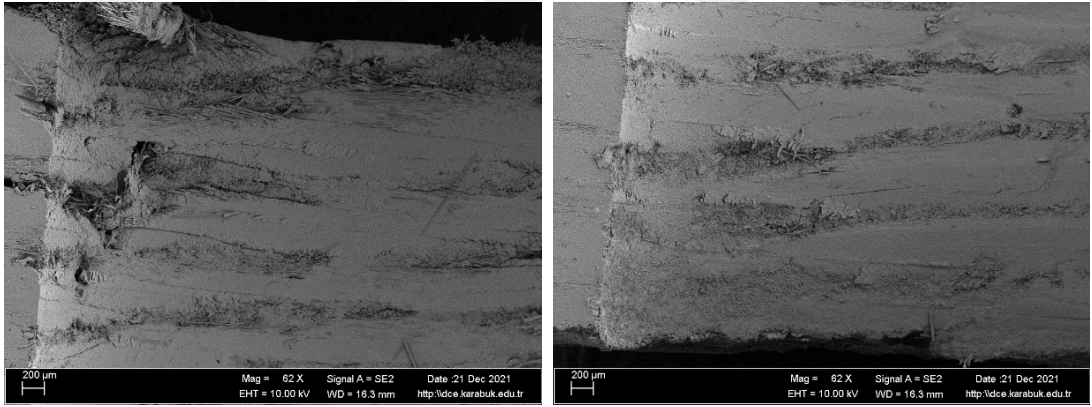


(a)

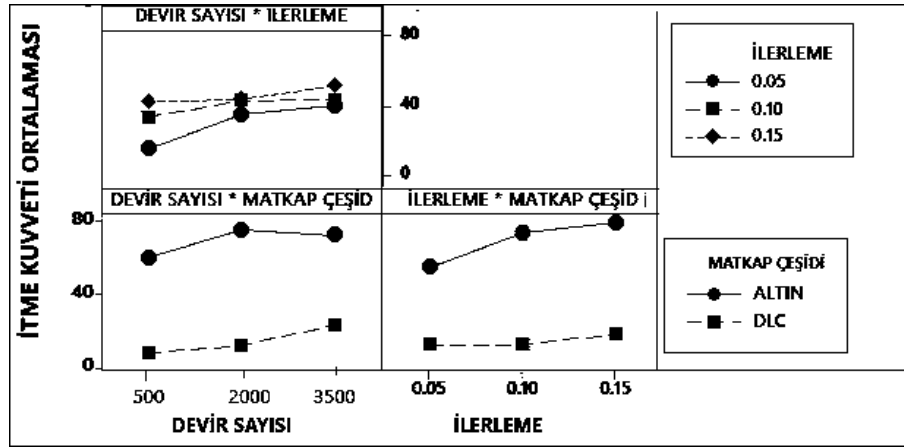
(b)

Şekil 4.20. İtme kuvvetinin en düşük olduğu seviyede % 0,5 MWCNT, 500 dev./dak. 0,05 mm/dev., DLC matkapla (Deney 20) yapılan deneyde delik giriş ve çıkış çapak alanı görüntüsü, a) Giriş çapak alanı, b) Çıkış çapak alanı

Şekil 4.20’de delik giriş ve çıkışındaki çapak alanları görülmektedir. Delik çıkışındaki kesilmeyen fiberler dikkati çekmektedir



Şekil 4.21. İtme kuvvetinin en düşük olduğu seviyede %0.5 MWCNT,500dev./dak.0.05 mm/dev. ,DLC matkapla (deney 20) yapılan deneyde delik içi SEM görüntüsü.



Şekil 4.22. İtme kuvveti üzerinde parametreler arası ilişki grafiği.

Şekil 4.22’de Matkap çeşidi ve ilerleme arasındaki etkileşime baktığımızda en düşük itme kuvveti değerine DLC matkapta en düşük ilerleme değerinde 0,05 mm/dev. ulaşılmıştır. İtme kuvvetinin yüksek çıkma sebebi ise, artan ilerleme oranıyla devir başına kesme derinliğinin artmasıdır. Matkap ucunun devir başına daha fazla malzemeyi kesmesi için çok daha yüksek delme direncinin üstesinden gelmesi gerekir. Sonuç olarak, itme kuvvetleri yükselir [157]. Devir sayısının artması; radyal ağız üzerinde etkinin artmasına yol açan ilerleme oranının da artmasına neden olur. Bu durum itme kuvvetlerinin artmasıyla sonuçlanır [154]. ALTIN kaplamalı matkapta ise ilerleme oranı değeri arttıkça itme kuvveti artmıştır.

Devir sayısı –matkap çeşidi etkileşimine baktığımızda en düşük itme kuvveti DLC matkapta 500 dev./dak. devir sayısında görülmüştür. DLC matkapta devir sayısı arttıkça itme kuvveti hafif artışlar göstermiştir. Devir sayısı ve ilerleme oranı arasındaki etkileşimde ise devir sayısı ve ilerleme arttıkça itme kuvveti değerleri, artmıştır. Düşük itme kuvveti değerleri düşük ilerleme oranı ve düşük devir sayısında görülmüştür.

İlerleme oranının artmasıyla matkap kesme işlemi yerine koparak delme işlemini gerçekleştirir bu durum itme kuvvetinin artmasına sebep olur. İlerlemenin artmasıyla kesme işlemi ve talaş oluşumu için yeterli zaman olmadığından matkap tabakayı koparak delmektedir [213].

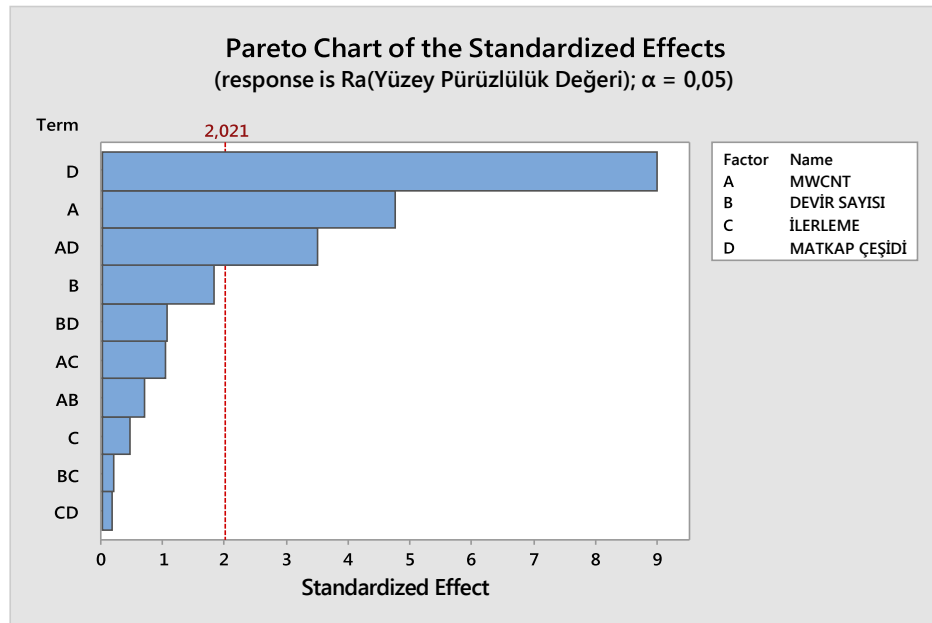
DLC matkabın ALTIN matkaba kıyasla itme kuvvetlerinin düşük olmasında takım geometrisi önem taşımaktadır. DLC matkapta itme kuvvetinin artmasına sebep olan radyal ağız bulunmamaktadır. Jain ve arkadaşları [214] radyal ağız genişliğini yarıya indirilmesinin itme kuvvetini neredeyse üçte bir oranında azalttığını belirtmişlerdir [213].

Matkabın kesici kenarının uzunluğu boyunca, kesme hızının değişken değerleri vardır. Matkabın çevresinde kesme hızı maksimum seviyedeysen, bu değer merkeze doğru gittikçe radyal ağızda sıfıra yaklaşır [215]. Matkapların uç açısının değişmesiyle matkapların kesici kenar uzunlukları değişir bu sebeple matkabın uç açısı delme üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Bununla birlikte, uç açısındaki artış, daha küçük kesme kenarı ile sonuçlanarak, deforme olmayan talaş kalınlığı, deforme olmayan talaş genişliği ve itme kuvvetinde azalmaya neden olmuştur [216].

3.6.5. Yüzey Pürüzlülüğü Varyans Analizi ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Çizelge 4.10. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde araştırılan değişkenlerin etkilerinin Pareto grafiği.

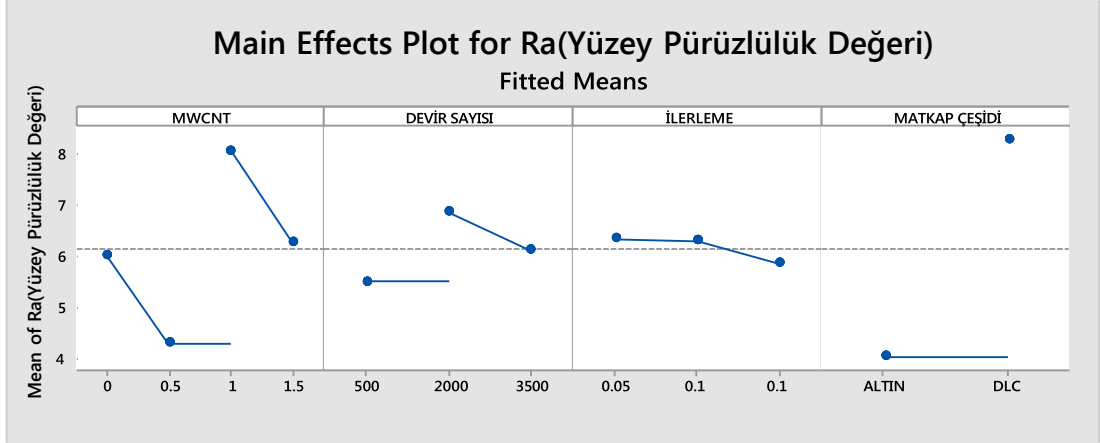


Çizelge 4.10'daki Pareto grafiğinde, bazı parametreler referans çizgisini aşıyor, bu da onların yüzey pürüzlülüğü üzerinde güçlü etkileri olduğu anlamına geliyor. Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktör matkap çeşididir. Bunu MWCNT'ün yüzde miktarı izlemektedir. Parametreler arası etkileşim durumuna bakıldığında MWCNT yüzde miktarı ile matkap çeşidinin etkileşimi yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli etkiye sahiptir.

Çizelge 4.11'de yüzey pürüzlülüğünün varyans analizi sonuçlarına baktığımızda P değeri 0,05'den küçük olması sebebiyle yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktör matkap çeşidi ve MWCNT yüzde miktarıdır. MWCNT yüzde miktarı ile matkap çeşidinin etkileşimi de yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkin rol oynamaktadır.

Çizelge 4.11. Yüzey pürüzlülüğü varyans analizi.

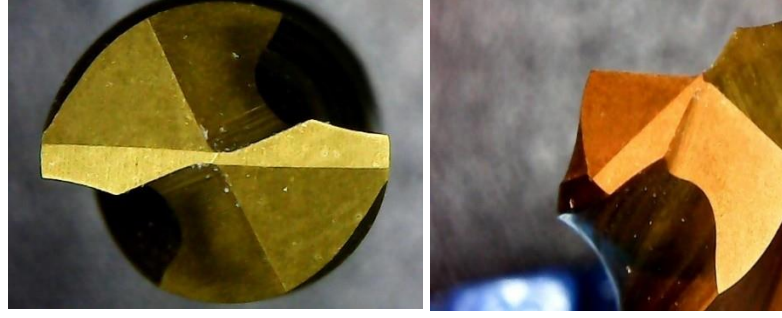
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	31	630,487	20,338	5,02	0,000
Linear	8	483,355	60,419	14,91	0,000
MWCNT	3	130,152	43,384	10,70	0,000
Devir Sayısı	2	22,370	11,185	2,76	0,075
İlerleme oranı	2	3,516	1,758	0,43	0,651
Matkap çeşidi	1	327,317	327,317	80,75	0,000
2-Way Interactions	23	147,132	6,397	1,58	0,101
MWCNT*Devir sayısı	6	22,237	3,706	0,91	0,495
MWCNT*İlerleme oranı	6	29,889	4,981	1,23	0,312
MWCNT*Matkap çeşidi	3	78,116	26,039	6,42	0,001
Devir sayısı*İlerleme oranı	4	5,663	1,416	0,35	0,843
Devir sayısı*Matkap çeşidi	2	10,019	5,009	1,24	0,301
İlerleme oranı*Matkap çeşidi	2	1,209	0,604	0,15	0,862
Error	40	162,140	4,053		
Total	71	792,627			



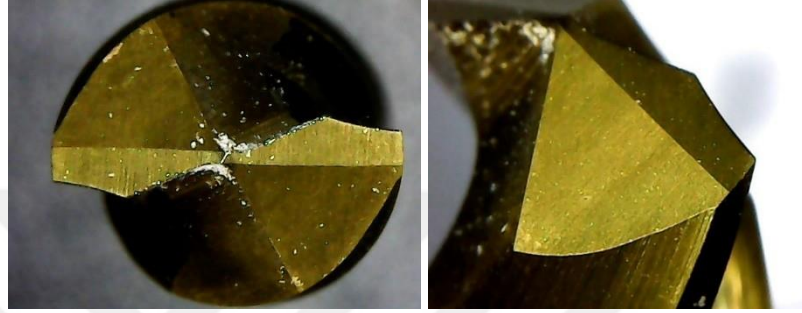
Şekil 4.23. Yüzey pürüzlülüğü yanıt grafiği

Şekil 4.23'e baktığımızda en düşük en iyidir yaklaşımıyla yapılan optimizasyona göre yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu seviyeler MWCNT yüzde miktarında % 0,5, devir sayısında 500 dev./dak., ilerleme oranında 0,15 mm/dev., matkap çeşidinde ise ALTIN kaplamalı matkap olmuştur.

Şekil 4.24'de ALTIN kaplamalı matkabın deney öncesi ve sonrası fotoğrafı görülmektedir, yüzeyde herhangi bir matris yapışması görülmemektedir. DLC matkap ile delinen deliklerin yüzey pürüzlülük değerleri ALTIN matkaba kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Şekil 4.25'de DLC matkap yüzeyi incelendiğinde matkabın her iki yanak yüzeyinde ve kesici kenarlar üzerinde matris yapışmasından kaynaklı kalıntılara rastlanmıştır. Bu durum delik yüzeylerinin pürüzlülüğünü artırmıştır. Devir sayısı arttığında, delme işleminde daha fazla kesme ısı üretilir ve bu da kesme bölgelerinde yüksek kesme sıcaklığına neden olarak malzemenin yumuşamasına sebep olur. Delme işleminin devam etmesi için daha az enerji ve daha küçük itme kuvveti yeterlidir [157]. Hem devir sayısı hem de ilerleme oranında ki artış, işlem sıcaklığının artmasına neden olarak kesici kenar üzerinde aşınma ve yanma izleri gibi olumsuz bir etkiye sebep olur [216].

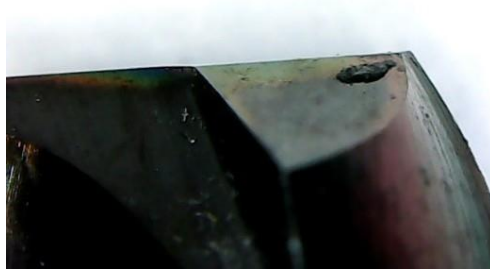
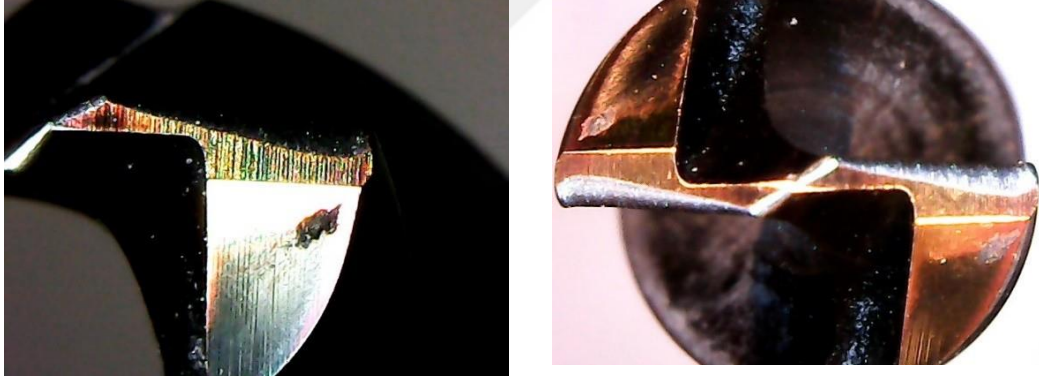


(b)



(b)

Şekil 4.24. ALTIN kaplamalı matkap mikroskop görüntüleri a) Deney öncesi b) Deney sonrası .

