

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CAM ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eda Eren AKKUZU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa BAKKAL

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CAM ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Eda Eren AKKUZU
(503091327)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa BAKKAL

HAZİRAN 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503091327 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Eda Eren AKKUZU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**CAM TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Mustafa BAKKAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ömer Berk BERKALP
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **27 Mayıs 2012**
Savunma Tarihi : **13 Haziran 2012**

Aileme,

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın, planlanmasından sonuçlanmasına kadarki tüm sürecinde değerli bilgilerini ve desteğini esirgemeyen danışmanım ve değerli hocam Doç.Dr. Mustafa BAKKAL'a; değerli bilgilerini ve zamanını benimle paylaşan çalışma arkadaşım Ar.Gör. Ali Taner KUZU'ya; tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen Ar.Gör. Umut KARAGÜZEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her zaman manevi desteklerini ve güvenlerini hissettirerek bana güç veren babam Melih AKKUZU'ya; annem Aynur AKKUZU'ya ve kardeşim Nida AKKUZU'ya sonsuz sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yanımda olan tüm dostlarıma teşekkür ederim.

Mayıs 2012

Eda Eren AKKUZU
İmalat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	xi
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Cam Takviyeli Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları ve Özellikleri.....	5
2. LİTERATÜR ÖZETİ	5
2.1 Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin İşlenebilirliği.....	5
2.2 İşlenebilirliği Etkileyen Faktörler	5
2.2.1 İşlem Türü	6
2.2.2 Malzeme türü ve özellikleri	7
2.2.2.1 Matris malzemesi	8
2.2.2.2 Elyaf malzemesi	8
2.2.2.3 Isıl iletkenlik	8
2.2.2.4 Isıl genleşme.....	8
2.2.3 Elyaf yönlenmesi.....	8
2.2.3.1 0° Elyaf yönlenmesi	9
2.2.3.2 90° Elyaf yönlenmesi	9
2.2.3.3 +45° Elyaf yönlenmesi.....	10
2.2.3.4 -45° Elyaf yönlenmesi.....	11
2.2.4 İşlem parametreleri	12
2.2.5 Takım özellikleri	12
2.2.5.1 Kaplamalı / kaplamasız takım.....	13
2.2.5.2 Takım kesici ağız sayısı	14
2.2.5.3 Takım kesici ağız yarıçapı, r_e	14
2.2.5.4 Takım malzemesi partikül büyüklüğü.....	15
2.3 İşlenebilirliği Tanımlayan Faktörler ve Önceki Literatür Çalışmaları.....	15
2.3.1 Yüzey pürüzlülüğü	16
2.3.2 Kesme kuvvetleri	18
2.4 Frezeleme İşleminde Kesme Mekanikliği	20
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	23
3.1 Kompozit Plakaların Malzemesi ve Üretimi	23
3.2 Deneylerde Kullanılan Takımlar ve Cihazlar.....	24
3.2.1 Takım tezgahı ve dinamometre.....	25
3.2.2 Kesici takımlar	25
3.2.3 Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ve optik mikroskop	26
3.3 Deney Düzenekleri	26
3.4 Kesme Parametreleri	26

4. SONUÇLAR ve YORUMLAR.....	29
4.1 Birinci Aşama Test Sonuçları.....	29
4.1.1 Kuvvet sonuçları	30
4.1.2 Yüzey pürüzlülüğü	33
4.1.3 Plaka yüzeyinde çapak oluşumu	36
4.1.4 Takım aşınması	42
4.2 İkinci Aşama Test Sonuçları	42
4.2.1 Kuvvet sonuçları	42
4.2.2 Takım aşınması	45
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	49
KAYNAKLAR.....	51

KISALTMALAR

GFRP	: Glass Fiber Reinforced Plastics
FRP	: Fiber Reinforced Plastics
PA	: Poliamid
PEEK	: Poli Eter Eter Keton

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1: %60 oranında çok yönlü cam takviyeli kompozit malzemenin mekanik özellikleri [1] .	2
Çizelge 3.1: Kesme işlemi parametreleri	27
Çizelge 4.1: Kanal numaraları ve işlendiği parametreler	38
Çizelge 4.2: İkinci aşama deney parametreleri	43
Çizelge 4.3: İkinci aşama deney aşınma ölçüm sonuçları	47

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Uzun elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerin işlenmesi şeması[2].	7
Şekil 2.2 : 0 derece yönlenmeli kompozit malzemede talaş oluşma mekanizması [14,2].	9
Şekil 2.3 : 90 derece yönlenmeli kompozit malzemede talaş oluşma mekanizması [14,2].	10
Şekil 2.4 : +45 derece yönlenmeli kompozit malzemede talaş oluşma mekanizması [14, 2].	11
Şekil 2.5 : -45 derece yönlenmeli kompozit malzemede talaş oluşma mekanizması [14, 2].	11
Şekil 2.6 : 2, 3, 4, 6 ağızlı takım kesici ağız görünüşleri.	14
Şekil 2.7 : Takım kesici ağız yarıçapı, re.	15
Şekil 2.8 : (a) Fiber yönlenme açısının 90 dereceden küçük değerleri için, (b) fiber yönlenme açısının 90 dereceden büyük değerleri ve kesme derinliğinin küçük değerleri için, (c) fiber yönlenmesinin 90 dereceden büyük değerleri ve kesme derinliğinin büyük değerleri için; şematik kesme modeller [2].	17
Şekil 2.9 : Farklı fiber yönlenmeleri için, talaş açısının 0,001 mm talaş alma derinliğinde (a) yatay kuvvetlere etkisi, (b) dikey kuvvetlere etkisi; talaş açısının 0,050 mm talaş alma derinliğinde (c) yatay kuvvetlere etkisi, (d) dikey kuvvetlere etkisi [2].	19
Şekil 2.10 : Farklı talaş açıları için, fiber yönlenmesinin 0,001 mm talaş alma derinliğinde (a) yatay kuvvetlere etkisi, (b) dikey kuvvetlere etkisi; fiber yönlenmesinin 0,050 mm talaş alma derinliğinde (c) yatay kuvvetlere etkisi, (d) dikey kuvvetlere etkisi [2].	20
Şekil 2.11 : Freze kesici takımında kesme açısı ve serbest aç gösterimi.	21
Şekil 2.12 : Freze kesici takımında helis açısı.	21
Şekil 3.1 : Vakum torbalama yönteminin üretim düzeneği	23
Şekil 3.2 : Vakumlanmış kompozit plakalar	24
Şekil 3.3 : Fiber yönlenmeleri	24
Şekil 3.4 : Kuvvet ölçümlerinin yapıldığı dinamometre	25
Şekil 3.5 : Seco 'EDP QTY 1'	25
Şekil 3.6 : Deney düzeneği	26
Şekil 4.1 : Ölçülen kuvvet değerlerinin takım üzerinde şematik gösterimi	30
Şekil 4.2 : 0/90° yönlenmede kuvvet sonuçları	31
Şekil 4.3 : ±45° yönlenmede kuvvet sonuçları	31
Şekil 4.4 : 0/90/±45° yönlenmede kuvvet sonuçları	32
Şekil 4.5 : 0/90° yönlenmede pürüzlülük sonuçları	34
Şekil 4.6 : ±45° yönlenmede pürüzlülük sonuçları	34
Şekil 4.7 : 0/90/±45° yönlenmede pürüzlülük sonuçları	35
Şekil 4.8 : Yukarı- ve aşağı-frezeleme yönlerinin şematik gösterimi	36

Şekil 4.9 : 0/90° yönlenmedeki plakada 2 ve 8 nolu kanallar.....	36
Şekil 4.10 : 0/90° yönlenmedeki plakalara işlenen kanallar ve numaraları.....	37
Şekil 4.11 : ±45° yönlenmedeki plakada 1 ve 16 nolu kanallar	38
Şekil 4.12 : ±45/0/90° yönlenmedeki plakada 2 ve 16 nolu kanallar	38
Şekil 4.13 : ±45° yönlenmedeki plakalara işlenen kanallar ve numaraları.....	39
Şekil 4.14 : ±45/0/90° yönlenmedeki plakalara işlenen kanallar ve numaraları	40
Şekil 4.15 : 2 ağızlı ters helisli takım.....	41
Şekil 4.16 : 0/90° yönlenmede (a) düşük hızlarda, (b) yüksek hızlarda yüzeyde çapak oluşumu.....	41
Şekil 4.17 : Optik mikroskopla ölçülen takım çapı (a) işlemeden önce, (b) 0/90/±45° yönlenme için işlemeden sonra, (c) ±45° yönlenme için işlemeden sonra	42
Şekil 4.18 : 0/90° elyaf yönlenmeli plakada 0° ve 10° serbest açılarında; 10°, 20° ve 30° talaş açılarındaki takımlarla yapılan deneylerin kuvvet sonuçları.....	43
Şekil 4.19 : Helis açısının takım üzerinde gösterimi	44
Şekil 4.20 : ±45° ve 0/90° elyaf yönlenmeli plakalarda; 0° ve 10° serbest açılarında; 10° ve 20° talaş açılarındaki takımlarla yapılan deneylerde takım aşınma sonuçları	46

CAM ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Cam-Elyaf Takviyeli Plastik (GFRP) malzemeler özgül mekanik özelliklerinin yüksekliği ve düşük maliyetleri nedeniyle özellikle otomotiv ve uçak sanayiinde gittikçe artan miktarda kullanılan malzemelerdendir. Bunun yanında cam takviyeli kompozitler, büyük kuvvetlerin iletilmesi gereken yerler için de tercih edilen malzeme grubunda yer almaktadır. İletilecek yüksek kuvvet ve şekil değişim özellikleri elyafların uygun yönlendirilmesi sağlanarak elde edilebilmektedir. Ancak pek çok uygulamada plakalar halinde üretilen kompozitler için, kullanım öncesi delik delme, tornalama, frezeleme gibi talaşlı imalat uygulamalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu talaşlı imalat uygulaması sırasında malzeme üzerinde ayrılma, kopma gibi hasarlar oluşabilmekte ve ayrıca kompozit takviye malzemesinin de kesici takımlar üzerinde olumsuz aşındırıcı etkileri görülmektedir. Bu nedenle, kompozit malzemelerin geleneksel yöntemlerle işlenmesinde uygun takım özellikleri ve işlem parametreleri belirlenmesi istenilen sonucun alınabilmesi açısından önemlidir. Bu konuda literatürde yapılmış sistematik çalışmaların azlığı dikkati çekmektedir. Pek çok çalışmada sabit yönlendirme için yapılan işlenebilirlik çalışmasına karşın bu çalışmada öncelikle farklı yönlendirmelerde cam elyaf takviyeli reçine matrisli kompozit levhalar kalıplama yöntemiyle imal edilecektir. Levha sayısı çalışma öncesi belirlenen deneylere uygun sayıda olacaktır. Üretilen levhaların freze ile işlenebilirliği farklı devir, ilerleme şartlarında ve kaplamalı-kaplamasız farklı WC-Co takımlarla kesilerek incelenecektir. Ardından ölçülen kesme kuvveti, elde edilen talaşların formu ve kesici takım aşınması incelenerek cam takviyeli kompozit malzemenin işlenebilirliğine uygun optimum kesme parametreler ve takım özellikleri belirlenmeye çalışılacaktır.

Farklı yönlendirmelerle (0/90, ± 45 , 0/90/ ± 45) üretimi yapılacak kompozit plakalar, tasarlanan fikstür yardımıyla dinamometre bağlanmış CNC frezeyle bağlanacaktır. Farklı kesme şartlarında, farklı takımlarla yapılacak frezeleme işlemleri sırasında oluşan kesme kuvvetleri kaydedilecek ve oluşan çapak formları incelenecektir. Kesme işlemi sonrası kesilen kanallar optik mikroskopla incelenerek uygun yüzey kalitesini veren kanal ve bunu sağlayan kesme parametreleri ve çapak formları belirlenecektir. Buna uygun olarak, daha iyi yüzey özelliklerini verecek olan yeni takım parametreleri kullanılarak işlemin en iyileşmesine gidilecektir. Kuvvet ölçümleri 3 eksenli dinamometre ile yapılırken, talaş formları stereo optik mikroskopunda incelenecek ve kanal yüzey kalitesinin belirlenmesi amacıyla kanal yüzey pürüzlülükleri ölçülecektir.