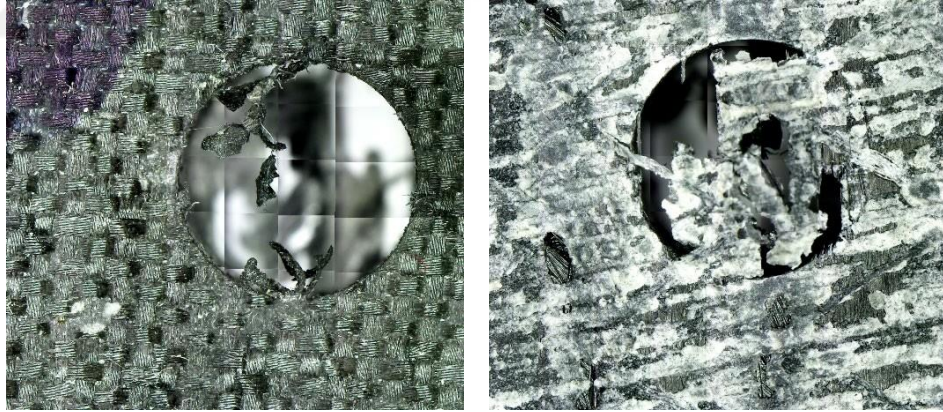


Şekil 4.25. Reçine yapışmış DLC kaplamalı matkap yüzeyinin mikroskop görüntüsü.

Çizelge 4.12. Yüzey pürüzlülüğü optimum parametrelerine göre elde edilen deney sonuçları.

Deney No	MWCNT (%)	Devir Sayısı (dev./dak.)	İlerleme (mm/dev)	Matkap çeşidi	Ra (μm)	İtme kuvveti (N)	Giriş Delaminasyon Faktörü(Fdgiriş)	Çıkış Delaminasyon Faktörü (Fd çıkış)	Delik Giriş Çapak alanı (mm ²)	Delik Çıkış çapak alanı (mm ²)
23	0,5	500	0,15	ALTIN	1,70	72,4	1,09	1,30	0,5300	17,4820

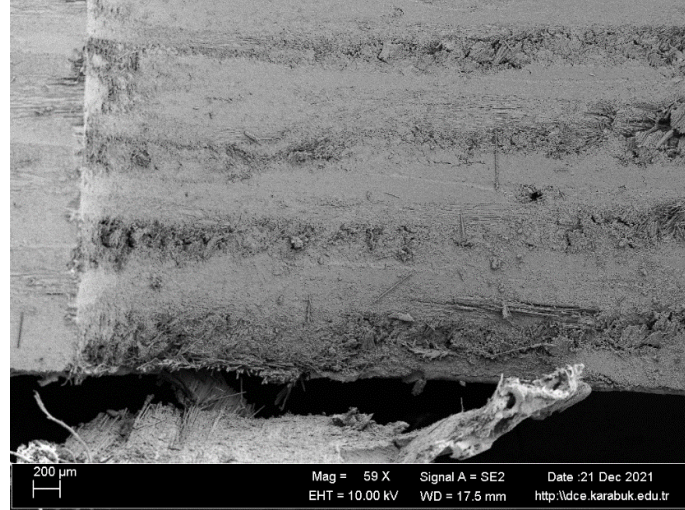
Yüzey pürüzlülüğü optimum parametrelerine göre elde edilen deney sonuçları Çizelge 4.12’de gösterilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu seviyede (Ra 1,70 μm) çıkış delaminasyon faktörü değeri (1,30) ve delik çıkış çapak alanı (17,4820 mm²) yüksek çıkmıştır.



(a)

(b)

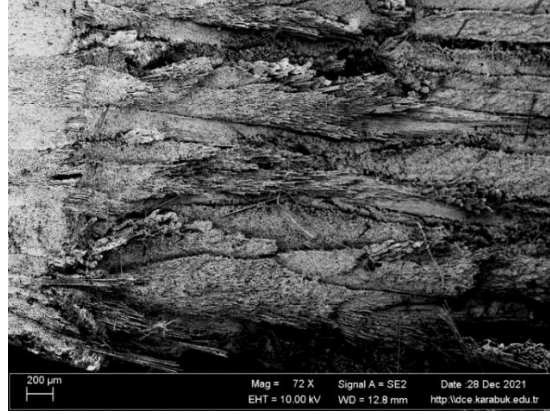
Şekil 4.26. Yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu ; % 0,5 MWCNT, 500 dev./dak., 0,15 mm/dev., ALTIN (Deney 23) seviye değerlerinde delik giriş ve çıkış çapak alanı mikroskop görüntüleri a) Delik giriş çapak alanı, b) Delik çıkış çapak alanı



Şekil 4.27. Yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu ; % 0,5 MWCNT, 500 dev./dak., 0,15 mm/dev., ALTIN (deney 23) seviye değerlerinde delik SEM görüntüsü.

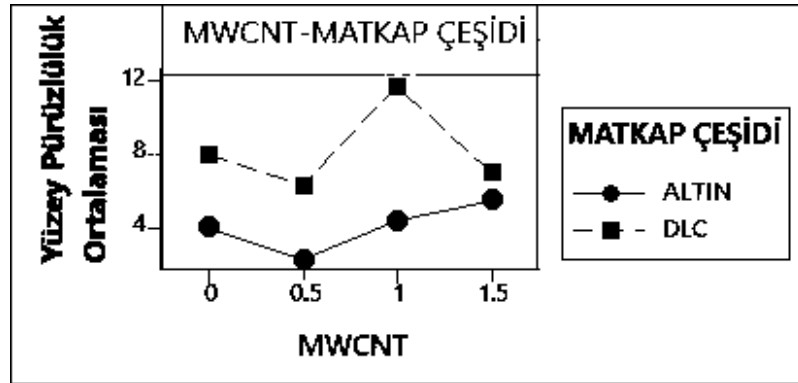
Şekil 4.26’da delik çıkışında ki çapak alanının daha fazla olduğu görülmektedir. Deney 23’ün delik SEM görüntüsü Şekil 4.27’de görülmektedir. % 0,5 MWCNT içeriğine sahip NCF CFRP kompozit UV spektroskopi analizinde en yüksek absorbands değerine sahip olarak homojen dispersiyon sağlamıştır. Mekanik özelliklerinin yüksek çıkmasıyla da birlikte tabakalar arasındaki yapışmanın kuvvetli olduğu sonucuna varılmıştır, bu durum delme esnasında yüzey pürüzlülüğünün en iyi sonucu vermesini sağlamıştır. ALTIN kaplamalı matkap ile elde edilen daha düşük yüzey pürüzlülüğü, DLC matkaba göre düşük sürtünme katsayısına sahip olmasına bağlanabilir [168].

Şekil 4.28 yüzey pürüzlülük değerinin en yüksek (R_a 14,61 μm) olduğu, deney seviyeleri % 1 MWCNT, 2000 dev./dak. devir sayısı, 0,05 mm/dev. ilerleme oranı ve DLC matkap olan deney 44’ün delik SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4.28. Yüzey pürüzlülüğünün en yüksek olduğu ($Ra14,61\mu m$) %1 MWCNT, 2000 dev./dak, 0,05 mm/dev., DLC (deney 44) seviye değerlerinde delik SEM görüntüsü.

UV Vis spektroskopi sonuçlarına da bakıldığında absorbans değeri en düşük ve homojen dispersiyonu kötü olan % 1 MWCNT içeriğe sahip NCF CFRP kompozit malzemenin tabakaları arasında görülen açıklık, yapışmanın iyi olmadığı bir göstergesidir, bu durumun delme esnasında fiberlerin geri çekilmesine ve fiber parçalanmasına sebep olmasıyla birlikte yüzey pürüzlülük değerinin yüksek çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 4.29. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde parametreler arası etkileşim grafiği.

Şekil 4.29’da MWCNT yüzde miktarı ile matkap çeşidi etkileşimine bakıldığında % 0,5 MWCNT miktarında ALTIN matkap kullanılmasıyla yüzey pürüzlülük değerleri düşük çıkmıştır. % 0,5 MWCNT miktarında daha düşük yüzey pürüzlülüğünün çıkması, delik yüzeyinde daha az matris çatlaması ve delik duvarında daha az birikmiş kenar oluşumuna bağlanır [152].

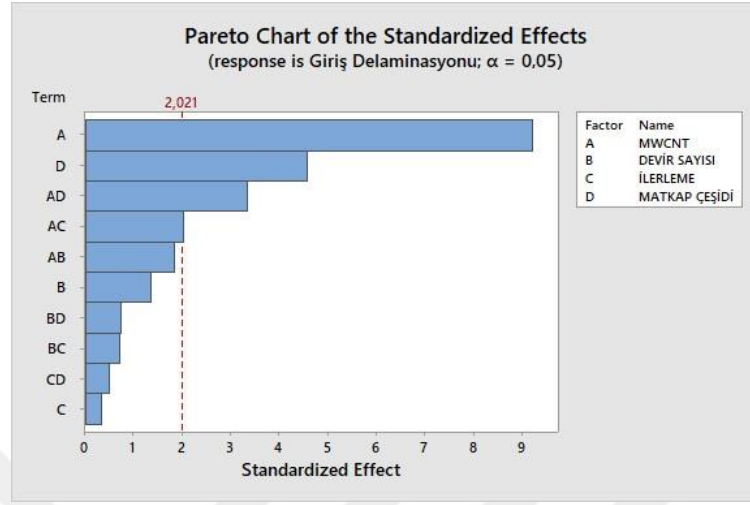
3.6.6. Giriş Delaminasyonu Varyans Analizi ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Çizelge 4.13. Giriş delaminasyonu varyans analizi.

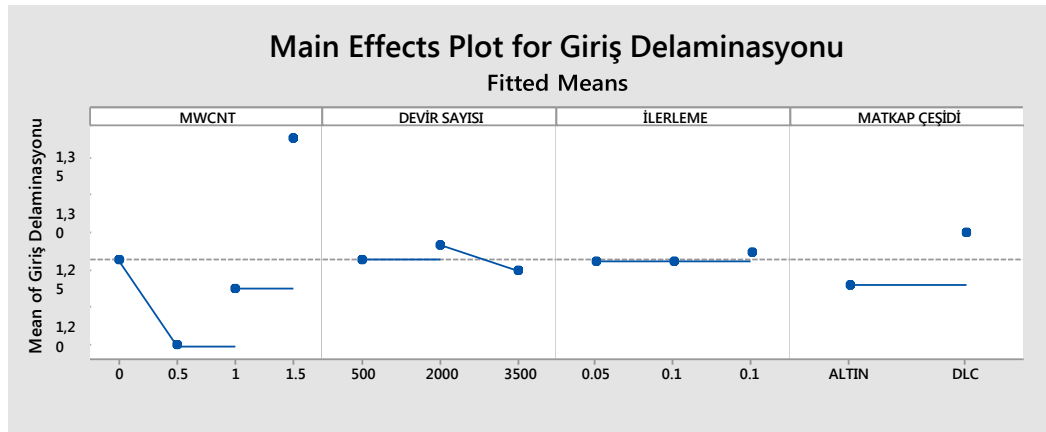
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	31	1,05915	0,034166	8,06	0,000
Linear	8	0,84443	0,105554	24,89	0,000
MWCNT	3	0,73881	0,246270	58,07	0,000
Devir Sayısı	2	0,01484	0,007418	1,75	0,187
İlerleme Oranı	2	0,00259	0,001293	0,30	0,739
Matkap Çeşidi	1	0,08820	0,088200	20,80	0,000
2-Way Interactions	23	0,21471	0,009335	2,20	0,014
MWCNT*Devir Sayısı	6	0,05400	0,009000	2,12	0,072
MWCNT*İlerleme oranı	6	0,05911	0,009852	2,32	0,051
MWCNT*Matkap Çeşidi	3	0,07592	0,025307	5,97	0,002
Devir sayısı*İlerleme oranı	4	0,01513	0,003783	0,89	0,478
Devir sayısı*Matkap Çeşidi	2	0,00648	0,003238	0,76	0,473
İlerleme oranı*Matkap çeşidi	2	0,00407	0,002037	0,48	0,622
Error	40	0,16963	0,004241		
Total	71	1,22878			

Şekil 4.13'e baktığımızda P değerinin 0,05'den küçük ve eşit olması sebebiyle giriş delaminasyonunu etkileyen en önemli faktörler MWCNT'ün yüzde miktarı ve matkap çeşididir. Parametreler arası etkileşimlerde ise MWCNT yüzde miktarı-matkap çeşidinin ve MWCNT-ilerleme oranı arasındaki etkileşim giriş delaminasyonu üzerinde etkilidir.

Çizelge 4.14. Giriş delaminasyonu üzerinde araştırılan değişkenlerin etkilerinin Pareto grafiği.



Çizelge 4.14’de Pareto grafiğinde görüldüğü gibi giriş delaminasyonunu etkileyen en önemli faktör MWCNT yüzde miktarıdır, bunu matkap çeşidi izlemektedir. Parametreler arası etkileşim durumuna bakıldığında MWCNT yüzde miktarı-matkap çeşidi ve MWCNT-İlerleme oranı etkileşimi yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemlietkiye sahiptir.



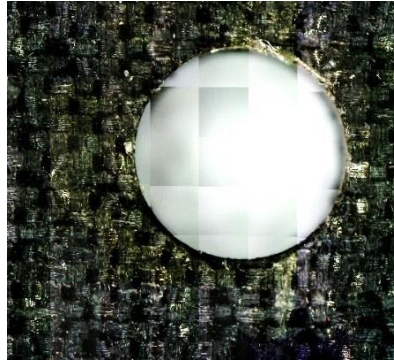
Şekil 4.30. Giriş delaminasyonu yanıt grafiği

Şekil 4.30’a baktığımızda en düşük en iyidir yaklaşımıyla yapılan optimizasyona göre giriş delaminasyonunun en düşük olduğu seviyeler % 0,5 MWCNT yüzde miktarı, 3500 dev./dak. devir sayısı, 0,01 mm/dev. ilerleme oranı, ALTIN kaplamalı matkap çeşididir.

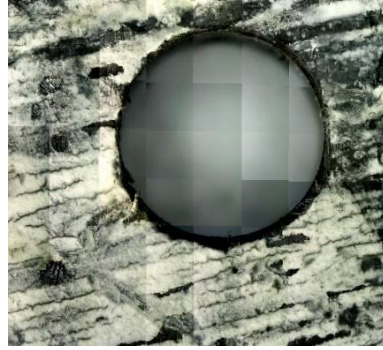
Çizelge 4.15. Giriş delaminasyonu faktörü optimum parametrelerine göre elde edilen deney sonuçları.

Deney No	MWCNT (%)	Devir Sayısı (dev./dak.)	İlerleme (mm/dev)	Matkap çeşidi	Ra (μm)	İme kuvveti (N)	Giriş Delaminasyon Faktörü($F_{d\text{giriş}}$)	Çıkış Delaminasyon Faktörü ($F_{d\text{çıkış}}$)	Delik Giriş Çapak alanı (mm^2)	Delik Çıkış Çapak alanı (mm^2)
33	0,5	3500	0,10	ALTIN	2,15	75,24	1	1	0,0000	0,0000

Çizelge 4.15 giriş delaminasyon faktörü optimum parametrelerine göre elde edilen sonuçları göstermektedir. Giriş delaminasyon faktörünün en düşük olduğu durumda diğer sonuçlara da bakıldığında çıkış delaminasyonunun 1 olduğu görülmektedir. Giriş ve çıkış çapak alanları 0'dır. Deney 33 aynı zamanda gri ilişki analiz sonucunun optimum parametre deneyidir.

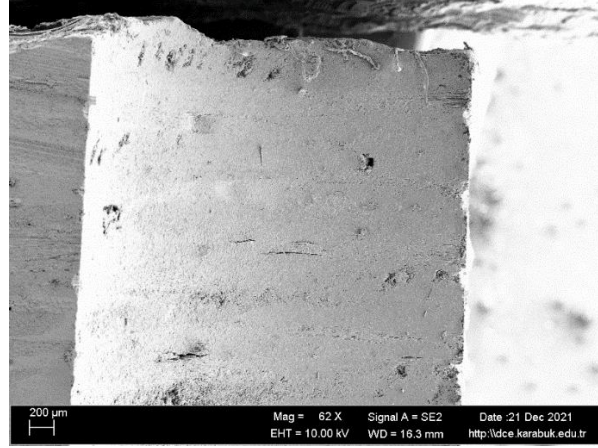


(a)



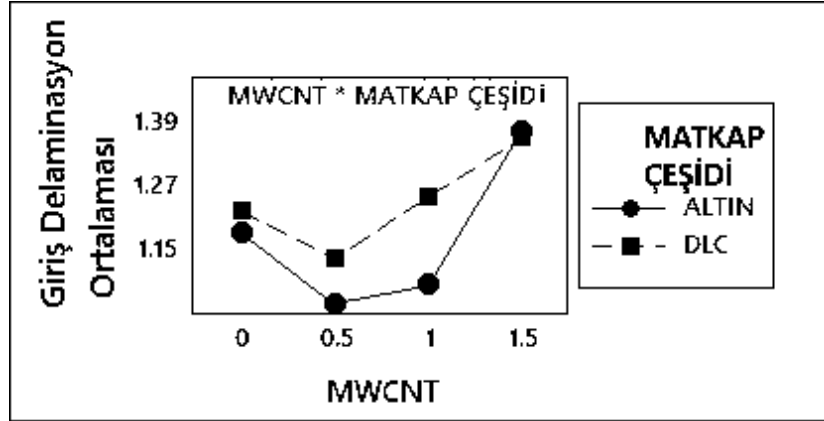
(b)

Şekil 4.31. Delik giriş delaminasyonunun en düşük olduğu (F_{d1}) seviyede, % 0,5 MWCNT, 3500 dev/dak., 0,10 mm/dev., ALTIN (deney 33), delik giriş ve çıkış çapak alanı mikroskop görüntüleri a) Delik giriş çapak alanı, b) Delik çıkış çapak alanı



Şekil 4.32. Delik giriş delminasyonunun en düşük olduğu (Fd:1), % 0,5 MWCNT, 3500 dev/dak., 0,10 mm/dev., ALTIN (deney 33) seviyede delik giriş SEM görüntüsü..