EVALUATING MACHINABILITY OF GLASS FIBER REINFORCED EPOXY MATRIX COMPOSITES IN MILLING

SUMMARY

Glass fiber reinforced composite (GFRP) materials have high specific mechanical properties and low cost. Therefore they are commonly used materials due to their properties. However the main aim of the work is investigation of machinability of cotton fabric reinforced polymer matrix composites in milling.

In this project, optimum parameter will be determined with the measuring temperatures of tools and workpiece, cutting forces and performing wear tests. The aim of this study is to evaluate machinability of multi-axial glass fiber reinforced polymer composites (GFRP) in end-milling tests. Milling is most frequently used machining operation in manufacturing of GFRP composites to obtain dimensional tolerances and requirements for assembly. During machining of multi-axial GFRP composites; mechanical, chemical and thermal problems occur because of inhomogeneous and abrasive nature of the material. Main source of these problems are abrasive nature and multi-axial orientation of reinforcement elements in matrix, cutting tool materials and coating selection and cutting parameters. In this study; cutting forces, tool wear and surface roughness values were measured and analysed by Taguchi method during the end-milling tests in order to evaluate these parameters. GFRP materials with two fiber orientations $\pm 45^\circ$, $0/90/\pm 45^\circ$ were used as the workpiece materials. Diamond coated helical type tools were selected as the tool materials. Three different cutting speed and four different feed rate values were evaluated during the tests. All tests performed in dry conditions and depth of cut set constant. As a result of this study $0/90/\pm 45^\circ$ plates have better machinability than $\pm 45^\circ$ due to the less amount of $\pm 45^\circ$ fibers in quad-axial plates.

Fiber reinforced polymer materials are getting more and more popular due to their light weight and high specific mechanical properties in aerospace, automotive and marine industrial applications. Low cost and high specific strength make glass fibers very attractive among other fibers. Comparing glass fiber reinforced polymers (GFRP) to steel, strength of a 60% reinforced multi-axial GFRP material is approximately two times higher than steel and its density is three times less. GFRP materials have been producing in final shape by molding, vacuum defusing or vacuum bagging methods. Besides, it is required to have more experience about machinability of GFRP materials in drilling holes and machining grooves for assembly purpose.

It is known that glass fibers have an abrasive effect on cutting tool which makes to decrease tool life highly. Wang and Arola assert that chip formation occurs along the fiber direction during the machining of FRP materials and chip formation is highly affected from the fiber orientation. But it is also reported that only at 0° fiber orientation, discontinuous chip propagation occurs.

Hasegava et al. is reported that higher cutting speed causes higher tool wear in GFRP cutting. On the other hand Palanikumar et al. is found out that lower cutting speeds cause higher surface roughness because of higher material flow in the cutting zone. It is known that tool wear have also a significant effect on cutting forces. Tool wear values can be raised by higher feed rates due to the heat generation and chatter in cutting operation . However at lower feed rates, un-cut fibers can be found because of the incomplete machining of fibers. Palanikumar et al. also resulted their study with optimized cutting parameters for best tool wear and surface roughness values. According to their study, most appropriate parameters are defined as the range of 75 and 175 m/min in cutting speed and 0.10 and 0.50 mm/rev in feed rate.

In our study, to compare chip formation and tool wear by multi-fiber orientation, laminates of $\pm 45^\circ$ and $0/90/\pm 45^\circ$ fiber orientation at three different cutting speeds; 50, 75, 100 m/s and four different feed rates; 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 mm/rev were tested. Cutting forces, surface roughness and tool wear values are measured to determine the effects of fiber orientation and cutting parameters on machining results.

Glass fiber reinforced composite plates in two fiber orientations; $\pm 45^\circ$ biaxial E glass fabric at 606 g/m^2 unit mass, $0/90/\pm 45^\circ$ quadryaxial E glass by 835 gr/m^2 unit mass; were manufactured by vacuum bagging method under 0.8 bar pressure. Matrix material is Crystic 703 PA polyesther material. The composition of the laminates are 55% fiber and 2% hardener as weight percentage. The GFRP plates are also cured at $+50^\circ\text{C}$ during 17 hours to obtain same level of cross-linking on each plate. The cutting tool used in milling tests is a Seco 'EDP QTY 1' type 4 edges diamond coated milling tool with a diameter of 8 mm.

The method of this study is to evaluate machinability characteristics of the composite plates in two fiber orientation under different variations of cutting speed and feed rate combinations. The composite plates were machined in slots by milling method under dry conditions.

In this study; cutting forces, tool wear and surface roughness values under different machining parameters are obtained for different fiber orientations and they have been compared each other to find out the effect of machining parameters in the selected fiber orientations. Therefore, to eliminate the negative effects of very high or very low cutting speed parameters which are not appropriate for machining GFRP composites, cutting parameters were selected in the range of previous researches.

The experiments were done with combination of three cutting speed and four feed rate values and totally thirty six slots were machined for each fiber orientation with the variation of parameters by three repeats. For each slot, cutting forces F_x , F_y and F_z were measured but only F_y results were reported due to the representative purpose. Tool wear in diameter was measured with stereo-optical microscope and results are reported. Surface roughness values (R_a) on the cutting zone was also measured in the direction of feed.

It is obtained that cutting forces are generally increasing with increasing feed rate. The maximum value of cutting forces occur at feed rate 0.2 mm/rev at both of the fiber orientations. Maximum cutting forces at the multiple fiber orientation $0/90/\pm 45^\circ$, were recorded slightly higher than that of $0/90^\circ$ and $\pm 45^\circ$ fiber orientations. Maximum recorded value was measured as 145 N at 100 and 50 m/min cutting speeds in $0/90/\pm 45^\circ$ orientated plate.

Forces at 0.2 mm/min feed rate at 0/90° fiber orientation are 80 N and at $\pm 45^\circ$ fiber orientation, forces at 0.2 mm/rev are changing from 80 N up to 100 N. By comparing the force results at 0/90° and $\pm 45^\circ$ fiber orientations, forces at $\pm 45^\circ$ orientated plate are higher than 0/90° orientated plate and this is an expecting results according to the previous researches. Davim asserts that fibers in $\pm 45^\circ$ are cutting by shearing and causes severe abrasive effect on tool [2]. According to the results, it can be said that cutting forces are increasing as fiber orientation gets more complex. Comparing the F_y forces by 0/90° and multi-directional orientated plate 0/90/ $\pm 45^\circ$, multi-directional orientated plate gives approximately two times higher results than the 0/90° orientated plate.

Cutting forces at 50 and 100 m/min were changing in similar fashion in 0/90/ $\pm 45^\circ$ fiber orientation. The lowest cutting forces were obtained at 75 and 150 m/min at for both orientation direction except for 150 m/min at 0/90° orientation. At 0/90° orientation, 150 m/min cutting speed causes higher cutting forces up to 0.15 m/min feed rate.

Overall roughness values were higher at $\pm 45^\circ$ fiber orientation due to the sub surface delaminations and shear deformation which causes broken fibers. The minimum roughness values were obtained at the lowest value of the cutting speed at $\pm 45^\circ$. Very closed roughness values were recorded in quadryaxial laminates. The average of the surface roughness for 0/90/ $\pm 45^\circ$ laminate is between 3 and 5 μm whereas it is up to 7 μm at $\pm 45^\circ$ orientation direction. The original tool diameter was measured as 7.93 mm. To evaluate tool wear on milling of GFRP, 1800 mm in length slots were machined on the laminate plates for each orientation. The diameter of the tools after cutting were measured as 7.88 mm for $\pm 45^\circ$ fiber orientation and 7.83 mm for 0/90/ $\pm 45^\circ$ fiber orientation. This result shows that tool wear can be ignored for this test.

According to above results; there is a linear relation between feed and cutting force in both GFRP milling. Cutting forces are effecting from fiber orientation and feed rate, but changes in similar region at cutting speed for the three orientation directions. Better surface roughness values recorded in 0/90/ $\pm 45^\circ$ plates. The experimental results show that fiber orientation has the most significant effect on surface roughness of the machined surface. Fiber orientation at $\pm 45^\circ$ have also more effect on maximum cutting forces by machining related with surface roughness. Not a significant tool wear is observed in tool wear tests.

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler bir ya da daha fazla malzemenin elyaf (takviye) ve matris olarak birleşmesiyle oluşan malzemeler olmaları açısından elyaf ve matris malzemelerinin özelliklerinden etkilenmektedirler. Elyaf malzemesi, kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini ve malzemenin istenilen yönlerde takviyelenmesini sağlamaktadır. Elyaf malzemeleri karbon, grafit, cam, aramid ve silikon-karbit şeklinde olabilmektedir. Matris malzemesi ise gerilmenin kompozit malzemeye dağılmasını, elyafların korunmasını ve malzemenin net şeklini almasını sağlamaktadır. Matris malzemeleri polimer, metal ve seramik olabilmektedir [1].

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler yüksek spesifik mekanik özellikleri ve hafiflikleri nedeniyle giderek daha da yaygınlaşan malzemeler olmaktadır. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler havacılık, otomotiv ve denizcilik gibi birçok alanda kullanılmaktadırlar. Cam takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler de mekanik özellikleri ve hafiflikleri nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada sıklıkla kullanılan malzemeler olmaktadır.

1.1 Cam Takviyeli Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları ve Özellikleri

Cam elyaflar, düşük maliyet ve yüksek dayanım özellikleriyle tercih edilen bir takviye türü olmaktadır. %60 oranında takviyelenmiş bir cam takviyeli kompozit malzemenin mekanik özellikleri çelik malzemenin mekanik özellikleriyle kıyaslandığında dayanımının çeliğin yaklaşık iki katı olduğu ve özkütlesinin de çeliğin üçte biri kadar olduğu gözlemlenmektedir [1]. Şekildeki çizelgede % 60 oranında takviyeli cam kompozit malzemenin mekanik özellikleri gösterilmektedir. Çizelgeye göre % 60 oranında cam takviyelenmiş kompozit malzemede çekme dayanımı 1000 MPa; Elastiklik modülü 45000 MPa ve yoğunluğu 2,1 g/cm³ olmaktadır.

Çizelge 1.2: %60 oranında çok yönlü cam takviyeli kompozit malzemenin mekanik özellikleri [1].

Çekme dayanımı (ultimate)	1000 Mpa
Elastiklik modülü, E	45000 MPa
Kopma birim şekil değişimi, ϵ_u	2,30%
Yoğunluk, d	2,1 g/cm ³

Cam takviyeli kompozit malzemeler kalıplama, vakum torbalama ve vakum infüzyon yöntemleriyle parça son şekline yakın şekilde üretilebilmektedirler. Bunun yanı sıra, kompozit parçaların montaja hazır hale getirilebilmeleri için delik delme ve kanal açma gibi bazı talaş alma işlemlerinin uygulanması gerekmektedir. Kompozitlere talaş alma işlemlerinin uygulanabilmesi için de kompozitlerin işlenebilirlik özellikleriyle ilgili daha fazla deneyime sahip olunması gerekmektedir.

Cam takviyeli kompozit malzemelerin işlenmelerinde cam elyafların takım üzerinde yüksek oranda aşındırıcı etkisi olmaktadır. Bu durum da takım ömrünü yüksek oranda azaltmaktadır [2]. Bu açıdan cam takviyeli kompozitlerin işlenmesinde uygun takım özelliklerinin seçilmesi önem kazanmaktadır. Wang ve Arola'nın önceki çalışmalarında belirttiği gibi elyaf takviyeli kompozitlerin işlenmesinde talaş elyaf yönlenmesi boyunca oluşmakta ve talaş oluşumu elyaf yönlenmesinden yüksek oranda etkilenmektedir [3]. Bunun yanı sıra sadece 0° elyaf yönlenmesinde sonsuz talaş oluşumu meydana geldiği belirtilmektedir [3,4].

Hasegava ve diğerlerinin gerçekleştirmiş olduğu çalışmalarda, cam takviyeli kompozitlerin işlenmesinde yüksek kesme hızlarının takım aşınmasının artmasına neden olduğu belirtilmektedir [5]. Buna ek olarak Palanikumar'ın yapmış olduğu çalışmaların sonuçlarına göre de düşük kesme hızlarında yüzey pürüzlülüğünün işleme bölgesindeki yoğun malzeme akışı nedeniyle yüksek olduğu belirlenmiştir [6]. Takım aşınmasının kesme kuvvetleri üzerinde de etkisinin olduğu bilinmektedir [7]. Takım aşınma değerleri yüksek devirlerde ısı oluşumu nedeniyle artabilmekte ve kesme işleminde tırlamaya neden olabilmektedir. Fakat düşük kesme devirlerinde de tamamlanamayan talaş alma işleminden dolayı işlenmemiş elyaflar kalabilmekte, bu da yüzey pürüzlülüğünü artırıcı bir etken olabilmektedir [8].

Palanikumar ve diğçerlerinin yapmış olduğı deneylerde cam takviyeli kompozitlerin işlenmesinde düşük takım aşınması, düşük yüzey pürüzlülüğü ve yüksek yüzey kalitesi için kullanılması gereken en uygun kesme parametreleri elde etmiştir. Elde edilen sonuçlara göre cam takviyeli kompozitlerin işlenmesinde en uygun kesme hız aralığı 75 ve 175 m/dak, ilerleme ise 0,10 ve 0,50 mm/dev olarak belirtilmektedir [8].

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde ilk olarak polimer matrisli kompozit malzemelerin işlenebilirlik özellikleri ve bu konuda yapılmış daha önceki araştırma sonuçlarından; işlenebilirlik kavramı, işlenebilirliği etkileyen ve tanımlayan faktörlerden; sonrasında cam takviyeli kompozit malzemelerin özellikleri, kullanım alanları ve talaşlı işleme davranışlarından bahsedilecektir.

2.1 Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin İşlenebilirliği

Polimer matrisli kompozit malzemeler çoğunlukla yumuşak ve sünek yapıda bir matrisle sert ve gevrek yapıda takviyeden oluşmaktadırlar. Çoğunlukla kullanılan matris malzemeleri PA (Poliamid) ve PEEK (Poli Eter Eter Keten) gibi termoplastik malzemeler ile polyster ve epoksi gibi termoset polimerler olmaktadır [1].

Uzun elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitler yüksek spesifik dayanımları, yüksek modülleri ve hafiflikleri nedeniyle oldukça önemli bir malzeme sınıfını oluşturmaktadırlar. Fakat yapılarının anizotropik ve homojen olmayan özellikte olmasından dolayı talaşlı işlenmelerinde zorluklar oluşmaktadır. İşlenen yüzeylerde çoğunlukla tabaka ayrılması, kırılmalar ve ayrılmalar gibi hasarlar oluşabilmektedir [9, 10, 11]. Ortogonal kesme, delik delme ve frezeleme gibi farklı yöntemler kullanılarak kesme işleminin mekaniği ve elyaf yönlenmesi ile polimer matrisli kompozitlerin üretim koşullarının işlenen malzeme yüzeyleri üzerine etkileri araştırılmaktadır [2].

2.2 İşlenebilirliği Etkileyen Faktörler

Kompozit malzemelerin işlenmesinde uygun malzeme özelliklerine bağlı olarak uygun geometriye ve aşınma özelliklerine bağlı takım seçimi yapılmalıdır. Kompozitlerin işlenmesinde malzemenin non-homojen ve anizotropik özelliklerinin yanında takviye yönlenmesinin de etkisi bulunmaktadır [1]. İşlenebilirlik malzeme

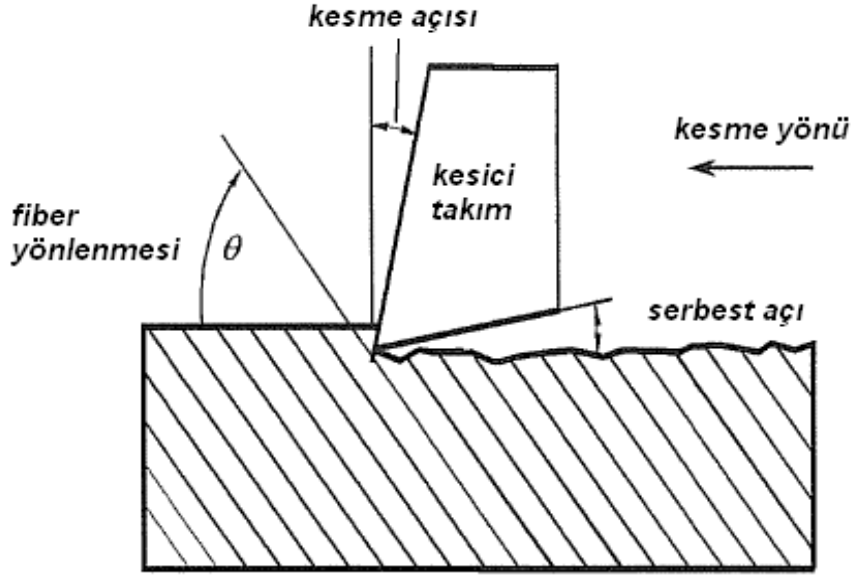
türüne bağlı olmakla birlikte kesici takım, tezgah, işlem türü ve kesme koşulları ile birlikte bir bütün olarak değerlendirilmektedir. Bu da işlenebilirliğin verisel olarak incelendiği koşulların ve kombinasyonların fazla olmasına neden olmaktadır [7].

İşlenebilirliği etkileyen faktörler özet olarak şöyle sıralanabilmektedir:

- İşlem türü
- Malzeme türü ve özellikleri
- Elyaf yönlenmesi
- İşlem parametreleri
 - kesme hızı
 - ilerleme
 - talaş alma derinliği
- Takım özellikleri
 - kaplamalı/kaplamasız
 - ağız sayısı
 - kesme ağız yarıçapı
 - takım malzemesi ve partikül (aşındırıcı tanecik) büyüklüğü

2.2.1 İşlem türü

İşlenebilirlik işlem türüne bağlı olmaktadır. Bundan dolayı tornalama, frezeleme, delik delme, aşındırma ve taşlama şeklinde farklı işlem türlerine göre malzemenin işlenebilirlik özellikleri belirlenmektedir [7]. Geleneksel talaşlı işleme yöntemleri olarak tornalama, frezeleme ve delik delme işlemleri bulunmaktadır. Şekildeki şemada tek yönlü bir elyaf malzemenin ortogonal işlenmesi gösterilmiştir. Kesme açısı, serbest açı ve elyaf yönlenmesi gibi değişkenler şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Uzun elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerin işlenmesi şeması [2].

Frezeleme işleminde ise bir veya daha fazla kesici ağız bulunan dairesel hareketli takımlarla talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilir. Frezeleme işleminde kesici ağızların parçaya teması sürekli olamamakta, her bir kesici ağız parçadan kısa süreli olarak talaş kaldırmakta ve bundan dolayı talaş alma işlemi sürekli olmamaktadır [12]. Frezeleme işleminde, tornalamanın tersine kesici takım dönmektedir ve kesici takımların birden fazla kesme ağızı bulunabilmektedir. Bu durumun talaş oluşumu ve kesme kuvvetleri üzerinde etkisi olup ve freze ile talaş alma işlemi zorlaşmaktadır. Aynı zamanda takım hareketiyle kesme kuvvetleri de değişmektedir. Bundan dolayı freze ile işlenebilirlik takım aşınması, yüzey kalitesi ve tabakaların ayrılması özellikleri olarak tanımlanmaktadır. Kesme kuvvetleri ve işlem sonucu oluşan sıcaklığın ölçülmesi ise takım hareketinden dolayı kolay olmamaktadır [7].

2.2.2 Malzeme türü ve özellikleri

FRP (Elyaf Takviyeli Kompozit) malzemeler metallerden farklı olarak elyaf takviye ve matrisin fiziksel özellikleri, takviye hacim oranı ve takviye yönlenmesi özellikleri ile tanımlanırlar. Talaşlı işlemede takım aşınması elyafların türü ve elyaf hacim oranından etkilenmektedir.

2.2.2.1 Matris malzemesi

Matris malzemesinin ise elyaflara göre daha zayıf olması nedeniyle kesme kuvvetleri üzerinde etkisi az olmakta, fakat talaş oluşumu üzerinde etkisi bulunmaktadır. Termoset matrisler gevrek olmakta ve işlem sırasında kırılarak işlenmektedir. Termoplastik malzemeler ise daha fazla elastik ve plastik deformasyon taşıyabilmekte ve işlenmelerinde sürekli talaş oluşumu meydana gelmektedir. Tabakalar arası dayanımın düşük olması da talaşlı işleme sırasında malzemede hasara neden olabilmekte; birleşen katmanlarda tabaka ayrılması ve talaş kopması oluşabilmektedir [7].

2.2.2.2 Elyaf malzemesi

Elyaf takviyelerin yönlenmesine bağlı olmakla birlikte, elyafların dayanımının yüksek olması kesme kuvvetlerini de arttırmaktadır. Cam ve karbon elyaflar gevrek kırılarak elyaf çapından daha küçük ve aşındırıcı etkide talaşlar oluşturmaktadır [7].

2.2.2.3 Isıl iletkenlik

Elyaf ve matris malzemelerinin ısı iletkenliklerinin ve ısı genleşme katsayılarının da FRP malzemelerin talaşlı işlenmesinde etkisi bulunmaktadır. Isı iletkenliğinin yüksek olduğu karbon ve grafit elyaflarda, ısının iş parçasında iletilmesi ve işleme bölgesinden uzaklaşması ile takım aşınması azalmakta fakat malzemede ısıdan etkilenen bölge büyümektedir. Isı iletkenliğinin düşük olduğu cam ve aramid gibi elyaf malzemelerde, oluşan ısının büyük bir kısmı işlem bölgesinden takıma iletilmekte ve takım sıcaklığının yükselmesine neden olarak takım aşınmasının artmasına yol açmaktadır [7].

2.2.2.4 Isıl genleşme

Elyaf ve matris malzemesinin ısı genleşme katsayılarının farklı olması, matris-elyaf genleşme farkı oluşumuna neden olmakta ve işlemede artan sıcaklıkla artık gerilemelerin oluşmasına ve malzemede deformasyonlara neden olabilmektedir [7].

2.2.3 Elyaf yönlenmesi

İşleme takviye yönlenmesine 0 derecelik bir açıda gerçekleşirse laminata etkiyen gerilmeler takviyeye paralel yönde olmaktadır. Kesme köşeleri malzeme üzerinde baskı oluşturmakta; tabaka ayrılması sonucu kırılma meydana gelmekte ve daha az

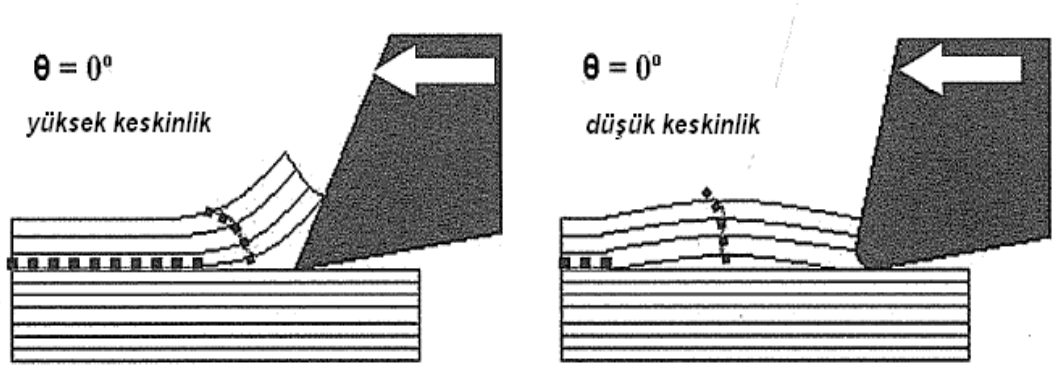
etkili olan matrisin kırılması ya da takviye-matris yüzeyinin kırılması sonucu kompozit laminatta kırılma meydana gelmektedir [1].