Şekil 4.32’de delik giriş delaminasyonunun en düşük olduğu % 0,5 MWCNT, 3500 dev./dak. devir sayısı, 0,10 mm/dev. ilerleme oranı, ALTIN kaplamalı matkap çeşidi (Deney 33) seviye değerlerinde SEM görüntüsünden de anlaşılabacağı gibi tabakalar arası ayrılma meydana gelmemiş ve giriş delaminasyonu oluşmamıştır. Bu durum arayüzey bağının güçlü olmasına dayandırılmıştır.



Şekil 4.33. Giriş Delaminasyonu Üzerinde Parametreler Arası ilişki Grafiği

Şekil 4.33’de görüldüğü gibi MWCNT-matkap çeşidi arasındaki etkileşim kuvvetlidir buna göre % 0,5 MWCNT plaka, ALTIN kaplamalı matkapla en düşük giriş delaminasyon değerine ulaşılmıştır.

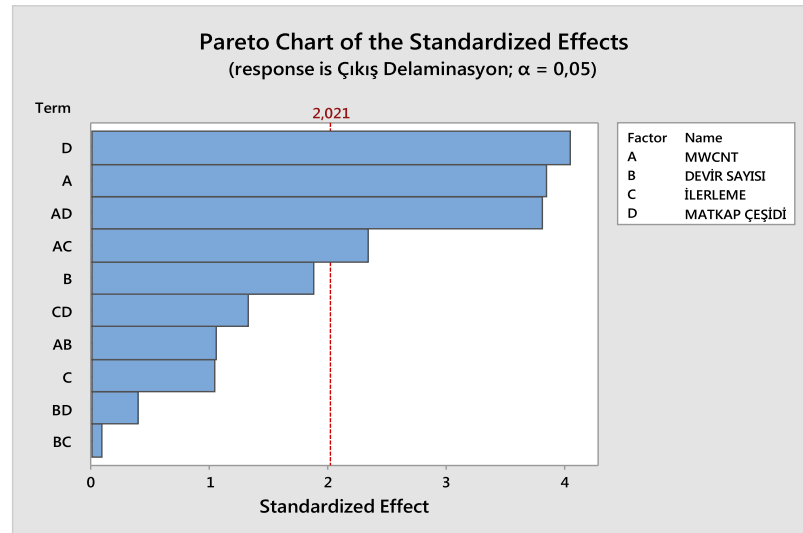
3.6.7. Çıkış Delaminasyonu Varyans Analizi ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Çizelge 4.16. Çıkış delaminasyonu varyans analizi.

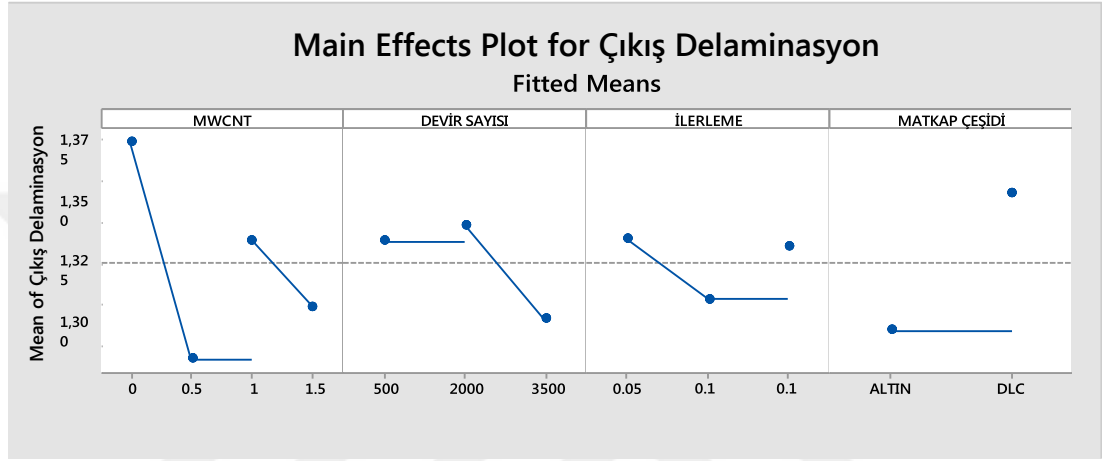
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	31	0,76265	0,024602	3,18	0,000
Linear	8	0,36480	0,045600	5,89	0,000
MWCNT	3	0,17430	0,058100	7,51	0,000
Devir sayısı	2	0,04485	0,022426	2,90	0,067
İlerleme Oranı	2	0,01898	0,009489	1,23	0,304
Matkap çeşidi	1	0,12667	0,126672	16,37	0,000
2-Way Interactions	23	0,39785	0,017298	2,24	0,013
MWCNT*Devir sayısı	6	0,05863	0,009771	1,26	0,296
MWCNT*İlerleme oranı	6	0,12837	0,021394	2,77	0,024
MWCNT*Matkap çeşidi	3	0,17196	0,057320	7,41	0,000
Devir sayısı*İlerleme oranı	4	0,00668	0,001670	0,22	0,928
Devir sayısı*Matkap çeşidi	2	0,00567	0,002835	0,37	0,696
İlerleme oranı*Matkap çeşidi	2	0,02654	0,013272	1,72	0,193
Error	40	0,30946	0,007737		
Total	71	1,07211			

Çizelge 4.16’da varyans analizinde görüldüğü gibi çıkış delaminasyonu üzerinde en büyük etkiyi Matkap çeşidi ve MWCNT yüzde miktarı sağlamaktadır. MWCNT - Matkap çeşidi ve MWCNT yüzde miktarı-ilerleme oranı arasındaki etkileşim kuvvetlidir, bu durum çıkış delaminasyonu üzerinde önemli etkiye sebep olmaktadır.

Çizelge 4.17. Çıkış delaminasyonu üzerinde araştırılan değişkenlerin etkilerinin Pareto grafiği.



Çizelge 4.17’de Pareto grafiğinde görüldüğü gibi referans çizgisini geçen çıkış delaminasyonu üzerinde güçlü etkileri olan parametreler görülmektedir. Çıkış delaminasyonu üzerinde en büyük etkiyi matkap çeşidi ve MWCNT yüzde miktarı sağlamaktadır. MWCNT-matkap çeşidi arasındaki etkileşim ve MWCNT yüzde miktarı-ilerleme oranı arasındaki etkileşimin çıkış delaminasyonu üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.34. Çıkış delaminasyonu yanıt tablosu.

Şekil 4.34’e baktığımızda en düşük en iyidir yaklaşımla yapılan optimizasyona göre çıkış delaminasyonunun en düşük olduğu seviyeler % 0,5 MWCNT, 3500 dev./dak. Devir sayısı, 0,10 mm/dev. ilerleme oranı ve ALTIN kaplamalı matkap çeşididir.

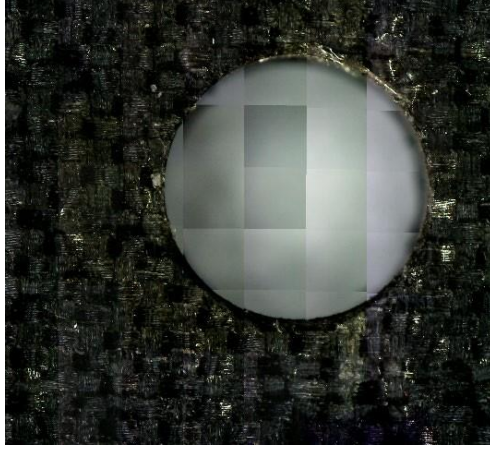
% 1 ve % 1,5 MWCNT içerikli kompozitte aglomerasyondan kaynaklı malzeme dayanımı düşmüştür (Şekil 4.4) bu durum delaminasyon değerlerini artırmıştır. Matkap iş parçası üzerinden hareket ederek sona yaklaştıkça radyal ağız üzerinde itme kuvveti artar. İtme kuvveti değeri tabakalar arası yapışma kuvvetini aşınca, küçük değerlerde delaminasyon meydana gelir malzeme yavaşça kendini bırakır ve tabaka ayrılmaları meydana gelir sonuç olarak kesilmeyen fiberler oluşur, delik çıkışında oluşan çapak alanı kesilmeden önce kesici ağızlardan etkili bir şekilde uzaklaşamaz. Yüksek devir sayısında ise matkap hızlı hareket ettiği için, malzemede tabaka ayrılmasına müsaade edecek yeterli zaman yoktur, böylelikle plakanın alt yüzeyi radyal ağızdan kolayca ayrılır, sonra malzeme ana kesici kenarlar ve yan kesici kenarlar sayesinde uzaklaşır [154] .

Böylelikle delikte çıkış delaminasyonu oluşmaz. ALTIN kaplamalı matkabın daha düşük delaminasyon göstermesi radyal ağzın delikte hasara sebep olmamasıdır. Burada radyal ağız ve ana kesici kenarlar malzemeyi etkili bir şekilde uzaklaştırabilmiştir [154]. Yüksek devirde düşük ilerleme oranı ile radyal ağız ve ana kesici kenarların kesebileceği yeterli malzeme mevcuttur. Radyal ağzın plakanın alt kısmını delmesi esnasında, radyal ağız ve kesici kenarların malzemeyi uzaklaştırmasında yüksek devir önemli rol oynar. Küçük delaminasyonlu çapaksız delikler oluşturmak için yüksek devir tercih edilmelidir [154].

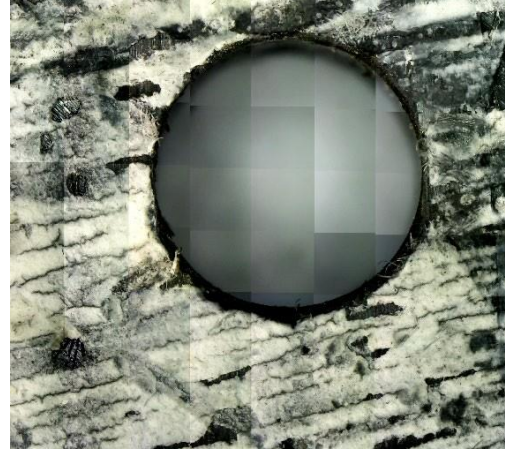
Çizelge 4.18. Çıkış delaminasyonu faktörü optimum parametrelerine göre elde edilen deney sonuçları.

Deney No	MWCNT (%)	Devir Sayısı (dev./dak.)	İlerleme (mm/dev)	Matkap çeşidi	Ra (µm)	İtme kuvveti (N)	Giriş Delaminasyon Faktörü(Fdgiriş)	Çıkış Delaminasyon Faktörü (Fd çıkış)	Delik Giriş Çapak alanı (mm ²)	Delik Çıkış çapak alanı (mm ²)
33	0,5	3500	0,10	ALTIN	2,15	75,24	1	1	0,0000	0,0000

Çizelge 4.18’de çıkış delaminasyon faktörünün en düşük olduğu seviyede deney sonuçları görülmektedir. Deney 33 aynı zamanda gri ilişki analizi sonucu optimum parametrelerin ulaşıldığı deneydir. Deney 33 giriş delaminasyonunun en düşük olduğu seviye olarak da bulunmuştur. Delik giriş ve çıkış çapak alanı değeri 0’dır.

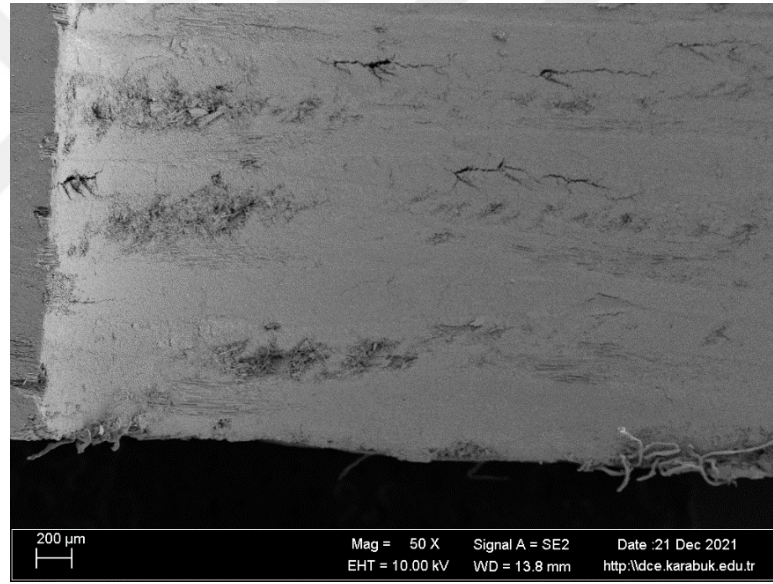


(a)



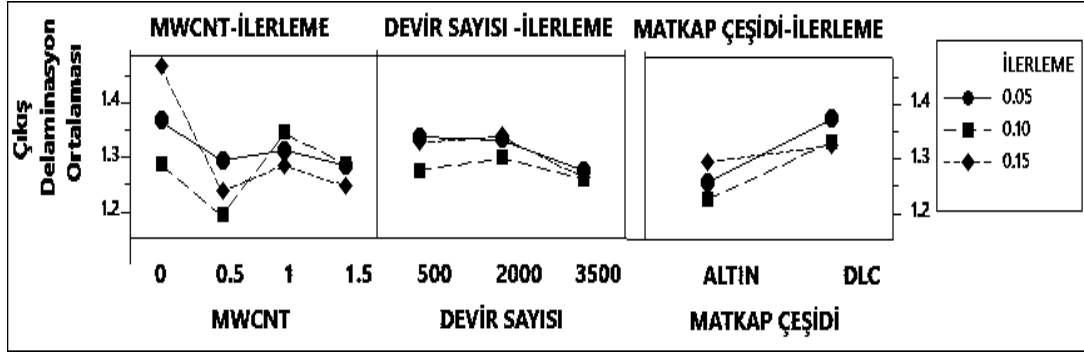
(b)

Şekil 4.35. Deney 33 çıkış delaminasyon faktörünün en düşük olduğu seviyede delik giriş ve çıkıştaki çapak alanı mikroskop görüntüleri a) Delik giriş çapak alanı, b) Delik çıkış çapak alanı



Şekil 4.36. Delik çıkış delaminasyonunun en düşük olduğu (Fdç:1), % 0,5 MWCNT, 3500 dev/dak., 0,10 mm/dev., ALTIN (deney 33) seviyede delik giriş SEM görüntüsü..

Şekil 4.36 delik çıkış delaminasyonunun en düşük olduğu % 0,5 MWCNT, 3500 dev./dak., 0,10 mm/dev., ALTIN matkap çeşidi (Deney 33) seviye değerlerinde SEM görüntüsünden de anlaşılabileceği gibi tabakalar arası ayrılma meydana gelmemiş ve çıkış delaminasyonu oluşmamıştır. Bu durum arayüzey bağının güçlü olmasına dayandırılmıştır.



Şekil 4.37. Çıkış Delaminasyonu Üzerinde Parametreler Arası ilişki Grafiği

Şekil 4.37’de görüldüğü gibi ALTIN kaplamalı matkap çeşidi 0,10 mm/dev. ilerleme oranı değerinde düşük çıkış delaminasyon değerleri göstermiştir. İlerleme değeri 0,15 mm/dev.’de ise çıkış delaminasyon değeri artış göstermiştir. Devir sayısı-matkap çeşidi etkileşiminin çıkış delaminasyonu üzerindeki etkisine bakıldığında devir sayısı arttıkça çıkış delaminasyon değeri düşmüştür. Çıkış delaminasyon faktörünün düşük çıkması için ALTIN kaplamalı matkap kullanılması uygundur. Artan ilerleme oranı ve azalan devir sayısı ile çıkış delaminasyon faktörü büyür. Bu, esas olarak, delme esnasında itme kuvvetindeki artışa yol açan kesme kenarlarının etkisine dayandırılır. İtme kuvveti değerlerinin gösterildiği Şekil 4.22’ye baktığımızda ALTIN kaplamalı matkapta ilerleme oranı düşük seviyede tutulduğunda, itme kuvveti küçülür; yani, deliğin çevresinde daha az hasar oluşur. Dış enerjinin bir kısmı çatlak çekirdeklenmesi ve büyümesi için harcanır; bu nedenle, nihai kopma daha yüksek enerji seviyesinde gerçekleşir. İlerleme oranının artmasıyla kesici kenarların liflere etkisi daha fazladır. Kesme işlemi ve talaş oluşumu için yeterli zaman olmadığından, matkap plakayı kesmek yerine kopararak delecektir. Bu kuvvet daha fazla eğilmeye sebep olur ve sonuç olarak daha fazla tabakalar arası çatlak büyümesi ve çıkış delaminasyonu ile sonuçlanır [150]. Minimum talaş derinliği miktarına karşılık gelen ilerleme oranından daha küçük bir ilerleme oranıyla delme işlemi yapıldığında, takım malzemeyi kesemez ve bu nedenle reçinenin bozunmasına neden olur. Bulunan sonuçlara göre, kesici kenarı inceltirmeden kullanılan büyük çaplı spiral matkap, her zaman kalın bir kompozit plakanın çıkışında delaminasyona neden olur [217].