Kesme yönü ve takviye yönü arasındaki açı arttıkça takviyeler baskıya maruz kalarak yönlenmeye zıt yönde bükülürler. Bükülme ve basınç sonucunda takviyeler kırılırlar. İşlenmemiş yüzeylerde de takviye-matris yüzey kırılmasına neden olmaktadır. Özellikle 30°-60° derece aralığında yüzey kalitesi oldukça kötü olmaktadır. Takviye yönlenmesine 90 derecelik açıyla yapılan işlemede ise takviye taneleri bükülmeye maruz kalarak her biri ayrı ayrı kırılmaktadır. 135 derecelik açıda da malzeme bükülmeye ve çekme gerilmesine maruz kalmaktadır ve kırılmaktadır [1].

2.2.3.1 0° Elyaf yönlenmesi

0 derece elyaf yönlenmesinde takım ucu yarıçapı düşük, yüksek keskinlikte takımlar ile yapılan kesme işlemi simülasyonunda elyaf-matris arayüzeylerinde kopma oluşmaktadır. Talaş oluşumu da elyaf eksenine dik ve büyük talaş şeklindedir.

Takım ucu yarıçapı yüksek, düşük keskinlikte olan takımlarla yapılan kesmelerde ise elyaflarda burkulma oluşmaktadır ve malzeme elyaf-matris arayüzeyi boyunca parçalanıp kırıntılar şeklinde talaş oluşturmaktadır [2].

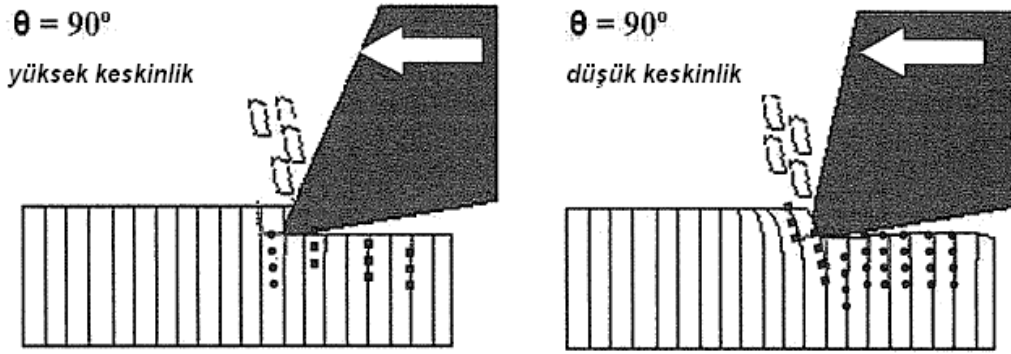


Şekil 2.2: 0 derece yönlenmeli kompozit malzemede talaş oluşma mekanizması[13,2].

2.2.3.2 90° Elyaf yönlenmesi

90 derece elyaf yönlenmeli malzemenin işlenmesinde takım uç yarıçapı düşük, yüksek keskinlikte takımlar ile yapılan simülasyonlarda elyafların kesilmesiyle talaş oluştuğu gözlemlenmiştir. Takım ucu yarıçapı yüksek, düşük keskinlikte olan takımlarla yapılan deneylerde ise elyaflarda burkulma ve kesilme meydana gelerek talaş oluştuğu belirlenmiştir [2].

Takviye yönlenmesine 90 derecelik açıyla yapılan işlemede ise takviye taneleri bükülmeye maruz kalarak her biri ayrı ayrı kırılmaktadır [1]. Ayrıca kesici takımın altında kalan bölgelerde takımın uyguladığı baskı sonucu malzeme içerisine doğru çatlaklar oluştuğu gözlemlenmiştir [2]. Daha önce Koplev'in yapmış olduğu çalışmalarda da; takım tarafından baskı uygulanan bölgelerde 0,1 - 0,3 mm malzeme derinliğinde çatlaklar oluştuğu sonucu elde edilmiştir [14, 2].

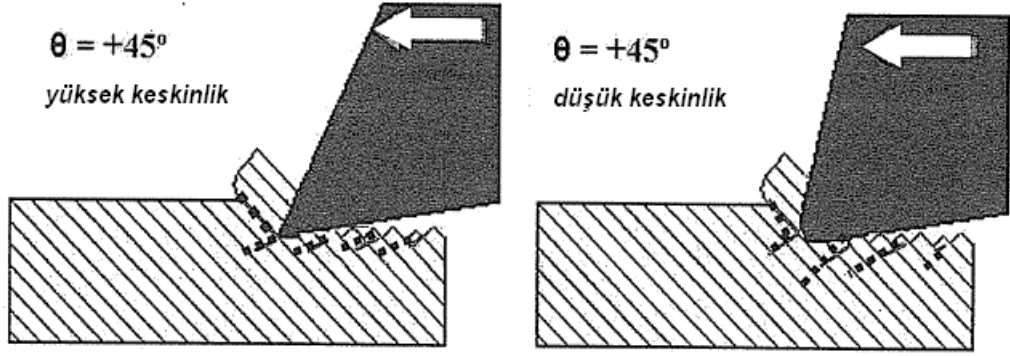


Şekil 2.3: 90 derece yönlenmeli kompozit malzemede talaş oluşma mekanizması[13,2].

2.2.3.3 +45° Elyaf yönlenmesi

+45 derece elyaf yönlenmesinde ise elyafların çekme deformasyonu altında elyaflara dik yönde kesilmesi sonucu talaş oluştuğu belirlenmiştir. Kesilen elyafların geri-yaylanma etkisiyle teorik olarak işlenen yüzeyin üzerinde, takım ile malzeme arasındaki serbest bölgede takım üzerinde aşındırıcı etkisi olmaktadır. Ayrıca bu yönlenmede alt yüzeyde tabaka ayrılması oluşumu belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir. Benzer mekanizma düşük keskinlikte olan takımlarla yapılan deneylerde de daha belirgin şekilde gözlemlenmektedir [2].

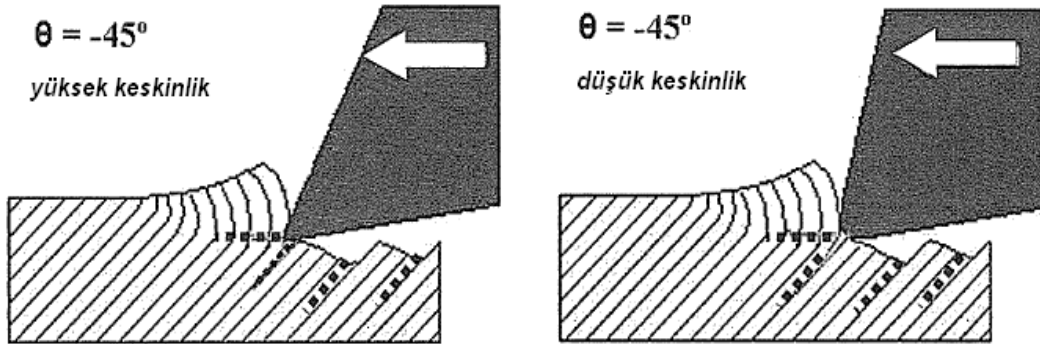
Kesme yönü ve takviye yönü arasındaki açı arttıkça takviyeler baskıya maruz kalarak yönlenmeye zıt yönde bükülürler. Bükülme ve basınç sonucunda takviyeler kırılırlar. İşlenmemiş yüzeylerde de takviye-matris yüzey kırılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle de özellikle 30°-60° derece takviye yönlenme aralığındaki malzemelerle yapılan talaşlı işlemlerde yüzey kalitesi oldukça kötü olmaktadır. 135 derecelik açıda da malzeme bükülmeye ve çekme gerilmesine maruz kalmaktadır ve kırılmaktadır [1].



Şekil 2.4: +45 derece yönlenmeli kompozit malzemede talaş oluşma mekanizması[13, 2].

2.2.3.4 -45° Elyaf yönlenmesi

-45 derece yönlenmeli malzemeyle yapılan simülasyon deneylerinde elyaf demetlerinin takım tarafından uygulanan baskı sonucu büküldüğü ve kırılarak iri talaşlar oluşturduğu belirlenmiştir. Elyaf-matris arayüzeylerinde malzeme içerisine doğru çatlaklar oluştuğu gözlemlenmektedir. Serbest bölgede işlenen elyafların takım üzerinde aşındırıcı etkileri -45 derece yönlenmeye göre daha sınırlı olmaktadır. Benzer mekanizma düşük uç keskinliğinde takımlarla yapılan deneylerde de gerçekleşmektedir [2].



Şekil 2.5: -45 derece yönlenmeli kompozit malzemede talaş oluşma mekanizması[13, 2].

2.2.4 İşlem parametreleri

GFRP malzemeler işlenmeleri sırasında aşındırıcı özellikte olmalarından ötürü, işlenmelerinde takım ve kesme parametrelerinin büyük önemi bulunmaktadır. GFRP malzemelerin işlenmesi parçaya etkiyen kesme kuvvetleri, kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğinden etkilenmektedir [15].

Araştırmalar göstermektedir ki yüzey kalitesi ve delaminasyon; kesme parametreleri, takım geometrisi ve kesme kuvvetlerine (devir kuvvetleri, derinlik kuvvetleri ve kesme kuvvetleri) bağlı olmaktadır. Kesme parametrelerinin, yüzey kalitesi ve takım aşınmasıyla ilişkisini belirlemek üzere araştırmalar bulunmaktadır.

Davim'in GFRP kompozit malzemeyle yaptığı deneylerin sonuçlarına göre [15]:

1. Kesme parametrelerinin malzemeye etkiyen kesme kuvvetlerine etkisi:
 - Devir arttıkça kesme kuvvetleri artıyor.
 - Kesme hızı arttıkça kesme kuvvetleri azalıyor.
2. Kesme parametrelerinin delaminasyona etkisi:
 - Devir ve kesme hızı arttıkça delaminasyon artıyor.
3. Kesme parametrelerinin yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyete etkisi:
 - Yüzey pürüzlülüğü Ra devir arttıkça artıyor.
 - Ra kesme hızı arttıkça azalıyor.

2.2.5 Takım özellikleri

Plastik matrisli kompozit malzemelerin talaşlı işlenmesi parçaların son şekline getirilmesi, montaja hazır hale getirilmesi, yüksek kaliteli yüzeyler elde edilmesi amacıyla uygulanmakta ve kompozit malzemelere talaşlı işlem uygulanmasına metallere göre daha az ihtiyaç duyulmaktadır. İşlem parametrelerinin belirlenmesinde ve takım seçiminde elyaf cinsi, takviyenin yapısı ve matris hacim oranı önemlidir [1].

Metallerle kıyaslandığında yüksek özgül dayanım ve rijitlik özelliklerinden dolayı kompozit malzemeler yeni nesil ürün tasarımlarında giderek daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Fakat deformasyon davranışlarının metallerden farklı olması, anizotropik olmaları, aşındırıcı takviyeler içerebilmeleri ve homojen yapıda

olmamaları nedeniyle işlenmeleri zorlaşmaktadır. Bundan dolayı kompozit malzemelerin işlenmesinde kesici takım seçimi önem kazanmaktadır. Kompozit yapı içerisindeki sert ve aşındırıcı takviye malzemelerinin iş parçasını temsil etmesi açısından takım seçiminde takım aşınmasını en aza indirecek şekilde takım malzemesi, kaplama ve takım geometrisi seçimi gerçekleştirilmelidir. Kompozit malzemenin işlenebilirliği matris ve takviye malzemesinin mekanik özelliklerine, bunların bağıl içeriklerine ve işleme prosesine verdikleri cevaba bağlı olmaktadır. Kesici takım özelliklerinden başka işlenebilirlik ilerleme ve kesme hızı gibi işlem parametrelerine de bağlı olmaktadır [1].