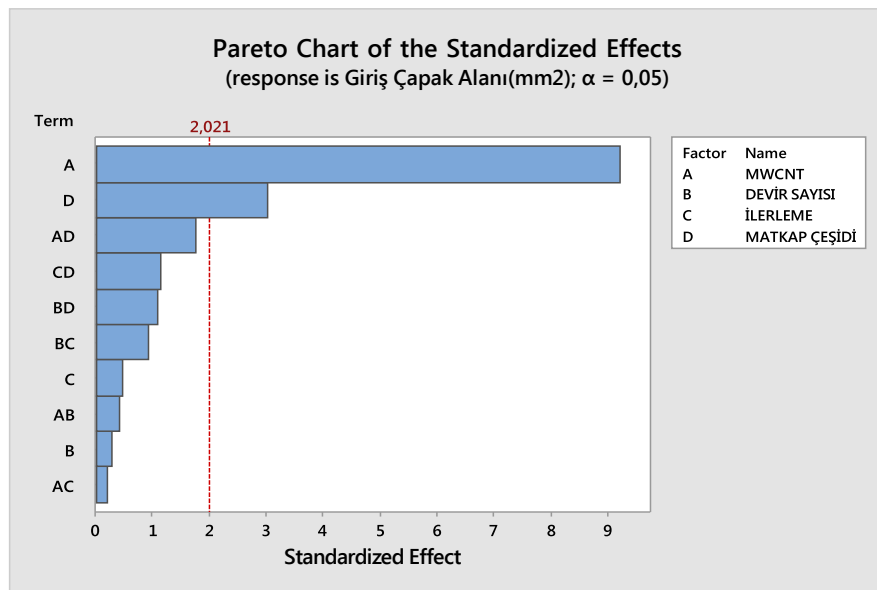
3.6.8. Giriş Çapak Alanı ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Çizelge 4.19. Giriş çapak alanı varyans analizi.

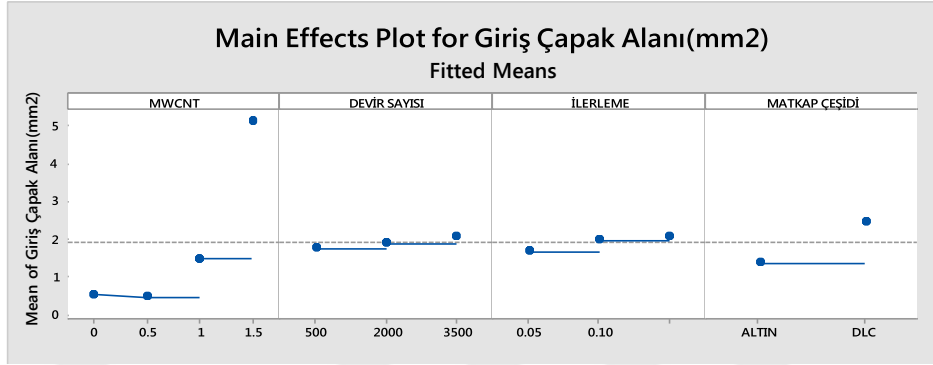
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	31	344,069	11,0990	4,75	0,000
Linear	8	288,959	36,1198	15,46	0,000
MWCNT	3	264,328	88,1094	37,71	0,000
Devir sayısı	2	1,157	0,5786	0,25	0,782
İlerleme oranı	2	2,131	1,0655	0,46	0,637
Matkap çeşidi	1	21,342	21,3422	9,13	0,004
2-Way Interactions	23	55,110	2,3961	1,03	0,460
MWCNT*Devir sayısı	6	9,346	1,5577	0,67	0,677
MWCNT*İlerleme oranı	6	6,183	1,0305	0,44	0,847
MWCNT*Matkap çeşidi	3	16,488	5,4959	2,35	0,087
Devir sayısı*İlerleme	4	10,432	2,6079	1,12	0,362
Devir sayısı*Matkap çeşidi	2	6,146	3,0731	1,32	0,280
İlerleme*Matkap çeşidi	2	6,516	3,2578	1,39	0,260
Error	40	93,458	2,3364		
Total	71	437,527			

Çizelge 4.19’da giriş çapak alanı varyans analizi incelendiğinde giriş çapak alanı üzerinde en büyük etkiyi MWCNT yüzde miktarı sağlamaktadır bunu matkap çeşidi takip etmektedir. Parametreler arası etkileşim giriş çapak alanı üzerinde etkisizdir.

Çizelge 4.20. Giriş çapak alanı üzerinde araştırılan değişkenlerin etkilerinin Pareto grafiği.



Çizelge 4.20’de Pareto grafiğinde görüldüğü gibi giriş çapak alanı üzerinde güçlü etkileri olan parametreler görülmektedir. Giriş çapak alanı üzerinde en büyük etkiyi MWCNT yüzde miktarı ve matkap çeşidi göstermiştir.



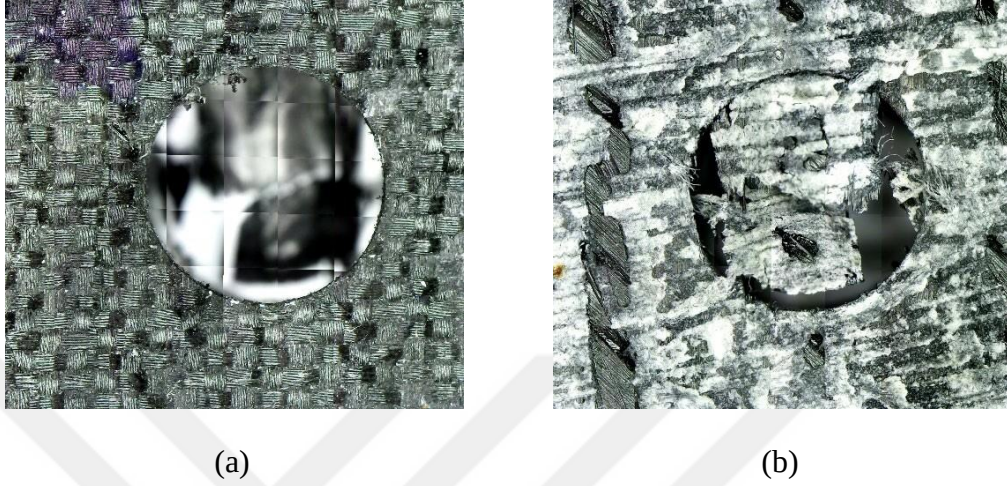
Şekil 4.38. Giriş çapak alanı yanıt tablosu.

Şekil 4.38’de en düşük en iyidir yaklaşımıyla yapılan optimizasyona göre giriş çapak alanının en düşük olduğu seviyeler % 0,5 MWCNT, devir sayısında 500 dev./dak., ilerleme oranında 0,05 mm./dev. ve matkap çeşidinde ALTIN kaplamalı matkap çeşididir.

Çizelge 4.21. Giriş çapak alanı optimum parametrelerine göre elde edilen deney sonuçları.

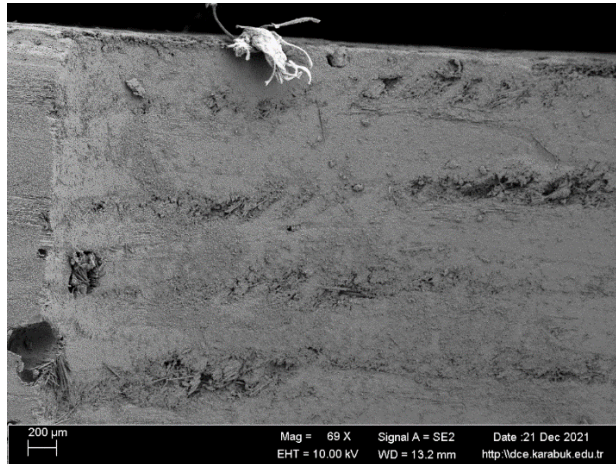
Delik Çıkış çapak alanı (mm ²)	18,8720
Delik Giriş Çapak alanı (mm ²)	0,2000
Çıkış Delaminasyon Faktörü (Fd çıkış)	1,3
Giriş Delaminasyon Faktörü(Fdgiris)	1,04
İtme kuvveti (N)	14,89
Ra (µm)	1,41
Matkap çeşidi	ALTIN
İlerleme (mm/dev)	0,05
Devir Sayısı (dev./dak.)	500
MWCNT (%)	0,5
Deney No	19

Çizelge 4.21’de giriş çapak alanı optimum parametrelerine göre elde edilen deney sonuçları verilmiştir. Delik giriş alanı seviyesinin en düşük olduğu seviyede çıkış delaminasyonu ve delik çıkış çapak alanı yüksek çıkmıştır.

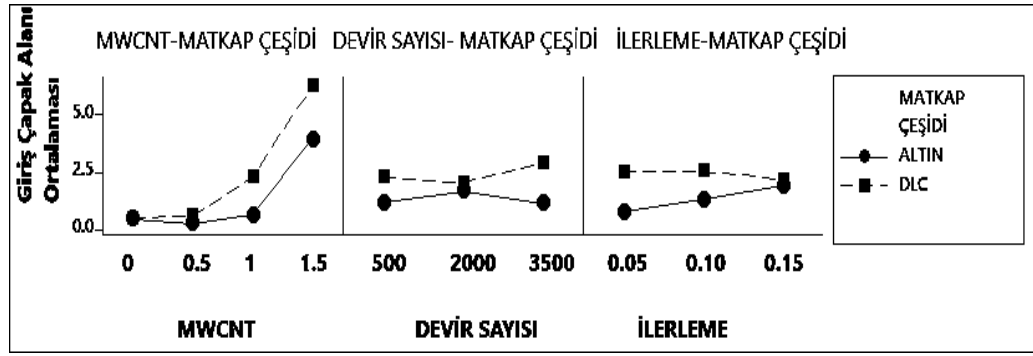


Şekil 4.39. Deney 19 giriş çapak alanı en düşük olduğu seviyede %0.5 MWCNT,500dev./dak,0.05 mm/dev.,ALTIN matkap çeşidinde delik giriş ve çıkıştaki çapak alanı mikroskop görüntüleri a) Delik giriş çapak alanı, b) Delik çıkış çapak alanı.

Şekil 4.39’da delik girişindeki çapak alanının küçük, çıkışta ise daha büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.40. Deney 19 giriş çapak alanı en düşük olduğu seviyede % 0,5 MWCNT, 500dev./dak, 0,05 mm/dev., ALTIN matkap çeşidinde delik içi SEM görüntüsü.



Şekil 4.41.Giriş çapak alanı üzerinde parametreler arası ilişki grafiği.

Yapılan varyans analizinde faktörler arası etkileşiminin giriş çapak alanı üzerinde etkisinin önemsiz olduğu bulunmuştur. Şekil 4.41’de görüldüğü gibi % 0,5 içerikli MWCNT plakada ALTIN kaplamalı matkap kullanılarak en düşük giriş çapak alanı değerine ulaşılmıştır.

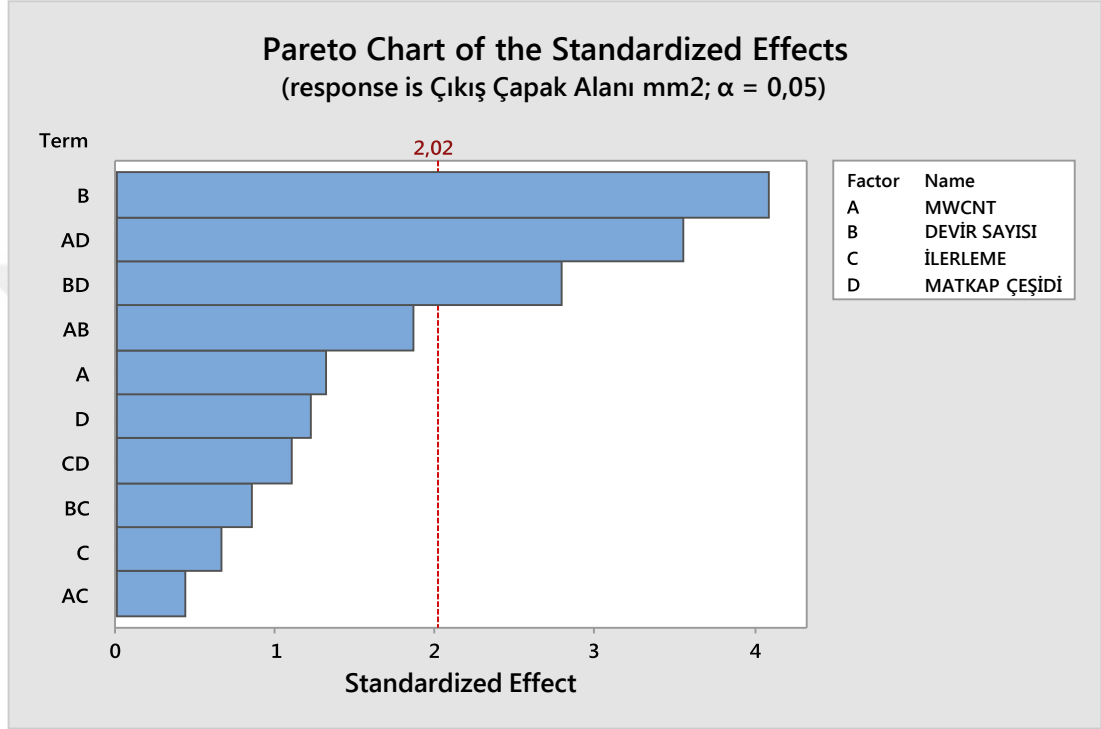
3.6.9. Çıkış Çapak Alanı Varyans Analizi ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Çizelge 4.22. Çıkış çapak alanı varyans analizi.

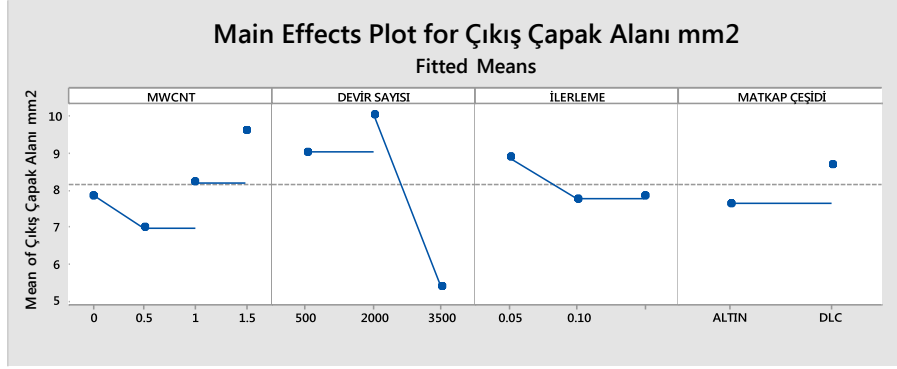
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	31	1140,87	36,802	2,68	0,002
Linear	8	395,57	49,446	3,61	0,003
MWCNT	3	67,02	22,339	1,63	0,198
Devir sayısı	2	289,74	144,869	10,57	0,000
İlerleme oranı	2	18,51	9,254	0,68	0,515
Matkap çeşidi	1	20,31	20,306	1,48	0,231
2-Way Interactions	23	745,30	32,404	2,36	0,008
MWCNT*Devir sayısı	6	175,35	29,225	2,13	0,071
MWCNT*İlerleme oranı	6	55,50	9,250	0,67	0,671
MWCNT*Matkap çeşidi	3	271,72	90,573	6,61	0,001
Devir sayısı *İlerleme oranı	4	56,97	14,243	1,04	0,399
Devir sayısı*Matkap çeşidi	2	149,28	74,641	5,45	0,008
İlerleme oranı*Matkap çeşidi	2	36,47	18,236	1,33	0,276
Error	40	548,28	13,707		
Total	71	1689,15			

Çizelge 4.22'ye baktığımızda çıkış çapak alanını etkileyen en önemli faktör devir sayısıdır. Faktörler arasındaki etkileşimde ise MWCNT-matkap çeşidi etkileşiminin çıkış çapak alanı üzerinde etkisi olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.23 . Çıkış çapak alanı üzerinde araştırılan değişkenlerin etkilerinin Pareto grafiği.