Cam ve karbon elyaf gibi yüksek dayanımlı takviye malzemelerinin kullanıldığı kompozitlerde takım malzemesi; düşük dayanımlı aramid ve kumaş gibi takviyelerin kullanıldığı kompozitlerde ise takım geometrisi takım seçiminde daha etkin kriter olmaktadır. Takviye malzemesinin kompoziti güçlendirme karakteristiği işleme operasyonunun davranışını etkilemektedir. Uygun işlem parametreleri ve takım geometrisi de takviye karakteristiğinden etkilenmektedir [1].

2.2.5.1 Kaplamalı / kaplamasız takım

Takımlara kaplama uygulanması takım performansını artırma amaçlı kullanılan bir yöntem olmaktadır. Temelde titanyum bazlı, seramik, elmas (çok sert kaplama) ve yağlayıcı özellikte MoS₂ ya da CW+C olmak üzere 4 farklı kaplama grubu bulunmaktadır. Takımlara uygulanan kaplama kalınlığı genellikle 15 µm'yi geçmemektedir [2].

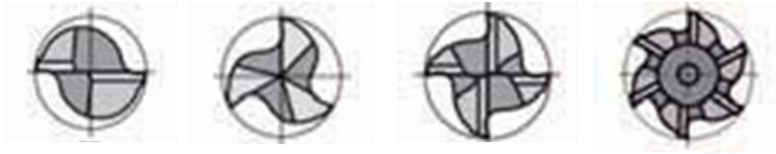
Kompozit malzemelerin işlenmelerinde özellikle yüksek sertlikte kaplama olan elmas kaplama türü tercih edilmektedir. Elmas kaplamalar diğer takım malzemelerine göre yüksek aşınma dayanımı özelliği göstermektedirler. Aynı zamanda elmas kaplama yüksek kimyasal kararlılığı sahip olmakta ve ferritik olmayan metallerle birleşme eğiliminin düşük olması nedeniyle takımda keskin olmayan köşeler oluşmasına neden olmayarak kesme işleminde yüksek performans ve kararlılık sağlayabilmektedir [2]. Davim'in aşağıda 4 farklı takımla gerçekleştirmiş olduğu deneylerde takımların kaplama özellikleri;

1. kaplamasız
2. AlCrN 2,5 μm
3. AlTiN 2,5 μm
4. AlTiN +4 μm şeklinde olup;

en az aşınma ile en uzun talaş alma işlemi gerçekleştirebilme özelliği +4 μm 'den fazla kaplama kalınlığına sahip takımlarla sağlanmıştır [2].

2.2.5.2 Takım kesici ağız sayısı

Takım kesici ağız sayısı arttıkça daha hassas işlenmiş yüzeylerin elde edildiği gözlemlenmektedir [2]. Bunun yanı sıra, 6 ağızlı takım ile yapılan deneylerde ilerlemenin de artmasıyla delaminasyon oranında artış gözlemlendiği de önceki araştırmalarda bulunan bir sonuç olmaktadır [16]. Şekilde farklı ağız sayılarında takım görünüşleri verilmektedir.

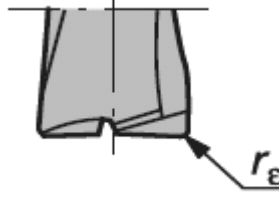


Şekil 2.6: 2, 3, 4, 6 ağızlı takım kesici ağız görünüşleri

Frezeleme işleminde kesici takım dairesel hareket gerçekleştirerek tezgaha sabitlenen iş parçası üzerinden talaş kaldırır. Frezelemede her kesici ağız kısa bir süre parçaya nüfuz ederek talaş kaldırmış olur. Kesici ağızlar parça ile sürekli temas halinde olmadığından frezeleme işlemi kesintili bir işlem olmaktadır. dolayısıyla talaş kesiti ve talaş yükü sürekli olarak değişir [12].

2.2.5.3 Takım kesici ağız yarıçapı, r_e

Özellikle cam ve karbon takviyeli kompozit malzemelerin işlenmesinde, cam ve karbon elyaflarının gevrek kırılarak talaş oluşturma davranışından dolayı takım kesici kenar keskinliği oldukça önem kazanmaktadır. Takım kesici ağız yarıçapı arttıkça takım kesici ağız keskinliği azalmakta, işlenen yüzeylerde yüzey pürüzlülüğü R_t artmakta ve yüzey kalitesi düşmektedir [2]. Şekilde takım kesici ağız yarıçapı sembolize esilmektedir.



Şekil 2.7: Takım kesici ağız yarıçapı, r_{ϵ}

2.2.5.4 Takım malzemesi partikül büyüklüğü

Takım malzemesi partikül büyüklüğü azaldıkça takım aşınması da azalmaktadır. Cam ve karbon elyaflarının sert takviye malzemeleri olmalarından dolayı, işlenmelerinde ince taneli karbür yapıda veya sert yapılarından dolayı PCD malzemeden takımlar kullanılması uygun olmaktadır [2].

2.3 İşlenebilirliği Tanımlayan Faktörler ve Önceki Literatür Çalışmaları

Genel olarak işlenebilirlik takım aşınması ve takım ömrü, kesme kuvvetleri ve güç sarfıyatı, yüzey kalitesi olarak üç temel parametreye göre tanımlanmaktadır. Düşük kesme kuvvetleri, düşük miktarda takım aşınması ve yüksek yüzey kalitesi iyi işlenebilirlik özelliklerini oluşturmaktadır. Yüzey kalitesi talaş oluşumundan etkilenmektedir. Sürekli talaş oluşumu gevrek kırılmaya ve kötü yüzey kalitesine neden olabilmektedir. Kesme işlemi sonucu oluşan sıcaklık takım ve malzeme üzerine dağılmakta; takım aşınmasına neden olabilmekte ve yüzey kalitesini etkileyebilmektedir. Aynı zamanda, güç sarfıyatı sırasında ısı oluşmasından dolayı, kesme kuvvetlerinin de oluşan sıcaklık üzerinde etkisi bulunmaktadır. Bununla birlikte takım aşınması kesme kuvvetleri, oluşan sıcaklık ve yüzey kalitesiyle de etkileşmektedir. Bu nedenle işlenebilirliğin incelenmesinde çoğunlukla takım ömrünün belirlenmesi yöntemi uygulanmaktadır [7].

İşlenebilirliği tanımlayan faktörler genel olarak şu şekilde özetlenebilmektedir:

- Kesme kuvvetleri
- Yüzey kalitesi
- Takım ömrü

- İşlem sonucu oluşan sıcaklık
- Talaş oluşumu

F593 ve MTM56 türünde reçinelerle hazırlanan prepreglerle yapılan deneylerde kesme koşullarının işlenebilirlik üzerine etkileri araştırılmıştır. F593 reçinden prepregler 4mm kalınlığında, tek yönlü karbon takviyeli plakalar şeklinde 0,6 MPa basınçta ve 177°C sıcaklıkta 2 saat süreyle hazırlanmışlardır. 300 mm x 500 mm boyutlarında hazırlanan bu plakalardan 15 mm x 45 mm boyutlarında deney numuneleri oluşturulmuştur [2].

Elyaf yönlenmesi kesme doğrultusuna saat yönünde θ açısı olarak tanımlanmaktadır. Deneyde kesme hızı sabit 1 m/dak alınmış ve kesici takım olarak da 7° serbest açılı, -20 ile 40 derece arasında değişen talaş açılı tungsten karbür bir takım kullanılmıştır. Kesme kuvvetlerinin ölçümünde ise Kistler 9257B model 3 boyutlu dinamometre kullanılmıştır. Kesme derinliğinin elyaf çapına oranının işlenebilirliğe etkisinin anlaşılabilmesi için de düşük kesme derinliklerinde de deneyler gerçekleştirilmiştir. Farklı yönlenmelerde, farklı talaş açılarında ve farklı kesme derinliklerinde kesme işlemleri, hazırlanan plakalara uygulanmıştır. Aynı zamanda aynı malzemeden farklı plakalar da farklı sıcaklık ve bekleme sürelerinde üretilmiştirler [2].

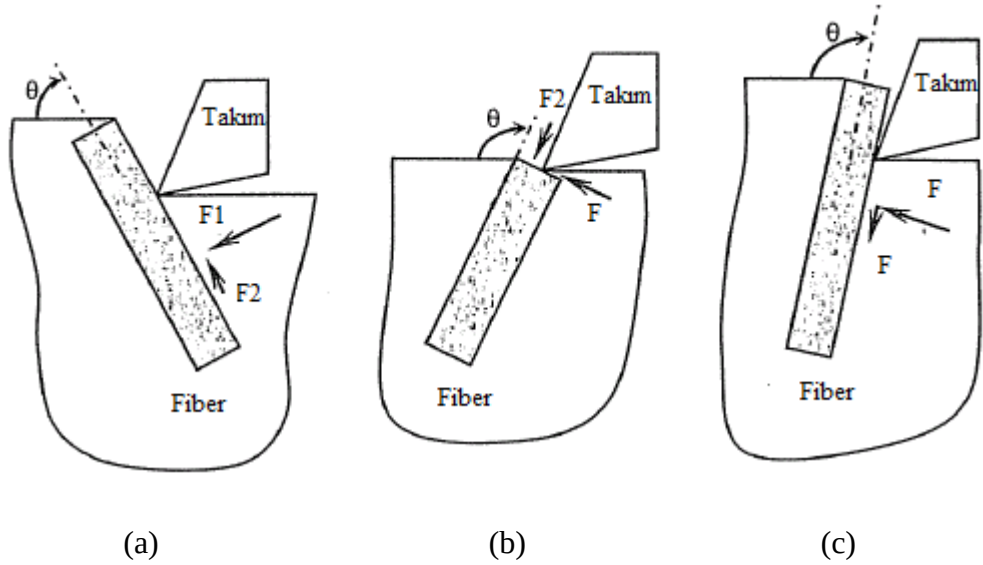
Deneyler sonucunda oluşan kesme yüzeylerinin yüzey pürüzlülükleri (Mitutoyo, Surf test 402 Serisi 178, cut-off = 0,8 mm) profil ölçme cihazı ile ölçülmüştür. İşlenen yüzeyler optik mikroskop (Leica LEITZ DMRXE) ve elektron tarama mikroskobu (SEM) Philips XL-30 ile de incelenmiştir [2].

2.3.1 Yüzey pürüzlülüğü

F593 malzemeden üretilmiş numuneyle gerçekleştirilen deneylerin yüzey pürüzlülük değerlerine göre, elyaf yönlenme açısı θ 'nın yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlemlenmektedir. Elde edilen sonuçlara göre $\theta=90^\circ$ 'den sonra yüzey pürüzlülüğünün talaş açısını farklı değerlerinde belirgin bir şekilde değişiklik gösterdiği gözlemlenmektedir. 0,007 – 0,009 mm aralığında olan elyaf çapından daha küçük seçilen 0,001 mm kesme derinliğinde, yüzey pürüzlülüğünün 90° 'den büyük açılarda kesin bir şekilde arttığı ve 120° 'den sonra da azalan yönle değiştiği sonucu elde edilmiştir.

90°de olan eşik değere ulaşmadan önce yüzey pürüzlülüğündeki değişim 0,6 – 1,2 μm değerleri arasında bulunmakta; talaş açısı ve elyaf yönlenme açısının yüzey pürüzlülüğüne etkileri oldukça düşük olmaktadır. Elyaf açısının 120° olduğu durumda, yüzey pürüzlülüğü talaş açısına, γ_0 , göre bir miktar değişim göstermektedir. 120° elyaf yönlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün en iyi olduğu talaş açısı $\gamma_0=20^\circ$; en kötü olduğu talaş açısı $\gamma_0=-20^\circ$ olmaktadır.