Çizelge 4.23'deki Pareto grafiğinde görüldüğü çıkış çapak alanı üzerinde güçlü etkileri olan parametreler görülmektedir. Çıkış çapak alanı üzerinde en büyük etkiyi devir sayısı sağlamaktadır. MWCNT - matkap çeşidi arasındaki etkileşim ve devir sayısı - matkap çeşidi arasındaki etkileşim kuvvetlidir bu durum çıkış çapak alanını etkilemektedir.



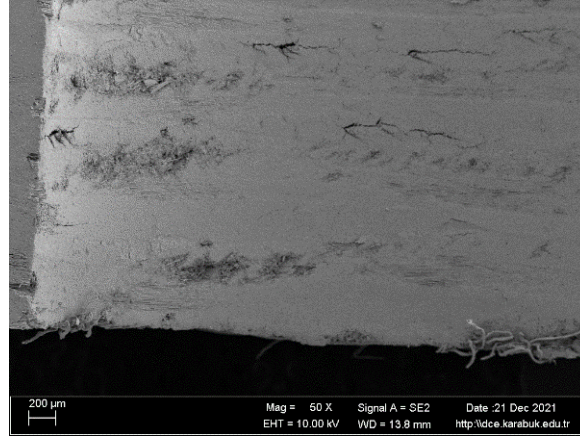
Şekil 4.42. Çıkış çapak alanı yanıt tablosu

Şekil 4.42'ye baktığımızda en düşük en iyidir yaklaşımıyla yapılan optimizasyona göre çıkış çapak alanının en düşük olduğu seviyeler % 0,5 MWCNT, 3500 dev./dak. devir sayısı, 0,10 mm/dev. ilerleme oranı ve ALTIN kaplamalı matkap çeşididir.

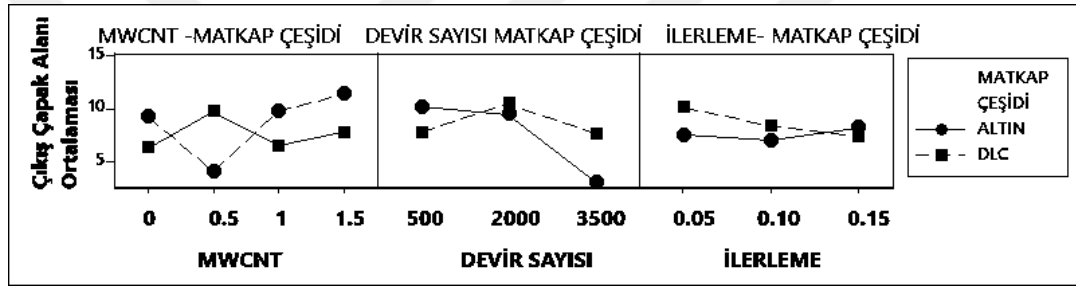
Çizelge 4.24. Delik çıkış çapak alanı optimum parametrelerine göre elde edilen deney sonuçları.

Deney No	MWCNT (%)	Devir Sayısı (dev./dak.)	İlerleme (mm/dev)	Matkap çeşidi	Ra (µm)	İtme kuvveti (N)	Giriş Delaminasyon Faktörü(Fdgiriş)	Çıkış Delaminasyon Faktörü (Fd çıkış)	Delik Giriş Çapak alanı (mm²)	Delik Çıkış çapak alanı (mm²)
33	0,5	3500	0,10	ALTIN	2,15	75,24	1	1	0,0000	0,0000

Çizelge 4.24'de delik çıkış çapak alanı optimum parametrelerine göre elde edilen deney sonuçlarını göstermektedir. Buna göre delik çıkış çapak alanı değerinin en düşük olduğu seviyede delik giriş çapak alanı ve delaminasyon değerleri düşük çıkmıştır. Deney 33 gri ilişki analizinde optimum parametrelerin elde edildiği deneydir. Aynı zamanda giriş ve çıkış delaminasyon faktörlerinin de en düşük olduğu deneydir.



Şekil 4.43. Çıkış çapak alanının en küçük olduğu % 0,5 MWCNT, 3500 dev/dak., 0,10 mm/dev., ALTIN (deney 33) seviyede delik çıkış alanı SEM görüntüsü.



Şekil 4.44. Çıkış çapak alanı üzerinde parametreler arası ilişki grafiği.

Şekil 4.44’de devir sayısı-Matkap çeşidi etkileşimine bakıldığında ALTIN kaplamalı matkapta devir sayısı arttıkça çıkış çapak alanı azalmıştır.

BÖLÜM 5

SONUÇ

Bu çalışma, MWCNT'lerin % 0,5, % 1 ve % 1,5 ağırlık oranlarının kıvrımsız kumaş CFRP kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Elde edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Triton X-100 sürfaktanın çözeltiye ilavesinde sürfaktanın çözelti hacmine oranı 0,13 mg/ml olarak belirlenmiştir bu değerin kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.
- MWCNT'ün epoksi reçine içerisinde homojen dispersiyonunda etanol kullanılmasının ve Triton X-100 kullanılmasının etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Çözeltinin Ultrasonik karıştırıcı içerisinde % 80 genlik değerinde sabit tutularak, 30 C° -35 C° sıcaklık aralığında 10 saat karıştırma yönteminin MWCNT 'ün homojen dispersiyonunda etkili olduğu sonucuna varılmıştır.
- % 0,5 MWCNT'ün absorbens değerinin 330 nm dalga boyunda diğer konsantrasyonlardan daha yüksek olduğunu bulunmuştur. Bu durum çözelti içerisinde bireysel nanotüp miktarının fazla olduğunun kanıtıdır. Homojen dağılım sağlanmıştır.
- MWCNT'ler fonksiyonel eştirilmiş ve sürfaktan ile muamele edilmiş olsa da, yüksek konsantrasyonlarda MWCNT'ler aglomera olmaktadır.
- Sonuç olarak, % 1 ve % 1,5 MWCNT içeren çözeltinin absorbens spektrumu düşüktür. Çekme dayanımı ile absorbens spektrumu arasındaki ilişki homojen dağılımın önemini göstermektedir.

- % 0.5'lik MWCNT konsantrasyonuna sahip olan nanokompozit, saf NCF CFRP kompozit ile karşılaştırıldığında daha yüksek çekme dayanımına ve kopma gerinimine sahiptir. % 1 ve % 1,5 MWCNT'ye sahip kompozitler daha düşük çekme dayanımına ve kopma gerinimine sahiptir.
- En yüksek eğilme yorulma ömrü değeri % 0,5 MWCNT içerikli NCF CFRP kompozit malzemede elde edilmiş, bunu sırasıyla saf NCF CFRP, % 1,5 MWCNT içerikli NCF CFRP ve % 1,0 MWCNT içerikli NCF CFRP izlemiştir.
- Ağırlıkça % 0,5 MWCNT içeren nanokompozit malzeme, çatlak oluşumu ve ilerlemesi engellendiği için daha yüksek bir eğme yorulma dayanımı değeri sergilemiştir.
- Deneysel sonuçlar, düşük MWCNT konsantrasyonlarının NCF CFRP kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerinde iyileştirici bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.
- MWCNT içerikli NCF CFRP kompozit malzemenin delme işlemi sürecini optimize etmek için tam faktöriyel tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi uygulanmıştır.
- Delik üzerinde yüzey pürüzlülüğü, itme kuvveti, giriş delaminasyon faktörü, çıkış delaminasyon faktörü, giriş çapak alanı ve çıkış çapak alanı gibi çok sayıda performans özelliklerinin değerlendirilmesinde gri ilişki analiz yöntemi incelenmiştir. Buna göre Gri ilişki derecesinin en yüksek değeri 0,88 olarak bulunmuştur, yapılan sıralamada bu sonuç 1'e karşılık gelmektedir, aynı zamanda bu değer deney no 33'e işaret etmektedir
- Birden fazla performans elde ederek en iyi delik kalitesine ulaşmak için yapılan gri ilişki analizi yönteminde optimum parametre seviyeleri % 0,5 MWCNT, 0,10 mm/dev. ilerleme oranı, 3500 dev./dak devir sayısı ve ALTIN kaplamalı matkap çeşidi olarak bulunmuştur.

- Gri ilişki analiz yönteminde optimum parametre seviyelerine karşılık gelen delme işlemi sonuçları; Yüzey Pürüzlülüğünde Ra değeri 2,15 μm , itme kuvveti 75,24 N, giriş delaminasyon faktörü 1, çıkış delaminasyon faktörü 1'dir. Delik giriş ve çıkışında çapak alanına rastlanılmamıştır.
- Yapılan delme deneylerinde % 1 ve % 1,5 MWCNT içerikli NCF CFRP kompozitlere kıyasla en iyi performansı (itme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, delik giriş delaminasyonu, delik çıkış delaminasyonu, delik giriş çapak alanı ve delik çıkış çapak alanı) sağlayan % 0,5 MWCNT içerikli NCF CFRP nanokompozit malzeme olmuştur. % 0,5 MWCNT ilavesi NCF CFRP kompozitin çekme dayanımı ve yorulma dayanımını artırmıştır bu durumun delme performansını da artırdığı sonucuna varılmıştır. % 1 ve % 1,5 MWCNT ilavesinin ise aglomerasyona sebep olarak malzemenin dayanımını azaltarak delme performansının da düşmesine sebep olduğu sonucuna varılmıştır.
- Ful faktöriyel yönteme göre; İtme kuvveti için yapılan optimizasyona göre optimum parametre seviyeleri MWCNT yüzde miktarında % 0,5, devir sayısında 500 dev./dak., ilerleme oranında 0,05 mm/dev., matkap çeşidinde ise DLC kaplamalı matkap olmuştur, itme kuvveti değeri 4,95 N olarak bulunmuştur.
- Ful faktöriyel yönteme göre; İtme kuvvetinin en düşük olduğu seviyelerde yüzey pürüzlülük değeri (5,5 μm), giriş delaminasyon faktörü (1,25) ve çıkış delaminasyon faktörü (1,2) yüksek değerlerde bulunmuştur. Delik giriş ve çıkışında da çapaklar görülmüştür. Delik giriş çapak alanı 0,0620 mm², delik çıkış çapak alanı 3,500 mm² 'dir.
- İtme kuvveti için yapılan varyans analizine göre itme kuvveti üzerinde en etkili parametreler devir sayısı, ilerleme oranı ve matkap çeşididir. Parametreler arası etkileşimlere baktığımızda İlerleme oranı - matkap çeşidi, devir sayısı-matkap çeşidi etkileşiminin itme kuvveti üzerinde etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Matkap çeşidi ve ilerleme arasındaki etkileşime göre en düşük itme kuvveti değeri DLC matkapta en düşük ilerleme oranında 0,05 mm/dev. ulaşılmıştır.

Devir sayısı –Matkap çeşidi etkileşiminde en düşük itme kuvveti DLC matkapta 500 dev./dak. devir sayısında görülmüştür. DLC matkapta devir sayısı arttıkça itme kuvveti hafif artışlar göstermiştir. Devir sayısı ve ilerleme oranı arasındaki etkileşimde ise devir sayısı ve ilerleme artıkça itme kuvveti değerleri, artmıştır. Düşük itme kuvveti değerleri düşük ilerleme oranı ve düşük devir sayısında görülmüştür. DLC matkabin ALTIN matkaba kıyasla itme kuvvetlerinin düşük olmasında takım geometrisi önem taşımaktadır. DLC matkapta itme kuvvetinin artmasına sebep olan radyal ağız bulunmamaktadır.

- Ful faktöriyel yönteme göre; yüzey pürüzlülüğü için yapılan optimizasyona göre uygun parametre seviyeleri MWCNT yüzde miktarında % 0,5, devir sayısında 500 dev./dak., ilerleme oranında 0,15 mm/dev., matkap çeşidinde ise ALTIN kaplamalı matkap olmuştur. DLC matkap ile delinen deliklerin yüzey pürüzlülük değerleri ALTIN matkaba kıyasla daha yüksek çıkmıştır. DLC matkap yüzeyi incelendiğinde matkap yanak yüzeyi ve kesici kenarlar üzerinde matris yapışmasından kaynaklı kalıntılara rastlanmıştır. Bu durum delik yüzeylerinin pürüzlülüğünü artırmıştır.
- Ful faktöriyel yönteme göre; yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu seviyede (R_a 1,70 μ m) çıkış delaminasyon faktörü değeri (1,30) ve delik çıkış çapak alanı (17,4820 mm²) yüksek çıkmıştır.
- Yüzey pürüzlülüğü için yapılan varyans analizine göre yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametreler matkap Çeşidi ve MWCNT yüzde miktarıdır. MWCNT yüzde miktarı ile matkap çeşidinin etkileşimi de yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkilidir. MWCNT yüzde miktarı ile matkap çeşidi etkileşiminde % 0,5 MWCNT yüzde miktarında ALTIN matkap kullanılmasıyla yüzey pürüzlülük değerleri düşük çıkmıştır.
- Ful faktöriyel yönteme göre; giriş delaminasyonu için yapılan optimizasyona göre optimum parametre seviyeleri % 0,5 MWCNT yüzde miktarı, 3500 dev./dak., 0,01 mm/dev. ilerleme oranı, ALTIN kaplamalı matkap çeşididir.

- Ful faktöriyel yönteme göre giriş delaminasyon faktörünün en düşük olduğu durumda diğer sonuçlara da bakıldığında çıkış delaminasyonu oluşmamıştır sonucun 1 olduğu görülmüştür. Giriş ve çıkış çapak alanları 0'dır. Çapak oluşmamıştır. Giriş delaminasyonunun en düşük çıktığı Deney 33 aynı zamanda gri ilişki analizi sonucu optimum parametrelerin ulaşıldığı deneydir.
- Giriş delaminasyonunu için yapılan varyans analizine göre giriş delaminasyonunu en etkileyen önemli parametreler MWCNT 'ün yüzde miktarı ve Matkap çeşididir. Parametreler arası etkileşimlerde ise MWCNT yüzde miktarı-Matkap çeşidinin ve MWCNT-ilerleme oranı etkileşimi giriş delaminasyonu üzerinde etkilidir. MWCNT-Matkap çeşidi arasındaki etkileşim kuvvetlidir buna göre % 0,5 MWCNT plaka, ALTIN kaplamalı matkapla en düşük giriş delaminasyon değerine ulaşılmıştır.
- Ful faktöriyel yönteme göre çıkış delaminasyonunun en düşük olduğu seviyeler % 0,5 MWCNT, 3500 dev./dak. devir sayısı, 0,10 mm/dev. ilerleme oranı ve ALTIN kaplamalı matkap çeşididir.
- Ful faktöriyel yönteme göre; çıkış delaminasyon faktörünün en düşük olduğu seviyede giriş delaminasyonu, giriş ve çıkış çapak alanları oluşmamıştır. Çıkış delaminasyonunun en düşük olduğu Deney 33 aynı zamanda gri ilişki analizi sonucu optimum parametrelerin ulaşıldığı deneydir. Deney 33 giriş delaminasyonunun en düşük olduğu seviye olarak da bulunmuştur. Delik giriş ve çıkış çapak alanı değeri 0'dır.
- Varyans analizinde görüldüğü gibi çıkış delaminasyonu üzerinde en büyük etkiyi Matkap çeşidi ve MWCNT yüzde miktarı sağlamaktadır. MWCNT - Matkap çeşidi ve MWCNT yüzde miktarı-ilerleme arasındaki etkileşim kuvvetlidir, bu durum çıkış delaminasyonu üzerinde önemli etkiye sebep olmaktadır. ALTIN kaplamalı matkap 0,10 mm/dev. ilerleme değerinde düşük çıkış delaminasyon değerleri göstermiştir. İlerleme değeri 0,15 mm/dev.'de ise çıkış delaminasyon değeri artış göstermiştir. Devir sayısı-Matkap çeşidi etkileşiminin çıkış delaminasyonu üzerindeki etkisine bakıldığında devir sayısı

arttıkça çıkış delaminasyon değeri düşmüştür. Çıkış delaminasyon faktörünün düşük çıkması için ALTIN kaplamalı matkap kullanılması uygundur. Artan ilerleme oranı ve azalan devir sayısı ile çıkış delaminasyon faktörü büyür.

- Ful faktöriyel yönteme göre; giriş çapak alanının en düşük parametre seviyeleri % 0,5 MWCNT, devir sayısında 500 dev./dak., ilerleme oranında 0,05 mm./dev. ve matkap çeşidinde ALTIN kaplamalı matkap çeşididir.
- Giriş çapak alanı varyans analizi incelendiğinde giriş çapak alanı üzerinde en büyük etkiyi MWCNT yüzde miktarı sağlamaktadır bunu Matkap çeşidi takip etmektedir. Parametreler arası etkileşim giriş çapak alanı üzerinde etkisizdir.
- Ful faktöriyel yönteme göre; delik giriş alanı seviyesinin en düşük olduğu seviyede çıkış delaminasyonu (1,3) ve delik çıkış çapak alanı (18,87 mm²) yüksek çıkmıştır. Ra değeri 1,41, İtme kuvveti değeri 14,89 N, giriş delaminasyon faktörü 1,04, giriş çapak alanı 0,2 mm² 'dir.
- Ful faktöriyel yönteme göre; çıkış çapak alanının en düşük olduğu parametre seviyeleri % 0,5 MWCNT, 3500 dev./dak. devir sayısı, 0,10 mm/dev. ilerleme oranı ve ALTIN kaplamalı matkap çeşididir.
- Ful faktöriyel yönteme göre ; delik çıkış çapak alanı değerinin en düşük olduğu seviyede delik giriş çapak alanı (0 mm²), giriş ve çıkış delaminasyon değerleri (1) düşük çıkmıştır. Yüzey pürüzlülük değeri Ra 2,15 µm, itme kuvveti 75,24 N bulunmuştur. Deney 33 gri ilişki analizinde optimum parametrelerin elde edildiği deneydir. Aynı zamanda giriş ve çıkış delaminasyon faktörlerinin de en düşük olduğu deneydir.

KAYNAKLAR

1. Aydın, M. R., "Grafen Nanopartikül ve Karbon Nanotüp Katkılı Elyaf Polimer Kompozitlerin Serbest Titreşim ve Burkulma Analizi", (September): 14–17 (2015).
2. Oğuzcan İnal, "Kıvrımsız Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Plakalarda Civata Bağlantılarının Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi", **Balıkesir University Fen Bilimleri Enstitüsü**, (2017).
3. Zaman, I., Phan, T. T., Kuan, H. C., Meng, Q., Bao La, L. T., Luong, L., Youssf, O., and Ma, J., "Epoxy/graphene platelets nanocomposites with two levels of interface strength", **Polymer**, 52 (7): 1603–1611 (2011).
4. Treacy, M. M. J., Ebbesen, T. W., and Gibson, J. M., "Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes", **Nature**, 381: 678–680 (1996).
5. Small, J. P., Shi, L., and Kim, P., "Mesoscopic thermal and thermoelectric measurements of individual carbon nanotubes", **Solid State Communications**, 127 (2): 181–186 (2003).
6. Ajayan, P. M., Stephan, O., Colliex, C., and Trauth, D., "Aligned carbon nanotube arrays formed by cutting a polymer resin-nanotube composite", **Science**, 265: 1212–1214 (1994).
7. Makhadmeh, F., "Ultrasonically-assisted drilling of carbon fibre-reinforced plastics", **Loughborough University**, (214AD).
8. Fu, S., Wu, P., and Han, Z., "Tensile strength and rupture energy of hybrid poly(methylvinylsiloxane) composites reinforced with short PET fibers and wollastonite whiskers", **Composites Science And Technology**, 62 (1): 3–8 (2002).
9. Sheikh-Ahmad JY, "Machining of Polymer Composite", **Springer**, Newyork,USA, (2009).
10. Galioğlu Atıcı, O., "Yüzey Aktif Maddeler", Yüzey Aktif Maddeler Kimyası ve Endüstriyel Uygulamaları, İTÜ Vakfı. Ed., İstanbul, 1–19 (1991).
11. Gemici, R., "Çeşitli Sürfaktan Karışımlarının Yüzey Gerilim Ölçümlerinin ve DNA Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması", **Selçuk Üniversitesi**, (2011).

12. Rezazadeh, V., Pourhossaini, M. R., and Salimi, A., "Effect of amine-functionalized dispersant on cure and electrical properties of carbon nanotube/epoxy nanocomposites", ***Progress In Organic Coatings***, 111 (2017): 389–394 (2017).
13. Geng, Y., Liu, M. Y., Li, J., Shi, X. M., and Kim, J. K., "Effects of surfactant treatment on mechanical and electrical properties of CNT/epoxy nanocomposites", ***Composites Part A: Applied Science And Manufacturing***, 39 (12): 1876–1883 (2008).
14. Zhao, L. and Gao, L., "Stability of multi-walled carbon nanotubes dispersion with copolymer in ethanol", ***Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects***, 224 (1–3): 127–134 (2003).
15. Njuguna, J., Vanli, O. A., and Liang, R., "A Review of Spectral Methods for Dispersion Characterization of Carbon Nanotubes in Aqueous Suspensions", ***Journal Of Spectroscopy***, 2015: 1–11 (2015).
16. Yu, J., Grossiord, N., Koning, C. E., and Loos, J., "Controlling the dispersion of multi-wall carbon nanotubes in aqueous surfactant solution", ***Carbon***, 45 (3): 618–623 (2007).
17. Rastogi, R., Kaushal, R., Tripathi, S. K., Sharma, A. L., Kaur, I., and Bharadwaj, L. M., "Comparative study of carbon nanotube dispersion using surfactants", ***Journal Of Colloid And Interface Science***, 328 (2): 421–428 (2008).
18. Habibnejad Korayem, A., Barati, M. R., Simon, G. P., Williams, T., Zhao, X. L., Stroeve, P., and Duan, W. H., "Transition and stability of copolymer adsorption morphologies on the surface of carbon nanotubes and implications on their dispersion", ***Langmuir***, 30 (33): 10035–10042 (2014).
19. Gong, X., Liu, J., Baskaran, S., Voise, R. D., and Young, J. S., "Surfactant-Assisted Processing of Carbon Nanotube/Polymer Composites", ***Chemistry Of Materials***, 12 (4): 1049–1052 (2000).
20. H. Yıldırım ERBİL, "Surface Chemistry Solid and Liquid Interfaces", ***Wiley-Blackwell***, 366 (2006).
21. Altin Karataş, M. and Gökkaya, H., "A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials", ***Defence Technology***, 14 (4): 318–326 (2018).
22. Berg, K. R., "Typical Properties for Advanced Composites", Chapman & Hall, 1118 (1998).
23. Gibson, R. F., "A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures", ***Composite Structures***, 92 (12): 2793–2810 (2010).

24. Hyer, M.W; White, S. R., "Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials", **DEStech**, Pennsylvania, 1–695 (2011).
25. Bru, T., Hellström, P., Gutkin, R., Ramantani, D., and Peterson, G., "Characterisation of the mechanical and fracture properties of a uni-weave carbon fibre/epoxy non-crimp fabric composite", **Data In Brief**, 6: 680–695 (2016).
26. Bedi, H. S., Tiwari, M., and Agnihotri, P. K., "Quantitative determination of size and properties of interphase in carbon nanotube based multiscale composites", **Carbon**, 132: 181–190 (2018).
27. Guignier, C., Bueno, M. A., Camillieri, B., and Durand, B., "Influence of composite processing on the properties of CNT grown on carbon surfaces", **Applied Surface Science**, 428: 835–843 (2018).
28. Gao, B., Zhang, R., Gao, F., He, M., Wang, C., Liu, L., Zhao, L., and Cui, H., "Interfacial Microstructure and Enhanced Mechanical Properties of Carbon Fiber Composites Caused by Growing Generation 1–4 Dendritic Poly(amidoamine) on a Fiber Surface", **Langmuir**, 32 (33): 8339–8349 (2016).
29. Yao, Z., Wang, C., Lu, R., Su, S., Qin, J., Wang, Y., Ma, Z., Wei, H., and Wang, Q., "Fracture investigation of functionalized carbon nanotubes-grown carbon fiber fabrics/epoxy composites", **Composites Science And Technology**, 195: 108161 (2020).
30. Kim, Jang-Kyo, Y. W. M., "Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites", **Elsevier**, Oxford, UK, 1–85 (1998).
31. Liu, Y., "Nano - Reinforced Epoxy Resin for Carbon Fibre Fabric Composites", 280 (2016).
32. Lomov, S.V., Truong Chi, T. and Verpoest, I., "Mechanical properties of non-crimp fabric (NCF) based composites: stiffness and strength", Non-Crimp Fabric Composites, **Woodhead Publishing Limited**, 263–288 (2011).
33. Middendorf, P. and Metzner, C., "Aerospace applications of non-crimp fabric composites", Non-Crimp Fabric Composites, **Elsevier**, 441-449e (2011).
34. Lomov, S. V., "Non-Crimp Fabric Composites: Manufacturing, Properties and Applications", **Woodhead**, Cambridge, 1–523 (2011).
35. Dumont, F. and Weimer, C., "Non-crimp fabric: preforming analysis for helicopter applications", Non-Crimp Fabric Composites, **Elsevier**, 13, 449–460 (2011).
36. Martin Derks, F. B., "CFK-Technologie bei der BMW Group - Heute / Zukunft", **Kunststoffe Im Automobilbau**, (2007).

37. Sköck-Hartmann, B. and Gries, T., "Automotive applications of non-crimp fabric composites", Non-Crimp Fabric Composites, **Woodhead Publishing Limited**, 461–480 (2011).
38. Deinzer, G. , Reim, H. , Hermes, C., Schneidewind, T., Masini, A. and Enz, J., "Class A mit CFK – Beispiel Heckklappe Gallardo Spyder", **Kunststoffe Im Automobilbau**, (2007).
39. Adolphs, G. and Skinner, C., "Non-crimp fabric composites in wind turbines", Non-Crimp Fabric Composites, **Woodhead Publishing Limited**, 481–493 (2011).
40. Gkikas, G., Barkoula, N.-M., and Paipetis, A. S., "Effect of dispersion conditions on the thermo-mechanical and toughness properties of multi walled carbon nanotubes-reinforced epoxy", **Composites Part B: Engineering**, 43 (6): 2697–2705 (2012).
41. Al-Safy, R., Al-Mahaidi, R., and Simon, G. P., "Investigation of thermo-mechanical properties of adhesive used for bonding CF fabrics to concrete members using post-curing techniques", **Composites Part B: Engineering**, 43 (8): 2950–2959 (2012).
42. Lubin George, "Handbook of Composites", **Van Nostrand Reinhold**, U.S.A, (1982).
43. Ehrburgeral, P. and Donnet, J. B. ., "Interface in Composite Materials", **Phil. Trans. R. Soc. London A294**, 495–505 (1980).
44. Donnet, J. B. and G. G. ., "Surface Characterisation of Carbon Fibre Composites;", **Composites**, 22 (1): 59–62 (1989).
45. Kutucu, B., "Nanoteknoloji ve Çift Duvarlı Karbon Naotüplerin İncelenmesi", **İstanbul Teknik Üniversitesi**, (2010).
46. Hancer, S., "Çift Duvarlı Karbon Nanotüplerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", **İstanbul Teknik Üniversitesi**, (2010).
47. Balasubramanian, K. and and Burghard, M., "Chemically functionalized carbon nanotubes", **Small**, 1 (2): 180–192 (2005).
48. Iijima, S., "Helical microtubules of graphitic carbon", **Nature**, 354 (6348): 56–58 (1991).
49. Jeong, H. J., Kim, K. K., Jeong, S. Y., Park, M. H., Yang, C. W., and Lee, Y. H., "High-yield catalytic synthesis of thin multiwalled carbon nanotubes", **Journal Of Physical Chemistry B**, 108 (46): 17695–17698 (2004).
50. Kim, D. Y., Yang, C. M., Park, Y. S., Kim, K. K., Jeong, S. Y., Han, J. H., and Lee, Y. H., "Characterization of thin multi-walled carbon nanotubes synthesized by catalytic chemical vapor deposition", **Chemical Physics Letters**, 413 (1–3): 135–141 (2005).

51. Govindaraj, A. and Rao, C. N. R., "Synthesis, growth mechanism and processing of carbon nanotubes", *Carbon Nanotechnology*, 15–51 (2006).
52. Ayatollahi, M. R., Shadlou, S., Shokrieh, M. M., and Chitsazzadeh, M., "Effect of multi-walled carbon nanotube aspect ratio on mechanical and electrical properties of epoxy-based nanocomposites", *Polymer Testing*, 30 (5): 548–556 (2011).
53. Ebbesen, T. W., "Carbonnanotubes", *Annual Review Of Materials Science*, 24: 235–264 (1994).
54. Mintmire, J. W., Dunlap, B. I., and White, C. T., "Are fullerene tubulesmetallic?", *Physical Review Letters*, 631–634: (1992).
55. Li, C., Thostenson, E. T., and Chou, T.-W., "Effect of nanotube waviness on the electrical conductivity of carbon nanotube-based composites", *Composites Science And Technology*, 68 (6): 1445–1452 (2008).
56. Mitchell, C. A. and Krishnamoorti, R., "Dispersion of single-walled carbon nanotubes in poly(ϵ -caprolactone)", *Macromolecules*, 40 (5): 1538–1545 (2007).
57. Wagner, H. D., "Raman spectroscopy of polymer–carbon nanotube composites", *Polymer–Carbon Nanotube Composites*, 1. Ed., **Woodhead**, Cambridge, 400–427 (2011).
58. Qian, D., Dickey, E. C., Andrews, R., and Rantell, T., "Load transfer and deformation mechanisms in carbon nanotube-polystyrene composites", *Applied Physics Letters*, 76 (20): 2868–2870 (2000).
59. Krishnamoorti, R. and Vaia, R. A., "Polymer nanocomposites", *Journal Of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 45 (24): 3252–3256 (2007).
60. Zakaria, M. R., Abdul Kudus, M. H., Md. Akil, H., and Mohd Thirmizir, M. Z., "Comparative study of graphene nanoparticle and multiwall carbon nanotube filled epoxy nanocomposites based on mechanical, thermal and dielectric properties", *Composites Part B: Engineering*, 119: 57–66 (2017).
61. Korayem, A. H., Barati, M. R., Chen, S. J., Simon, G. P., Zhao, X. L., and Duan, W. H., "Optimizing the degree of carbon nanotube dispersion in a solvent for producing reinforced epoxy matrices", *Powder Technology*, 284: 541–550 (2015).
62. Guo, J., Zhang, Q., Gao, L., Zhong, W., Sui, G., and Yang, X., "Significantly improved electrical and interlaminar mechanical properties of carbon fiber laminated composites by using special carbon nanotube pre-dispersion mixture", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 95: 294–303 (2017).

63. Ma, P. C., Mo, S. Y., Tang, B. Z., and Kim, J. K., "Dispersion, interfacial interaction and re-agglomeration of functionalized carbon nanotubes in epoxy composites", **Carbon**, 48 (6): 1824–1834 (2010).
64. Ma, P. C., Kim, J. K., and Tang, B. Z., "Functionalization of carbon nanotubes using a silane coupling agent", **Carbon**, 44 (15): 3232–3238 (2006).
65. Ma, P. C., Kim, J.-K., and Tang, B. Z., "Effects of silane functionalization on the properties of carbon nanotube/epoxy nanocomposites", **Composites Science And Technology**, 67 (14): 2965–2972 (2007).
66. Montazeri, A. and Chitsazzadeh, M., "Effect of sonication parameters on the mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites", **Materials & Design (1980-2015)**, 56: 500–508 (2014).
67. Bottini, M., Bruckner, S., Nika, K., Bottini, N., Bellucci, S., Magrini, A., Bergamaschi, A., and Mustelin, T., "Multi-walled carbon nanotubes induce T lymphocyte apoptosis", **Toxicology Letters**, 160 (2): 121–126 (2006).
68. Gojny, F. H., Nastalczyk, J., Roslaniec, Z., and Schulte, K., "Surface modified multi-walled carbon nanotubes in CNT/epoxy-composites", **Chemical Physics Letters**, 370 (5–6): 820–824 (2003).
69. Song, Y. S. and Youn, J. R., "Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites", **Carbon**, 43 (7): 1378–1385 (2005).
70. Zhang, Q., Wu, J., Gao, L., Liu, T., Zhong, W., Sui, G., Zheng, G., Fang, W., and Yang, X., "Dispersion stability of functionalized MWCNT in the epoxy-amine system and its effects on mechanical and interfacial properties of carbon fiber composites", **Materials & Design**, 94: 392–402 (2016).
71. Rakesh K. Gupta, Elliot Kennel, K.-J. K., "Polymer Nanocomposites Handbook", 1. Ed., **CRC Press**, NW, 568 (2010).
72. Casavant, M. J., Walters, D. A., Schmidt, J. J., and Smalley, R. E., "Neat macroscopic membranes of aligned carbon nanotubes", **Journal Of Applied Physics**, 93 (4): 2153 (2003).
73. Ma, P. C., Siddiqui, N. A., Marom, G., and Kim, J. K., "Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review", **Composites Part A: Applied Science And Manufacturing**, 41 (10): 1345–1367 (2010).
74. Gong, X., Liu, J., Baskaran, S., Voise, R. D., and Young, J. S., "Surfactant-Assisted Processing of Carbon Nanotube/Polymer Composites", **Chemistry Of Materials**, 12 (4): 1049–1052 (2000).
75. McNally, T. and Pötschke, P., "Polymer-Carbon Nanotube Composites: Preparation, Properties and Applications", **Woodhead**, Cambridge, 1–848 (2011).