Kesme derinliğinin elyaf çapından büyük olduğu durumlarda ise daha farklı bir mekanizma oluşmaktadır. Örnek olarak verilen deneyde kesme derinliğinin 0,050 mm olduğu durumda yüzey pürüzlülük değeri θ açısının 120°den büyük değerlerinde azalma göstermemektedir. γ_0 talaş açısının daha büyük olduğu, daha keskin kesme takımının kullanıldığı durumlarda daha pürüzlü bir yüzey oluştuğu belirtilmiştir. $\theta=90^\circ$ kritik açısından küçük açılarda talaş açısı ile elyaf yönlenmesinin etkisi önemsiz olmaktadır. $\theta=90^\circ$ de yüzey pürüzlülüğü 1 μm ile 1,5 μm aralığında olmaktadır ve kesme derinliğinin elyaf çapından küçük olduğu durumlardaki $\theta=90^\circ$ deki yüzey pürüzlülük değerleri ile karşılaştırılabilir olmaktadır.



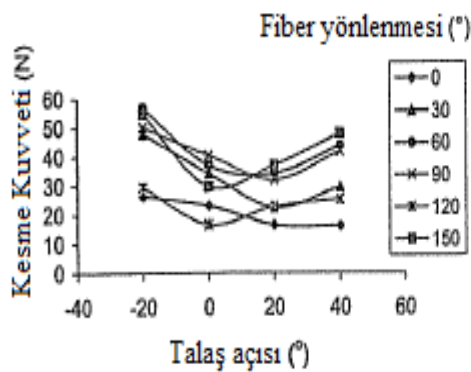
Şekil 2.8: (a) Elyaf yönlenme açısının 90 dereceden küçük değerleri için, (b) elyaf yönlenme açısının 90 dereceden büyük değerleri ve kesme derinliğinin küçük değerleri için, (c) elyaf yönlenmesinin 90 dereceden büyük değerleri ve kesme derinliğinin büyük değerleri için; şematik kesme modelleri [2].

Kesme derinliği ve talaş yönlenmesinin işlenen bölgedeki deformasyon mekanizmasına etkisi ise şöyle açıklanmaktadır. Elyaf açısı θ 'nın 90° 'den küçük olduğu durumlarda; takım tarafından malzeme alt yüzeyinde elyaflara dik yönde bir kuvvet etkimektedir. Bu durumda elyaf malzeme tarafından desteklendiğinden elyafda bir eğilme oluşmamaktadır. Elyaf yönündeki kuvvet bileşeni ise elyafda bir çekme gerilmesi oluşturmaktadır. Bu da elyafın kesme bölgesine komşu bölgede kırılmasını sağlamaktadır.

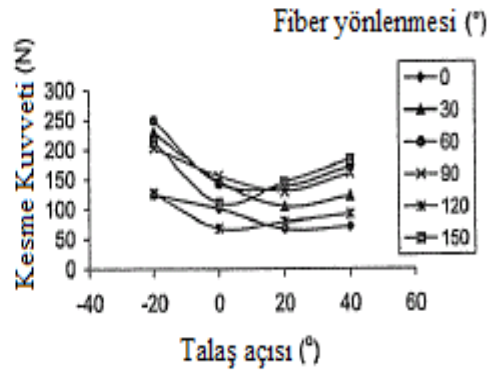
Karbon elyafları de gevrek ve kırılgan olduklarından zorlanma ile kolayca kırılabilmekte, dolayısıyla kesme sonucu olarak yüzey pürüzlülük değeri düşük ve alt yüzey hasarı az olmaktadır. θ 'nın 90° 'den büyük olduğu durumlarda durum biraz daha karmaşıklaşmaktadır. Kesme derinliğinin $d\sin(\theta-90^\circ)$ 'den (d = elyaf çapı) daha küçük olduğu durumlarda, elyaflar eksenel bir basınca maruz kalmaktadırlar. Bu durumda elyaf etrafındaki epoksinin kırılması sonucu kırılmaktadır. Bu durum da yüzey pürüzlülüğünün yüksek olmasına neden olmaktadır. Kesme derinliğinin $d\sin(\theta-90^\circ)$ 'den daha büyük olduğu durumlarda; elyaflarda daha fazla eğilme ve daha fazla elyaf-matris ayrılması oluşmakta ve bundan dolayı yüzey pürüzlülük değeri daha yüksek çıkmakta ve daha derin yüzey hasarları oluşmaktadır.

2.3.2 Kesme kuvvetleri

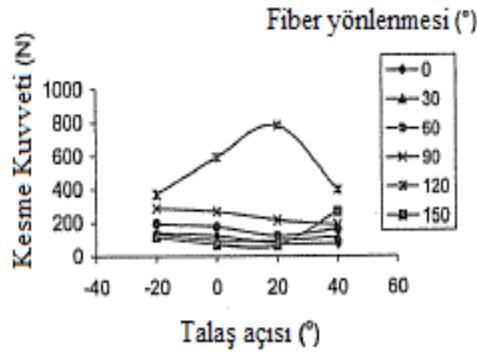
Kesme yönü boyunca oluşan kesme kuvvetleri yatay; kesme yönüne dik oluşan kesme kuvvetleri dikey kesme kuvvetleri olarak adlandırılmaktadırlar. Davim tarafından yapılan deney sonuçlarını gösteren grafiklerde talaş açısı, elyaf yönlenmesi ve kesme derinliği ile kesme kuvvetlerinde oluşan değişimler verilmektedir.



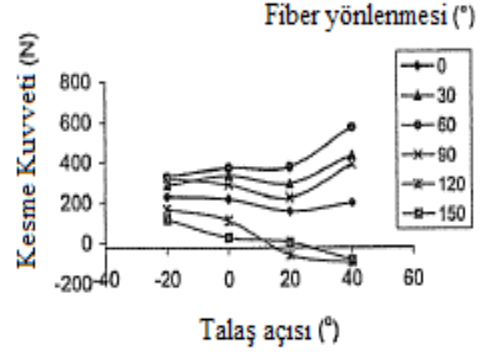
(a)



(b)



(c)

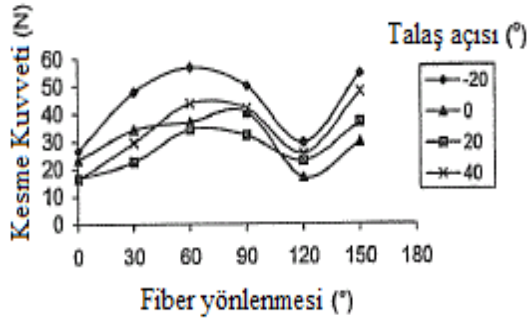


(d)

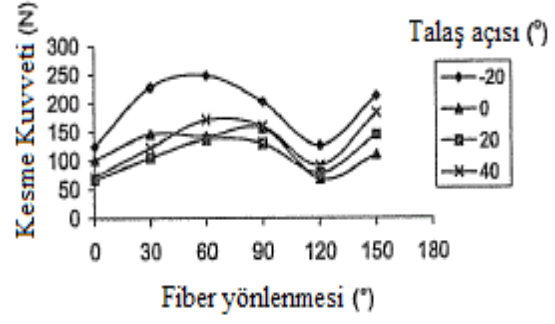
Şekil 2.9: Farklı elyaf yönlenmeleri için, talaş açısının 0,001 mm talaş alma derinliğinde (a) yatay kuvvetlere etkisi, (b) dikey kuvvetlere etkisi; talaş açısının 0,050 mm talaş alma derinliğinde (c) yatay kuvvetlere etkisi, (d) dikey kuvvetlere etkisi [2].

Kesme derinliğinin 1 μm gibi küçük değerlerinde ve talaş açısının 0° - 20° aralığında kesme kuvvetleri az oranda artmakta; kesme derinliğinin 50 μm gibi daha büyük değerlerinde ise yatay kuvvetler azalırken talaş açısı artmaktadır. Bu durum elyaf açısının 120 ve 150 derece olduğu durumların dışında gerçekleşmektedir. Elyaf yönlenmesinin $\theta=120^\circ$ ve 150° derece olduğu durumlarda ise dikey kuvvetler azalmaktadır. Bu durumun oluşumu şöyle açıklanmaktadır. Elyaf yönlenme açısının, talaş açısının ve kesme derinliğinin büyük değerlerinde takıma malzeme iç yönüne doğru bir kuvvet etkimekte ve bundan dolayı kesme kuvvetinin dik bileşeni negatif çıkmaktadır. Bu durumun oluşması işlenen malzemenin yüzey kalitesinin düşük olmasına ve alt yüzey hasarlarının meydana gelmesine neden olmaktadır.

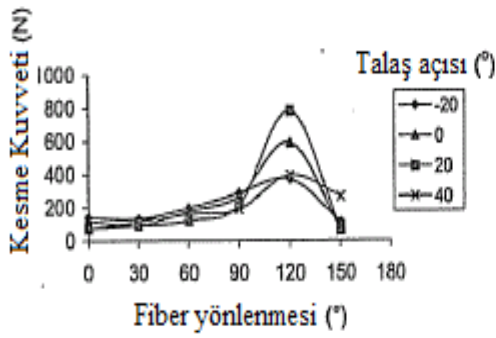
Aynı zamanda elyaf yönlenmesinin de kesme kuvvetleri üzerinde etkisi bulunmaktadır. Elyaf yönlenme açısı θ 'nın artan değerlerinde yatak ve dikey kesme kuvvetleri de artmakta; θ açısı 60° 'ye ulaştığında azalmaya başlamakta, $\theta=120^\circ$ 'den sonra ise tekrar artmaktadır. Kesme derinliğinin 50 μm ve 100 μm değerlerinde ise yatay kuvvetin elyaf açısının 120° olduğu duruma kadar sürekli olarak arttığı gözlemlenmektedir.



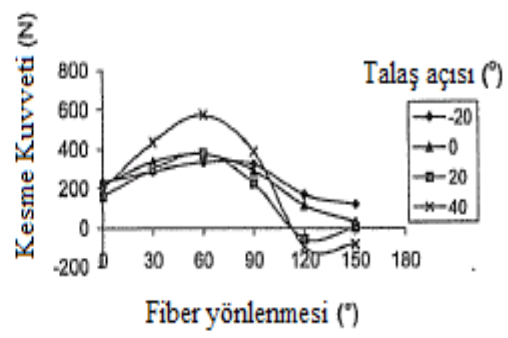
(a)



(b)



(c)



(d)

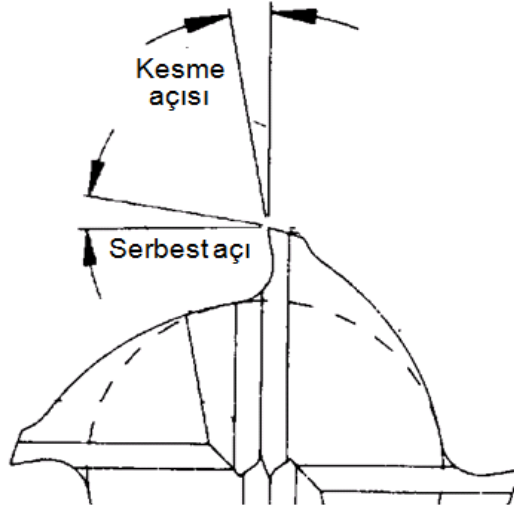
Şekil 2.10: Farklı talaş açıları için, elyaf yönlenmesinin 0,001 mm talaş alma derinliğinde (a) yatay kuvvetlere etkisi, (b) dikey kuvvetlere etkisi; elyaf yönlenmesinin 0,050 mm talaş alma derinliğinde (c) yatay kuvvetlere etkisi, (d) dikey kuvvetlere etkisi [2].

2.4 Frezeleme İşleminde Kesme Mekanikği

Talaş kaldırma işleminde iş parçasından talaş alınabilmesi için kesici takım malzemesinin iş parçası malzemesinden daha sert olması, malzemeye yeterince kuvvet uygulaması ve yeterince nüfuz edebilmesi gerekmektedir. Talaş kaldırma işlemi; sürtünme ısı oluşumu, yüzey sertleşmesi, talaş oluşumu ve takım aşınması gibi mekanizmaların birlikte olduğu bir işlem olmaktadır [17].

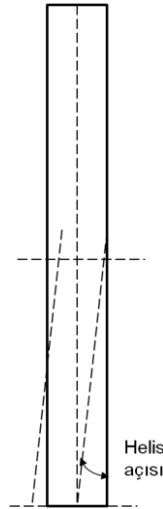
Frezeleme işlemi de tornalama ve delik delme gibi sıklıkla kullanılan bir talaş alma yöntemi olmaktadır. Frezelemede bir veya daha fazla kesici ağız iş parçasıyla temas ederek talaş alma işlemini gerçekleştirmektedir. Kesici ağızlar iş parçasıyla sürekli temas halinde olmayıp kesintili şekilde iş parçasına nüfuz ederler. Bundan dolayı

frezeleme işleminde talaş kesiti ve talaş yükü sürekli olarak değişiklik gösterir [12]. Frezeleme işlemi tezgah, takım geometrisi, kesme parametreleri ve kesme şartlarından etkilenmektedir. Frezeleme işleminin de çevresel ve alın frezeleme gibi çeşitleri olmaktadır [18]. Aşağıdaki şekilde freze kesici ağızları; kesme ağzında kesme açısı ve serbest açısı gösterilmektedir.



Şekil 2.11 Freze kesici takımında kesme açısı ve serbest açısı gösterimi

Helisel parmak frezelerde ise kesme işlemi sırasında oluşan periyodik yüklerin neden olduğu mekanik ve termal gerilmeler azaltılmış olmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi talaş yükü helis boyunca yukarı doğru kademeli bir şekilde artmaktadır.

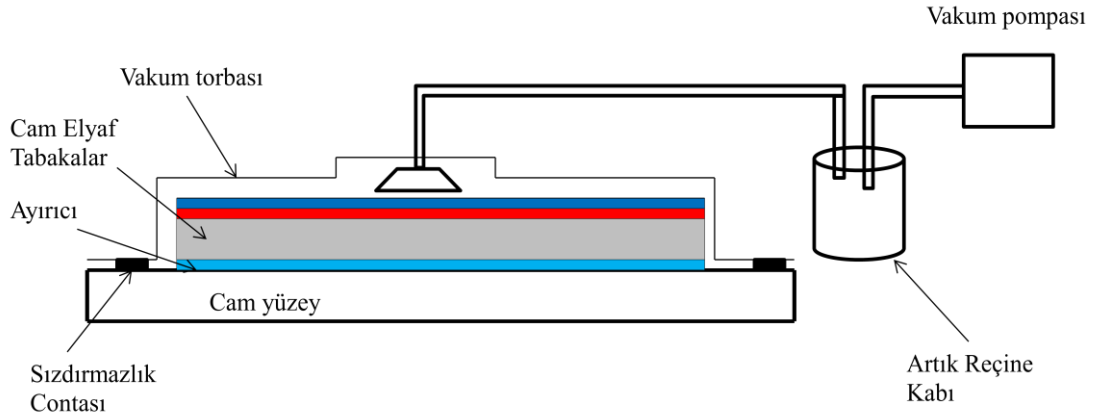


Şekil 2.12 Freze kesici takımında helis açısı

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Kompozit Plakaların Malzemesi ve Üretimi

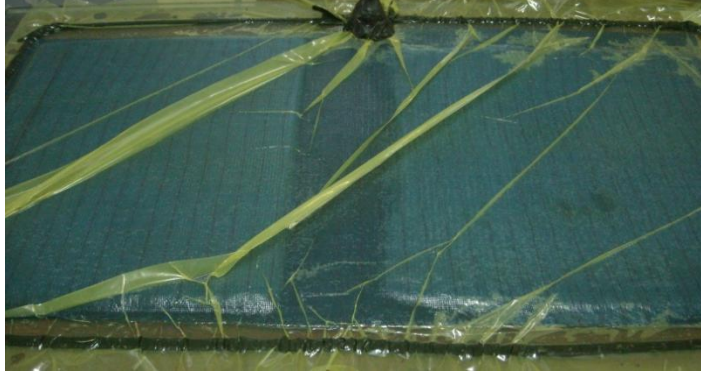
Cam takviyeli kompozit malzemeler, deneylerde kullanılmak üzere $\pm 45^\circ$, $0/90/\pm 45^\circ$, $0/90^\circ$ olmak üzere üç farklı elyaf yönlenmesinde üretilmişlerdir. Takviye malzemesi olarak 606 gr/m^2 birim ağırlığında ± 45 derece tek yönlü, 850 gr/m^2 birim ağırlığında $0/90$ derece tek yönlü ve 835 gr/m^2 birim ağırlığında $0/90/\pm 45$ derece çok yönlü E camları kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak da Crystic 703 PA polyester epoksi malzeme kullanılmıştır. Laminat plakalar vakum torbalama yöntemiyle 0,8 bar basınç altında üretilmiş olup, bileşiminde %55 kütle oranında elyaf ve %2 oranında sertleştirici bulunmaktadır. Vakum torbalama yönteminde basıncın atmosferik basınca kadar sağlanabildiğini, bunun da vakum düzeneğinin vakum ve sızdırmazlık koşullarından etkilendiği bilinmektedir. Şekil 3.1'de kompozit plakaların üretildiği vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 3.1: Vakum torbalama yönteminin üretim düzeneği

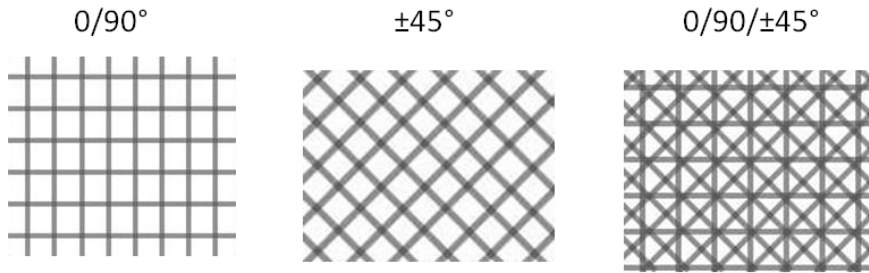
Plakalarda düzgün yüzey elde etmek için vakum torbalama yönteminde cam bir yüzey kullanılmaktadır. Temizlenen cam yüzeye ayırıcı uygulanmakta, daha sonra yüzeye reçine sürülmektedir. Her bir tabaka katmanı reçine ile ıslatılarak istiflenmekte ve fazla reçine de işlem sırasında vakumlanmaktadır. Kompozit

plakalar üretildikten sonra oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılarak her bir plakada aynı bağlanma koşullarının elde edilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.2: Vakumlanmış kompozit plakalar

Deneylerde kullanılan üç farklı yönlenme tipi şekilde şematik olarak gösterilmektedir. Üç farklı yönlenme tipi için de kesme kuvveti, takım aşınması ve yüzey pürüzlülük değerleri farklı kesme parametrelerinde incelenmiş olup, kesme parametrelerinin farklı elyaf yönlenmelerindeki etkilerinin incelenmesi açısından kıyaslanmaktadır.



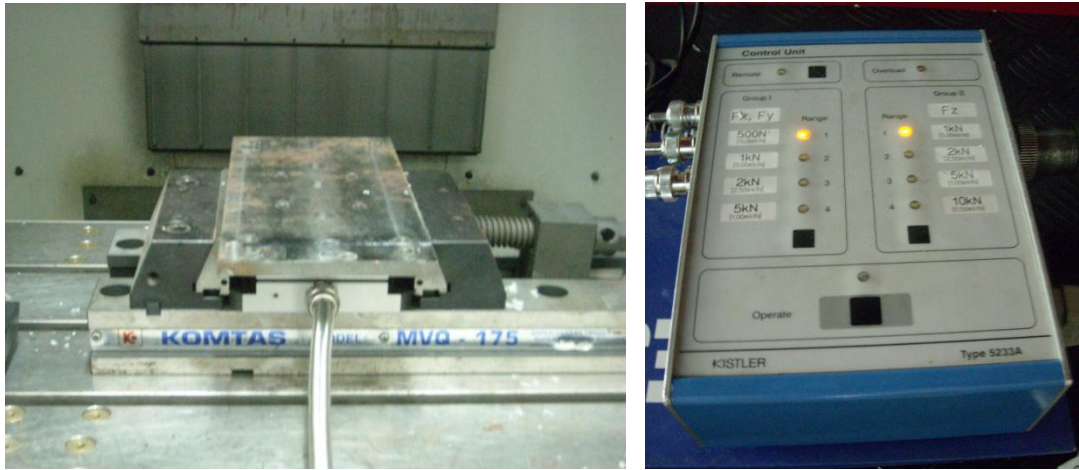
Şekil 3.3: Elyaf yönlenmeleri

3.2 Deneylerde Kullanılan Takımlar ve Cihazlar

Yapılan çalışmanın metodu, cam takviyeli kompozit plakaların işlenebilirlik karakteristiklerini farklı kesme hızlarında ve ilerleme değerlerinde belirlemektir. Kompozit plakalar kanallar halinde kesme sıvısı olmadan frezeleme ile işlenmektedirler. İşlenen her bir kanal için F_x , F_y ve F_z kuvvetleri ölçülerek kaydedilmektedir. Takım aşınması da stereo-optik mikroskopla ölçülüp sonuçlar kıyaslanmaktadır. İşlenen bölgenin yüzey pürüzlülük değeri (R_a) da ilerleme yönü boyunca ölçülüp raporlanmaktadır.

3.2.1 Takım tezgahı ve dinamometre

Deneyler, maksimum 8000 dev/dak ilerlemeye ulaşabilen SPINNER VC650 marka 3-eksenli bir dikey işleme merkezi ile gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvvetleri ise Kistler 9257B tipi dinamometre ile X, Y, Z olmak üzere 3 eksende ölçülmüştür. Kesme işlemi sırasında elde edilen veriler eş zamanlı olarak CutPro programıyla kaydedilmiştir. Şekillerde deneylerde kullanılan tezgah ve ölçme dinamometre görülmektedir.



Şekil 3.4: Kuvvet ölçümlerinin yapıldığı dinamometre

3.2.2 Kesici takımlar

Birinci aşama kesme deneylerinde kullanılan takımlar şekilde gösterilen Seco 'EDP QTY 1' 4 ağızlı elmas kaplamalı freze takımları olup takım çapı 8 mm olmaktadır. Takımların helis açısı 10° , talaş açısı 6° ve serbest açısı 16° olmaktadır. Plaka yüzeylerinde çapak olumunu incelemek ve karşılaştırma yapabilmek için ters helisli tipte bir takımla da kesme deneyi gerçekleştirilmiş ve diğer takımla kıyaslanmıştır.



Şekil 3.5 Seco 'EDP QTY 1'

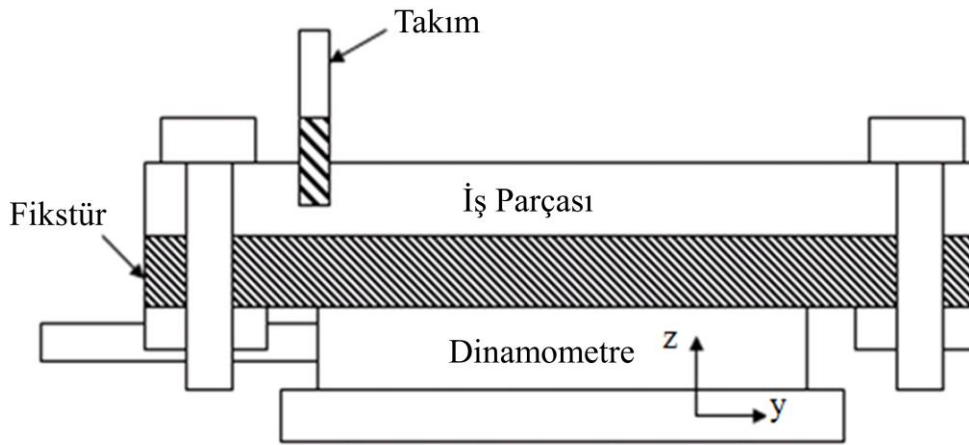
İkinci aşama deneylerde ise farklı takım parametrelerinde takımlar kullanılarak, takım parametrelerinin kesme işlemleri üzerine etkileri incelenmiştir. İki farklı helis açısı ve farklı talaş açısı değerlerine sahip takımlarda helis açıları 0° ve 10° ; talaş açıları ise 10° , 20° ve 30° olarak değişmektedirler.