76. Chakraborty, A. K., Plyhm, T., Barbezat, M., Necola, A., and Terrasi, G. P., "Carbon nanotube (CNT)–epoxy nanocomposites: a systematic investigation of CNT dispersion", *Journal Of Nanoparticle Research*, 13 (12): 6493–6506 (2011).
77. Gantayat, S., Rout, D., and Swain, S. K., "Mechanical properties of functionalized multiwalled carbon nanotube/epoxy nanocomposites", *Materials Today: Proceedings*, 4 (2): 4061–4064 (2017).
78. So, H. H., Cho, J. W. and, and Sahoo, N. G., "Effect of carbon nanotubes on mechanical and electrical properties of polyimide/carbon nanotubes nanocomposites", *European Polymer Journal*, 43 (9): 3750–3756 (2007).
79. Allaoui, A., Bai, S., Cheng, H. M., and Bai, J. B., "Mechanical and electrical properties of a MWNT/epoxy composite", *Composites Science And Technology*, 62 (15): 1993–1998 (2002).
80. Ghosh, P. K., Kumar, K., and Chaudhary, N., "Influence of ultrasonic dual mixing on thermal and tensile properties of MWCNTs-epoxy composite", *Composites Part B: Engineering*, 77: 139–144 (2015).
81. Soutis, C. and Fleck, N. A., "Static Compression Failure of Carbon Fibre T800/924C Composite Plate with a Single Hole:", <http://Dx.Doi.Org/10.1177/002199839002400505>, 24 (5): 536–558 (2016).
82. Hull, D., "An Investigation to Composite Materials", *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, (1981).
83. Habeeb Ur Rahman, K., "Evaluation Of Drill Bit Performanc For Carbon-Fiber Composites", *Wichita State University*, (2008).
84. König W, Cronjäger L, Spur G, Tönshoff HK, V. M. and Z. W., "Machining of new materials", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 39: 673–681 (1990).
85. König, W., Wulf, C., Graß, P., and Willerscheid, H., "Machining of Fibre Reinforced Plastics", *CIRP Annals*, 34 (2): 537–548 (1985).
86. Müller-Hummel P, R. J. and M. B., "Neue Werkstoffe fordern neue Allianzen: Prozesssichere", *Wirtschaftliche Bearbeitung Von CFK-IM*, 66–67 (2008).
87. Kesevan,R.and Vijaya Ramnathi, B., "Machine Tools", First. Ed., *Laxmi Publication*, New Delhi, 1–66 (2010).
88. Kumar, D. and Singh, K. K., "Investigation of delamination and surface quality of machined holes in drilling of multiwalled carbon nanotube doped epoxy/carbon fiber reinforced polymer nanocomposite", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part L: Journal Of Materials: Design And Applications*, 233 (4): 647–663 (2019).

89. Paul Theophilus Rajakumar, I., Hariharan, P., and Srikanth, I., "A study on monitoring the drilling of polymeric nanocomposite laminates using acoustic emission", *Journal Of Composite Materials*, 47 (14): 1773–1784 (2013).
90. Haddad, M., Zitoune, R., Eyma, F., and Castanié, B., "Machinability and surface quality during high speed trimming of multi directional CFRP", *International Journal Of Machining And Machinability Of Materials*, 13 (2–3): 289–310 (2013).
91. Zitoune, R., El Mansori, M., and Krishnaraj, V., "Tribo-functional design of double cone drill implications in tool wear during drilling of copper mesh/CFRP/woven ply", *Wear*, 302 (1–2): 1560–1567 (2013).
92. Arora, I., Samuel, J., and Koratkar, N., "Experimental investigation of the machinability of epoxy reinforced with graphene platelets", *Journal Of Manufacturing Science And Engineering, Transactions Of The ASME*, 135 (4): 1–8 (2013).
93. Samuel, J., Dikshit, A., DeVor, R. E., Kapoor, S. G., and Hsia, K. J., "Effect of carbon nanotube (CNT) loading on the thermomechanical properties and the machinability of CNT-reinforced polymer composites", *Journal Of Manufacturing Science And Engineering, Transactions Of The ASME*, 131 (3): 0310081–0310089 (2009).
94. Siddiqui, N. A., Li, E. L., Sham, M. L., Tang, B. Z., Gao, S. L., Mäder, E., and Kim, J. K., "Tensile strength of glass fibres with carbon nanotube-epoxy nanocomposite coating: Effects of CNT morphology and dispersion state", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 41 (4): 539–548 (2010).
95. Zhou, Y., Pervin, F., Lewis, L., and Jeelani, S., "Experimental study on the thermal and mechanical properties of multi-walled carbon nanotube-reinforced epoxy", *Materials Science And Engineering A*, 452–453: 657–664 (2007).
96. Bai, J. B. and Allaoui, A., "Effect of the length and the aggregate size of MWNTs on the improvement efficiency of the mechanical and electrical properties of nanocomposites - Experimental investigation", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 34 (8): 689–694 (2003).
97. Nadler, M., Werner, J., Mahrholz, T., Riedel, U., and Hufenbach, W., "Effect of CNT surface functionalisation on the mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy-composites", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 40 (6–7): 932–937 (2009).
98. Domun, N., Hadavinia, H., Zhang, T., Sainsbury, T., Liaghat, G. H., and Vahid, S., "Improving the fracture toughness and the strength of epoxy using nanomaterials-a review of the current status", *Nanoscale*, 7 (23): 10294–10329 (2015).

99. Grimmer, C. S. and Dharan, C. K. H., "High-cycle fatigue of hybrid carbon nanotube/glass fiber/polymer composites", *Journal Of Materials Science*, 43 (13): 4487–4492 (2008).
100. Garg, P., Singh, B. P., Kumar, G., Gupta, T., Pandey, I., Seth, R. K., Tandon, R. P., and Mathur, R. B., "Effect of dispersion conditions on the mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes based epoxy resin composites", *Journal Of Polymer Research*, 18 (6): 1397–1407 (2011).
101. Zhu, J., Peng, H., Rodriguez-Macias, F., Margrave, J. L., Khabashesku, V. N., Imam, A. M., Lozano, K., and Barrera, E. V., "Reinforcing Epoxy Polymer Composites Through Covalent Integration of Functionalized Nanotubes", *Advanced Functional Materials*, 14 (7): 643–648 (2004).
102. Liao, Y. H., Marietta-Tondin, O., Liang, Z., Zhang, C., and Wang, B., "Investigation of the dispersion process of SWNTs/SC-15 epoxy resin nanocomposites", *Materials Science And Engineering A*, 385 (1–2): 175–181 (2004).
103. Gojny, F. H., Wichmann, M. H. G., Fiedler, B., and Schulte, K., "Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites - A comparative study", *Composites Science And Technology*, 65 (15-16 SPEC. ISS.): 2300–2313 (2005).
104. Lu, K. L., Lago, R. M., Chen, Y. K., Green, M. L. H., Harris, P. J. F., and Tsang, S. C., "Mechanical damage of carbon nanotubes by ultrasound", *Carbon*, 34 (6): 814–816 (1996).
105. Shelimov, K. B., Esenaliev, R. O., Rinzler, A. G., Huffman, C. B., and Smalley, R. E., "Purification of single-wall carbon nanotubes by ultrasonically assisted filtration", *Chemical Physics Letters*, 282 (5–6): 429–434 (1998).
106. Montazeri, A., Montazeri, N., Pourshamsian, K., and Tcharkhtchi, A., "The Effect of Sonication Time and Dispersing Medium on the Mechanical Properties of Multiwalled Carbon Nanotube (MWCNT)/Epoxy Composite", *International Journal Of Polymer Analysis And Characterization*, 16 (7): 465–476 (2011).
107. Cha, J., Jin, S., Shim, J. H., Park, C. S., Ryu, H. J., and Hong, S. H., "Functionalization of carbon nanotubes for fabrication of CNT/epoxy nanocomposites", *Materials & Design*, 95: 1–8 (2016).
108. Shen, J., Huang, W., Wu, L., Hu, Y., and Ye, M., "The reinforcement role of different amino-functionalized multi-walled carbon nanotubes in epoxy nanocomposites", *Composites Science And Technology*, 67 (15–16): 3041–3050 (2007).
109. Yao, Z., Wang, C., Lu, R., Su, S., Qin, J., Wang, Y., Ma, Z., Wei, H., and Wang, Q., "Fracture investigation of functionalized carbon nanotubes-grown carbon fiber fabrics/epoxy composites", *Composites Science And Technology*, 195 (April): 108161 (2020).

110. Kim, J., Shioya, M., Kobayashi, H., Kaneko, J., and Kido, M., "Mechanical properties of woven laminates and felt composites using carbon fibers. Part 1: in-plane properties", *Composites Science And Technology*, 64 (13–14): 2221–2229 (2004).
111. Tomita, Y. and Tempaku Mitsunori, "Effect of Fiber Strength on Tensile Fracture of Unidirectional Long Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Matrix Composites", *Material Characterization*, 38: 91–96 (1997).
112. Al-Mosawe, A., Al-Mahaidi, R., and Xiao-Ling Zhao, "Engineering properties of CFRP laminate under high strain rates", *Composite Structures*, 180: 9–15 (2017).
113. Okayasu, M. and Tsuchiya, Y., "Mechanical and fatigue properties of long carbon fiber reinforced plastics at low temperature", *Advanced Materials And Devices*, 4: 577–583 (2019).
114. Zhang, X., Shi, Y., and Li, Z.-X., "Experimental study on the tensile behavior of unidirectional and plain weave CFRP laminates under different strain rates", *Composites Part B: Engineering*, 164: 524–536 (2019).
115. "İnternet:Orta Doğu Teknik Üniversitesi", <https://merlab.metu.edu.tr/tr/uv-vis-spektrofotometresi> .
116. Duckworth, J. H., "Spectroscopic Quantitative Analysis", *Applied Spectroscopy*, *Elsevier*, 93–163 (1998).
117. Gaurav, A. and Singh, K. K., "Effect of pristine MWCNTs on the fatigue life of GFRP laminates-an experimental and statistical evaluation", *Composites Part B: Engineering*, 172 (October 2018): 83–96 (2019).
118. Jiang, L., Gao, L., and Sun, J., "Production of aqueous colloidal dispersions of carbon nanotubes", *Journal Of Colloid And Interface Science*, 260 (1): 89–94 (2003).
119. Dassios, K. G., Alafogianni, P., Antiohos, S. K., Leptokaridis, C., Barkoula, N.-M., and Matikas, T. E., "Optimization of Sonication Parameters for Homogeneous Surfactant-Assisted Dispersion of Multiwalled Carbon Nanotubes in Aqueous Solutions", *The Journal Of Physical Chemistry C*, 119 (13): 7506–7516 (2015).
120. Yue, L., Pircheraghi, G., Monemian, S. A., and Manas-Zloczower, I., "Epoxy composites with carbon nanotubes and graphene nanoplatelets - Dispersion and synergy effects", *Carbon*, 78: 268–278 (2014).
121. Grossiord, N., Loos, J., Meuldijk, J., Regev, O., Miltner, H. E., Van Mele, B., and Koning, C. E., "Conductive carbon-nanotube/polymer composites: Spectroscopic monitoring of the exfoliation process in water", *Composites Science And Technology*, 67 (5): 778–782 (2007).

122. Lauret, J.-S., Voisin, C., Cassabois, G., Delalande, C., Roussignol, P., Jost, O., and Capes, L., "Ultrafast Carrier Dynamics in Single-Wall Carbon Nanotubes", *Physical Review Letters*, 90 (5): 057404 (2003).
123. Vigolo, B., Pénicaud, A., Coulon, C., Sauder, C., Pailler, R., Journet, C., Bernier, P., Poulin, P., Vigolo, B., Penicaud, A., Coulon, C., Sauder, C., Pailler, R., Journet, C., Bernier, P., and Poulin, P., "Macroscopic Fibers and Ribbons of Oriented Carbon Nanotubes", *Science*, 290 (5495): 1331–1334 (2000).
124. "İnternet:", <https://bumlab.bartın.edu.tr/laboratuvarlar/taramali-elektron-mikroskobu-laboratuvari.html> .
125. Gojny, F., Wichmann, M., Fiedler, B., and Schulte, K., "Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study", *Composites Science And Technology*, 65 (15–16): 2300–2313 (2005).
126. Singh, K. K. and Kumar, D., "Experimental investigation and modelling of drilling on multi-wall carbon nanotube–embedded epoxy/glass fabric polymeric nanocomposites", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 232 (11): 1943–1959 (2018).
127. Ponnuvel, S. and Moorthy, T. V., "Investigation on the Influence of Multi Walled Carbon Nanotubes on Delamination in Drilling Epoxy/Glass Fabric Polymeric Nanocomposite", *Procedia Engineering*, 51: 735–744 (2013).
128. Papadopoulos, A., Gkikas, G., Paipetis, A. S., and Barkoula, N.-M., "Effect of CNTs addition on the erosive wear response of epoxy resin and carbon fibre composites", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 84: 299–307 (2016).
129. Cha, J., Jin, S., Shim, J. H., Park, C. S., Ryu, H. J., and Hong, S. H., "Functionalization of carbon nanotubes for fabrication of CNT/epoxy nanocomposites", *Materials & Design*, 95: 1–8 (2016).
130. Schadler, L. S., Giannaris, S. C., and Ajayan, P. M., "Load transfer in carbon nanotube epoxy composites", *Applied Physics Letters*, 73 (26): 3842–3844 (1998).
131. Frankland, S. J. V. and Harik, V. M., "Analysis of carbon nanotube pull-out from a polymer matrix", *Surface Science*, 525 (1–3): L103–L108 (2003).
132. Revathi, A., Rao, S., Rao, K. V., Rajendra Prakash, M., Sendil Murugan, M., Srihari, S., and Dayananda, G. N. R., "Influence of temperature on tensile behavior of multiwalled carbon nanotube modified epoxy nanocomposites", *Journal Of Materials Research*, 29 (15): 1635–1641 (2014).
133. Thostenson, E. T. and Chou, T.-W., "Processing-structure-multi-functional property relationship in carbon nanotube/epoxy composites", *Carbon*, 44 (14): 3022–3029 (2006).

134. Huayamares, S., Grund, D., and Taha, I., "Comparison between 3-point bending and torsion methods for determining the viscoelastic properties of fiber-reinforced epoxy", *Polymer Testing*, 85 (February): 106428 (2020).
135. Paiva, J. M. F. de, Mayer, S., and Rezende, M. C., "Comparison of tensile strength of different carbon fabric reinforced epoxy composites", *Materials Research*, 9 (1): 83–90 (2006).
136. Durgun, İ., Vatansever, O., Ertan, R., and Yavuz, N., "Polimer Esaslı Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Üretim Tekniğinin Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi", *OTEKON'14 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, 1–4 (2014).
137. Sudarisman and Davies, I. J., "The effect of processing parameters on the flexural properties of unidirectional carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites", *Materials Science And Engineering: A*, 498 (1–2): 65–68 (2008).
138. Tomita, Y. and Morioka, K., "Effect of lay-up sequence on mechanical properties and fracture behaviour of advanced CFRP laminate composite", *Materials Science And Engineering: A*, 234–236: 778–781 (1997).
139. Shishevan, F. . A., Acar, V., and Akbulut, H., "Reçinesine Grafen ve Karbon Nanotüp Eklenmesinin Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri ve Darbe Davranışları Üzerindeki Etkileri", *Mühendislikte Yeni Teknolojiler Sempozyumu*, (October): 83–90 (2015).
140. Okabe, T. and Takeda, N., "Size effect on tensile strength of unidirectional CFRP composites— experiment and simulation", *Composites Science And Technology*, 62 (15): 2053–2064 (2002).
141. Mikhaluk, D. S., Truong, T. C., Borovkov, A. I., Lomov, S. V., and Verpoest, I., "Experimental observations and finite element modelling of damage initiation and evolution in carbon/epoxy non-crimp fabric composites", *Engineering Fracture Mechanics*, 75 (9): 2751–2766 (2008).
142. Hufenbach, W., Gude, M., and Protz, R., "Modeling of the Strain Rate Dependent Material Behavior of 3D-Textile Composites with Production and Operational Defects", *Advanced Materials Research*, 403–408: 651–655 (2011).
143. Vallons, K., Duque, I., Lomov, S. V., and Verpoest, I., "Loading direction dependence of the tensile stiffness, strength and fatigue life of biaxial carbon/epoxy NCF composites", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 42 (1): 16–21 (2011).
144. Zhang, W., Picu, R. C., and Koratkar, N., "Suppression of fatigue crack growth in carbon nanotube composites", *Applied Physics Letters*, 91 (19): 193109 (2007).

145. Zhang, W., Picu, R. C., and Koratkar, N., "The effect of carbon nanotube dimensions and dispersion on the fatigue behavior of epoxy nanocomposites", *Nanotechnology*, 19 (28): (2008).
146. Karahan, M., Lomov, S. V., Bogdanovich, A. E., and Verpoest, I., "Fatigue tensile behavior of carbon/epoxy composite reinforced with non-crimp 3D orthogonal woven fabric", *Composites Science And Technology*, 71 (16): 1961–1972 (2011).
147. Vallons, K., Behaeghe, A., Lomov, S. V., and Verpoest, I., "Impact and post-impact properties of a carbon fibre non-crimp fabric and a twill weave composite", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 41 (8): 1019–1026 (2010).
148. Tomita, Y., Morioka, K., and Iwasa, M., "Bending fatigue of long carbon fiber-reinforced epoxy composites", *Materials Science And Engineering A*, 319–321: 679–682 (2001).
149. Sabiston, T., Li, B., Kang, J., Liang, J., and Engler-Pinto, C., "Fatigue behaviour of carbon/epoxy non-crimp Fabric composites for automotive applications", *Procedia Structural Integrity*, 17: 666–673 (2019).
150. Heidary, H., Karimi, N. Z., and Minak, G., "Investigation on delamination and flexural properties in drilling of carbon nanotube/polymer composites", *Composite Structures*, 201 (November 2017): 112–120 (2018).
151. Karimi, N. Z., Heidary, H., Yousefi, J., Sadeghi, S., and Minak, G., "Experimental investigation on delamination in nanocomposite drilling", *FME Transactions*, 46 (1): 62–69 (2018).
152. Suman, S., Alva, P. P., Daniel, N. G., and Shetty, N., "Experimental investigation on influence of functionalized multi-walled carbon nanotubes on surface roughness in drilling of cfrp composites", *International Journal Of Mechanical And Production Engineering Research And Development*, 8 (3): 1133–1146 (2018).
153. Joshi, S., Rawat, K., and Balan, A. S. S., "A novel approach to predict the delamination factor for dry and cryogenic drilling of CFRP", *Journal Of Materials Processing Technology*, 262: 521–531 (2018).
154. Qiu, Xi., Pengnan, L., Changping, N., Q., C., A., O., P., and K., Tae, J., .
155. Gaugel, S., Sripathy, P., Haeger, A., Meinhard, D., Bernthaler, T., Lissek, F., Kaufeld, M., Knoblauch, V., and Schneider, G., "A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP)", *Composite Structures*, 155: 173–183 (2016).
156. Bonnet, C., Poulachon, G., Rech, J., Girard, Y., and Costes, J. P., "CFRP drilling: Fundamental study of local feed force and consequences on hole exit damage.", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 94: 57–64 (2015).

157. Xu, J., An, Q., Cai, X., and Chen, M., "Drilling machinability evaluation on new developed high-strength T800S/250F CFRP laminates", ***International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing***, 14 (10): 1687–1696 (2013).
158. Melentiev, R., Priarone, P. C., Robiglio, M., and Settineri, L., "Effects of Tool Geometry and Process Parameters on Delamination in CFRP Drilling: An Overview", ***Procedia CIRP***, 45: 31–34 (2016).
159. Eneyew, E. D. and Ramulu, M., "Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites", ***Journal Of Materials Research And Technology***, 3 (4): 354–362 (2014).
160. Merino-Pérez, J. L., Royer, R., Merson, E., Lockwood, A., Ayvar-Soberanis, S., and Marshall, M. B., "Influence of workpiece constituents and cutting speed on the cutting forces developed in the conventional drilling of CFRP composites", ***Composite Structures***, 140: 621–629 (2016).
161. Merino-Pérez, J. L., Royer, R., Ayvar-Soberanis, S., Merson, E., and Hodzic, A., "On the temperatures developed in CFRP drilling using uncoated wc-co tools part I: Workpiece constituents, cutting speed and heat dissipation", ***Composite Structures***, 123: 161–168 (2015).
162. Henerichs, M., Voß, R., Harsch, D., Kuster, F., and Wegener, K., "New production technologies in aerospace industry - 5th machining innovations conference (MIC 2014) tool life time extension with nano-crystalline diamond coatings for drilling carbon-fibre reinforced plastics (CFRP)", ***Procedia CIRP***, 24 (C): 125–129 (2014).
163. Feito, N., Milani, A. S., and Muñoz-Sánchez, A., "Drilling optimization of woven CFRP laminates under different tool wear conditions: a multi-objective design of experiments approach", ***Structural And Multidisciplinary Optimization***, 53 (2): 239–251 (2016).
164. Kaybal, H. B., Ünüvar, A., Koyunbakan, M., and Avcı, A., "A novelty optimization approach for drilling of CFRP nanocomposite laminates", ***International Journal Of Advanced Manufacturing Technology***, 100 (9–12): 2995–3012 (2019).
165. Xu, J., Li, C., Chen, M., El Mansori, M., and Ren, F., "An investigation of drilling high-strength CFRP composites using specialized drills", ***International Journal Of Advanced Manufacturing Technology***, 103 (9–12): 3425–3442 (2019).
166. Geier, N., Szalay, T., and Takács, M., "Analysis of thrust force and characteristics of uncut fibres at non-conventional oriented drilling of unidirectional carbon fibre-reinforced plastic (UD-CFRP) composite laminates", ***International Journal Of Advanced Manufacturing Technology***, 100 (9–12): 3139–3154 (2019).

167. Samuel Raj, D. and Karunamoorthy, L., "Cutting edge—flatting and roughness measurement—to monitor blunting and chipping of the drill cutting edge when drilling CFRP", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 92 (1–4): 953–968 (2017).
168. Yaşar, N. and Günay, M., "Experimental investigation on novel drilling strategy of CFRP laminates using variable feed rate", *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 41 (3): (2019).
169. Othman, A. R., Hassan, M. H., Abu Bakar, E., and Othman, W. A. F. W., "Statistical analysis of the machining parameters in drilling of carbon fibre reinforced plastics (CFRP) composite with various drill types", *Lecture Notes In Mechanical Engineering*, 0 (9789811087875): 141–154 (2018).
170. Alafogianni, P., Dassios, K., Farmaki, S., Antiohos, S. K., Matikas, T. E., and Barkoula, N.-M., "On the efficiency of UV–vis spectroscopy in assessing the dispersion quality in sonicated aqueous suspensions of carbon nanotubes", *Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects*, 495: 118–124 (2016).
171. Dehghan, M., Al-Mahaidi, R., Sbarski, I., and Mohammadzadeh, E., "Surfactant-assisted dispersion of MWCNTs in epoxy resin used in CFRP strengthening systems", *Journal Of Adhesion*, 91 (6): 461–480 (2014).
172. Geng, Y., Liu, M. Y., Li, J., Shi, X. M., and Kim, J. K., "Effects of surfactant treatment on mechanical and electrical properties of CNT/epoxy nanocomposites", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 39 (12): 1876–1883 (2008).
173. Moaseri, E., Hasanabadi, S., Maghrebi, M., and Baniadam, M., "Improvements in fatigue life of amine-functionalized multi-walled carbon nanotube-reinforced epoxy composites: Effect of functionalization degree and microwave-assisted precuring:", [Http://Dx.Doi.Org/10.1177/0021998314541306](http://dx.doi.org/10.1177/0021998314541306), 49 (16): 1961–1969 (2014).
174. Xu, J., Zhang, Y. S., Xinmin, L., and Chen, G. L., "Experimental investigation of fatigue performance of spot welded dual phase sheet steels", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 13 (8): 726–731 (2008).
175. LONG, X. and KHANNA, S., "Fatigue properties and failure characterization of spot welded high strength steel sheet", *International Journal Of Fatigue*, 29 (5): 879–886 (2007).
176. Onn, I. H., Ahmad, N., and Tamin, M. N., "Fatigue characteristics of dual-phase steel sheets", *Journal Of Mechanical Science And Technology*, 29 (1): 51–57 (2015).
177. "Internet:", www.nachi-fujikoshi.co.jp .

178. Bayraktar, Ş., "Karbon Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Frezeleme İşleminde İşlenebilirliğinin Deneysel Araştırılması", **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2011).
179. Jin, Z. J., Bao, Y. J., and Gao, H., "Disfigurement formation and control in drilling carbon fibre reinforced composites", **International Journal Of Materials And Product Technology**, 31 (1): 46–53 (2008).
180. Theophilus Rajakumar I, P., "Online Monitoring Of Rilling Carbon Fiber Reinforced Polymeric Nanocomposite Laminates Using Acoustic Emission Technique", (October): 2013 (2013).
181. Davim, J., design, P. R.-M. &, and 2003, undefined, "Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—experimental and statistical study", **Elsevier**, .
182. Wang, C. C. L., Chen, S. F., and Yuen, M. M. F., "Fuzzy Part Family Formation Based on Grey Relational Analysis", **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology** 2001 18:2, 18 (2): 128–132 (2001).
183. Julong Deynrt, D., "Introduction to Grey System Theory", .
184. Tosun, N., "Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in drilling by using grey relational analysis", **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology** 2005 28:5, 28 (5): 450–455 (2005).
185. Fung, C. P., "Manufacturing process optimization for wear property of fiber-reinforced polybutylene terephthalate composites with grey relational analysis", **Wear**, 254 (3–4): 298–306 (2003).
186. Uzun, G., "Analysis of grey relational method of the effects on machinability performance on austempered vermicular graphite cast irons", **Measurement: Journal Of The International Measurement Confederation**, 142: 122–130 (2019).
187. Lin, Z.-C. and Ho, C.-Y., "Analysis and Application of Grey Relation and ANOVA in Chemical-Mechanical Polishing Process Parameters", **Int J Adv Manuf Technol**, 21: 10–14 (2003).
188. Lo, S. P., "The Application of an ANFIS and Grey System Method in Turning Tool-Failure Detection", **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology** 2002 19:8, 19 (8): 564–572 (2002).
189. Panchagnula, K. K. and Kuppan, P., "Improvement in the mechanical properties of neat GFRPs with multi-walled CNTs", **Journal Of Materials Research And Technology**, 8 (1): 366–376 (2019).
190. Gantayat, S., Rout, D., and Swain, S. K., "Carbon Nanomaterial-Reinforced Epoxy Composites: A Review", **Polymer-Plastics Technology And Engineering**, 57 (1): 1–16 (2018).

191. Tariq, F., Shifa, M., and Baloch, R. A., "Mechanical and Thermal Properties of Multi-scale Carbon Nanotubes–Carbon Fiber–Epoxy Composite", ***Arabian Journal For Science And Engineering***, 43 (11): 5937–5948 (2018).
192. Alawy, A., Abdlghany, M., Wafy, T. Z., and Hassan, A., "Mechanical analysis of functionalized MWCNTs reinforced biresin CR82 epoxy nanocomposite materials", ***Journal Of Composite Materials***, 55 (1): 125–135 (2021).
193. Yang, C. K., Lee, Y. R., Hsieh, T. H., Chen, T. H., and Cheng, T. C., "Mechanical property of multiwall carbon nanotube reinforced polymer composites", ***Polymers And Polymer Composites***, 26 (1): 99–104 (2018).
194. Grimmer, C. S. and Dharan, C. K. H., "High-cycle fatigue of hybrid carbon nanotube/glass fiber/polymer composites", ***Journal Of Materials Science***, 43 (13): 4487–4492 (2008).
195. Garg, P., Singh, B. P., Kumar, G., Gupta, T., Pandey, I., Seth, R. K., Tandon, R. P., and Mathur, R. B., "Effect of dispersion conditions on the mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes based epoxy resin composites", ***Journal Of Polymer Research***, 18 (6): 1397–1407 (2011).
196. Zhu, J., Peng, H., Rodriguez-Macias, F., Margrave, J. L., Khabashesku, V. N., Imam, A. M., Lozano, K., and Barrera, E. V., "Reinforcing epoxy polymer composites through covalent integration of functionalized nanotubes", ***Advanced Functional Materials***, 14 (7): 643–648 (2004).
197. Borrego, L. P., Costa, J. D. M., Ferreira, J. A. M., and Silva, H., "Fatigue behaviour of glass fibre reinforced epoxy composites enhanced with nanoparticles", ***Composites Part B: Engineering***, 62: 65–72 (2014).
198. Grimmer, C. S. and Dharan, C. K. H., "High-cycle fatigue of hybrid carbon nanotube/glass fiber/polymer composites", ***Journal Of Materials Science***, 43 (13): 4487–4492 (2008).
199. Borrego, L. P., Costa, J. D. M., Ferreira, J. A. M., and Silva, H., "Fatigue behaviour of glass fibre reinforced epoxy composites enhanced with nanoparticles", ***Composites Part B: Engineering***, 62: 65–72 (2014).
200. Knoll, J. B., Riecken, B. T., Kosmann, N., Chandrasekaran, S., Schulte, K., and Fiedler, B., "The effect of carbon nanoparticles on the fatigue performance of carbon fibre reinforced epoxy", ***Composites Part A: Applied Science And Manufacturing***, 67: 233–240 (2014).
201. Su, C., Wang, X., Ding, L., and Yu, P., "Enhancement of mechanical behavior of resin matrices and fiber reinforced polymer composites by incorporation of multi-wall carbon nanotubes", ***Polymer Testing***, 96: 107077 (2021).
202. Ashori, A., Fallah, A., Ghiyasi, M., and Rabiee, M., "Reinforcing effects of functionalized graphene oxide on glass fiber/epoxy composites", ***Polymer Composites***, 39 (S4): E2324–E2333 (2018).

203. Esmaeili, A., Sbarufatti, C., Ma, D., Manes, A., Jiménez-Suárez, A., Ureña, A., Dellasega, D., and Hamouda, A. M. S., "Strain and crack growth sensing capability of SWCNT reinforced epoxy in tensile and mode I fracture tests", ***Composites Science And Technology***, 186: (2020).
204. Gojny, F. H., Wichmann, M. H. G., Köpke, U., Fiedler, B., and Schulte, K., "Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content", ***Composites Science And Technology***, 64 (15): 2363–2371 (2004).
205. Ding, J. and Cheng, L., "Ultra-high three-point bending fatigue fracture characteristics of CFRP modified by MWCNTs and fatigue life data analysis", ***Composite Structures***, 259 (July 2020): 113468 (2021).
206. Pekturk, H. Y., Elitas, M., Goktas, M., Demir, B., and Birhanu, S., "Evaluation of the effect of MWCNT amount and dispersion on bending fatigue properties of non-crimp CFRP composites", ***Engineering Science And Technology, An International Journal***, 34: (2022).
207. Dharan, C., "Fatigue Failure Mechanisms in a Unidirectionally Reinforced Composite Material", *Fatigue of Composite Materials*, ***ASTM International***, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 171-171–18 (1975).
208. Tariq, F., Shifa, M., and Baloch, R. A., "Mechanical and Thermal Properties of Multi-scale Carbon Nanotubes–Carbon Fiber–Epoxy Composite", ***Arabian Journal For Science And Engineering***, 43 (11): 5937–5948 (2018).
209. Subhani, T., Latif, M., Ahmad, I., Rakha, S. A., Ali, N., and Khurram, A. A., "Mechanical performance of epoxy matrix hybrid nanocomposites containing carbon nanotubes and nanodiamonds", ***Materials & Design***, 87: 436–444 (2015).
210. Di, G., Marannano, G., Pasta, A., and Virzi, G., "Design and use of a Fatigue Test Machine in Plane Bending for Composite Specimens and Bonded Joints", ***Advances In Composite Materials - Ecodesign And Analysis***, (2011).
211. Sakin, R., "Investigation of bending fatigue-life of aluminum sheets based on rolling direction", ***Alexandria Engineering Journal***, 57 (1): 35–47 (2018).
212. Olszewski, A., Nowak, P., Kosmela, P., and Piszczyk, Ł., "Characterization of Highly Filled Glass Fiber/Carbon Fiber Polyurethane Composites with the Addition of Bio-Polyol Obtained through Biomass Liquefaction", ***Materials***, 14 (6): 1391 (2021).
213. Karimi, N. Z., Minak, G., Kianfar, P., and Heidary, H., "The effect of chisel edge on drilling-induced delamination", ***18th International Conference On Composite Structures***, (2015).
214. Jain, S. and Yang, D. C. H., "Delamination-free drilling of composite laminates", (1994).

215. Trent EM., "Mechanics of Drilling, Metal Cutting, Metal Cutting Operations and Terminology", Second. Ed., **Birmingham: University Of Birmingham**, .
216. Demir, Z., "An experimental investigation of the effects of point angle on the high-speed steel drills performance in drilling", **Measurement And Control (United Kingdom)**, 51 (9–10): 417–430 (2018).
217. Rahme, P., Landon, Y., Lachaud, F., Piquet, R., and Lagarrigue, P., "Delamination-free drilling of thick composite materials", **Composites Part A: Applied Science And Manufacturing**, 72: 148–159 (2015).



ÖZGEÇMİŞ

Hatice YAKUT PEKTÜRK İlk ve orta öğrenimini Kütahya'nın Tavşanlı ilçesinde tamamladı. 2000 yılında Of Hacı Mehmet Bahattin Ulusoy Anadolu Teknik Lisesi CNC bölümünden mezun oldu. 2006 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Talaşlı Üretim Öğretmenliğinden mezun oldu. 2009 yılında yine aynı üniversitede Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisansını tamamladı. 2006-2010 yılları arasında özel sektörde AR-GE bölümünde çalıştı. 2014 yılında Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. 2011- 2019 yılları arasında İstanbul Gedik Üniversitesi Makine Programında öğretim görevlisi olarak çalıştı. 2019 yılında Kırklareli Üniversitesi Makine Mühendisliğinde öğretim görevlisi olarak çalışmaya başladı halen burada devam etmektedir. Evli ve 1 çocuk annesidir.