3.2.3 Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ve optik mikroskop

İşlenen kanalların pürüzlülük değerleri Mitutoyo marka pürüzlülük ölçme cihazıyla ölçülmüştür. Elde edilen pürüzlülük değerleri üç yönlenme tipi için de kıyaslanmıştır. Frezeleme işlemi boyunca da takım aşınmasını belirlemek için optik mikroskopla takım çapı ölçülerek kontrol edilmiştir.

3.3 Deney Düzeneği

İş parçasını dinamometreye bağlamak için 300 x 150 mm boyutlarında bir fikstür plaka kullanılmaktadır. İş parçası plakaya dört köşesinden civatalarla tutturularak işleme sırasında sabit kalması sağlanmaktadır. Şekil 3.5’de deney düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 3.6: Deney düzeneği

3.4 Kesme Parametreleri

Birinci aşama testler kesme hızının ve ilerlemenin 4 farklı değerlerinde gerçekleştirilmiş olup, parametrelerin kombinasyonlarında 3 tekrar ile herbir yönlenme için toplamda 36 kanal işlenmiş olmaktadır. Bu çalışmada, farklı işlem parametreleri altında farklı elyaf yönlenmeleri için kesme kuvvetlerinin değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar kıyaslanarak seçilen yönlenme için işlem parametrelerinin kesme kuvvetlerine etkisinin bulunması amaçlanmıştır. Bu nedenle kesme işlemi için uygun olmayan çok yüksek ve çok düşük kesme

parametrelerinin etkisinin azaltılması için kesme parametreleri önceki araştırmalarda kullanılan aralıkta belirlenmiştir. Birinci aşama deneylerde uygulanan kesme parametreleri aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

Çizelge 3.1: Kesme işlemi parametreleri

	1	2	3	4
Kesme Hızı [m/dak]	50	75	100	150
İlerleme [mm/dev]	0,05	0,1	0,15	0,2

4. SONUÇLAR ve YORUMLAR

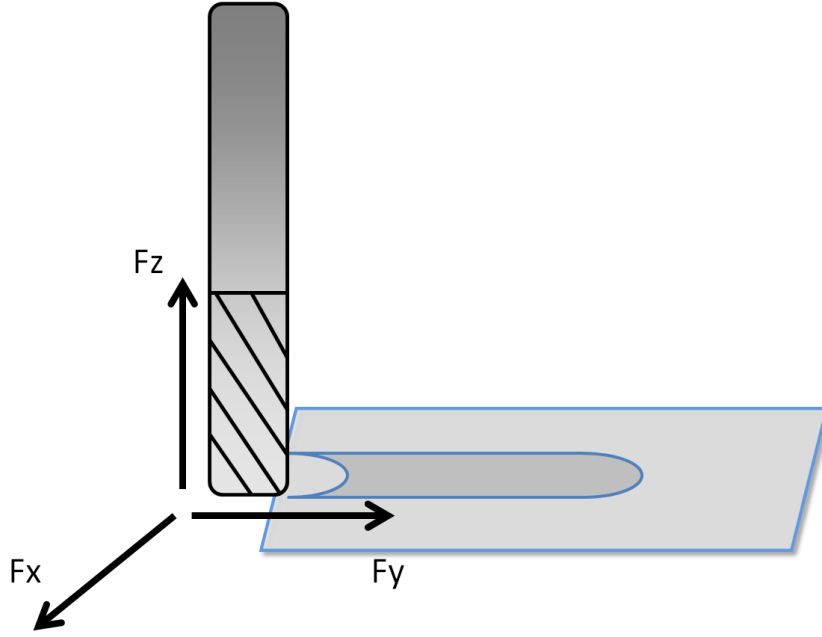
Bu çalışmada; cam takviyeli kompozit malzemelerin farklı işlem parametreleriyle farklı elyaf yönlenmeleri için yapılan deneylerle kesme kuvvetleri, takım aşınması, yüzey pürüzlülük değerleri ve çapak oluşumu incelenmiş ve bu değerler kesme parametrelerinin seçilen elyaf yönlenmesine etkilerini belirlemek amacıyla karşılaştırılmışlardır. Bu nedenle cam takviyeli kompozitlerin işlenmesine uygun olamayan, kesme parametrelerinin çok düşük ve çok yüksek değerlerinin negatif etkilerini elimine etmek için önceki çalışmalarda seçilmiş olan kesme parametreleri uygulanmıştır.

4.1 Birinci Aşama Test Sonuçları

Yapılan deneyler 50, 75, 100, 150 m/dak olarak dört farklı kesme hızının ve 0,05; 0,1; 0,15; 0,2 mm/dev olarak dört farklı ilerleme değerinin kombinasyonlarıyla gerçekleştirilmiş olup üçer tekrarla her bir yönlenme için toplamda 48 kanal işlenmiş olmaktadır. Her bir kanal için F_x , F_y ve F_z değerleri ölçülmüş olup, sonuçların değerlendirilmesinde kıyaslanabilirliği açısından şekilde takım üzerinde de gösterilen F_y değerlerinin karşılaştırmaları yapılmıştır.

Ayrıca birinci aşama deneylerde kompozit plakanın takım alt yüzeyiyle temas eden yüzeyinde yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile yüzey pürüzlülük değerleri de ölçülüp; yönlenmenin ve işlem parametrelerinin yüzey kalitesine etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir.

İşlenen kanallarda malzeme yüzeyinde çapak oluşumu da değerlendirilmiş olup farklı takviye yönlenmelerine göre kesme hızı ve ilerlemenin de değişen değerlerine göre kıyaslamalar yapılmıştır. Sonuçlara göre hem takviye yönlenmesinin yüzey çapak oluşumuna etkisi; aynı zamanda da değişen kesme parametrelerinin işlenen yüzey kalitesine etkisi yorumlanabilmektedir.



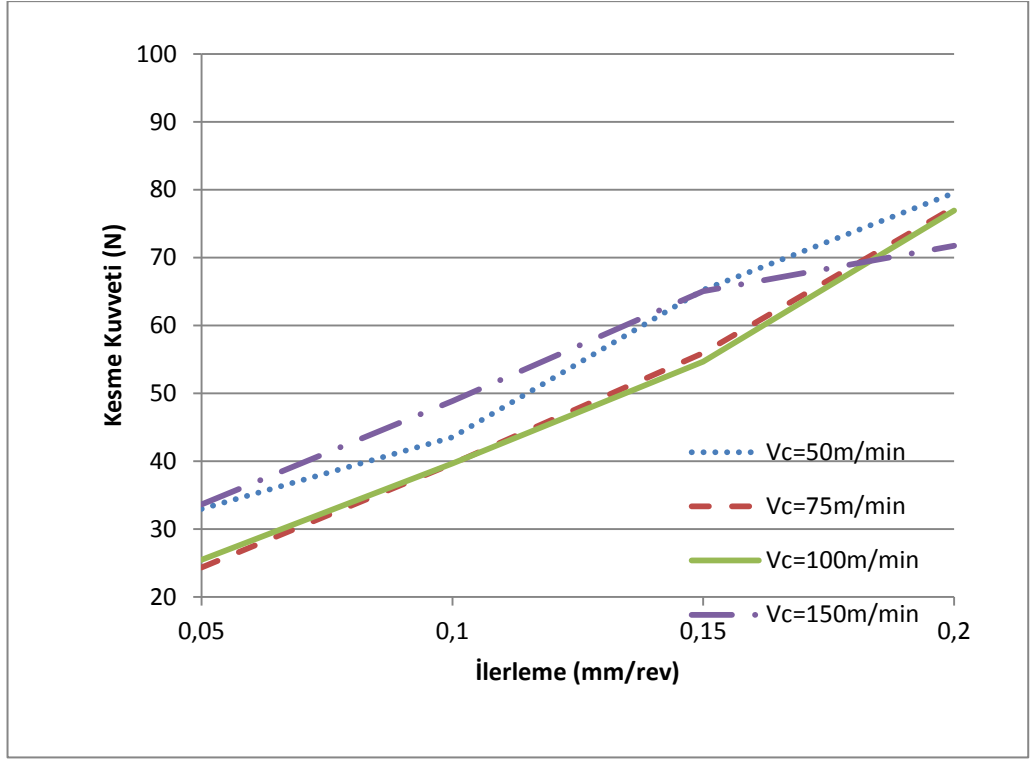
Şekil 4.1 Ölçülen kuvvet değerlerinin takım üzerinde şematik gösterimi

Takım aşınması da stereo-optik mikroskop ile ölçülüp raporlanmıştır. Kesme bölgesinde yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) de ilerleme yönü boyunca ölçülmüş ve değerlendirilmiştir.

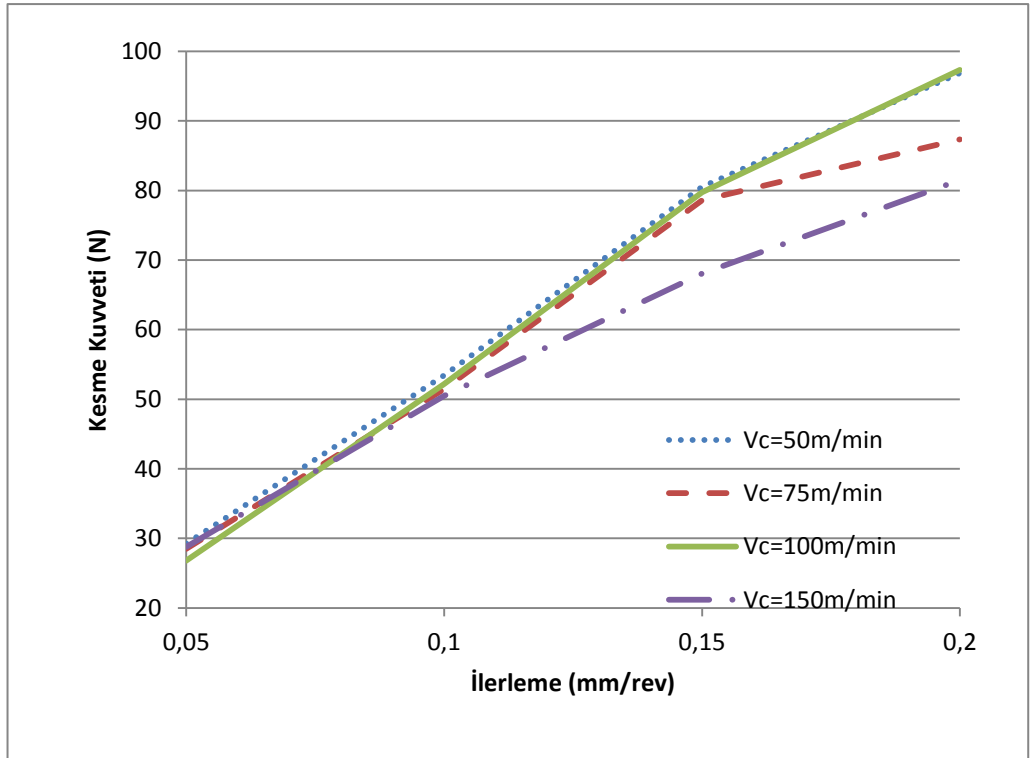
4.1.1 Kuvvet sonuçları

Kompozit plakalara 50 mm uzunluğunda kanallar işlenmiş olup, kesme işlemi boyunca kesme kuvvetleri ölçülerek kaydedilmiştir. Grafikler her bir yönlenme değeri için ölçülmüş olan F_y kuvvet değerlerini göstermektedir. Sonuçlardan anlaşılmaktadır ki kesme kuvvetleri kesme hızının farklı değerlerinde aynı benzer değişimleri göstermekte fakat elyaf yönlenmesi ve ilerleme değerinden belirgin şekilde etkilenmektedirler.

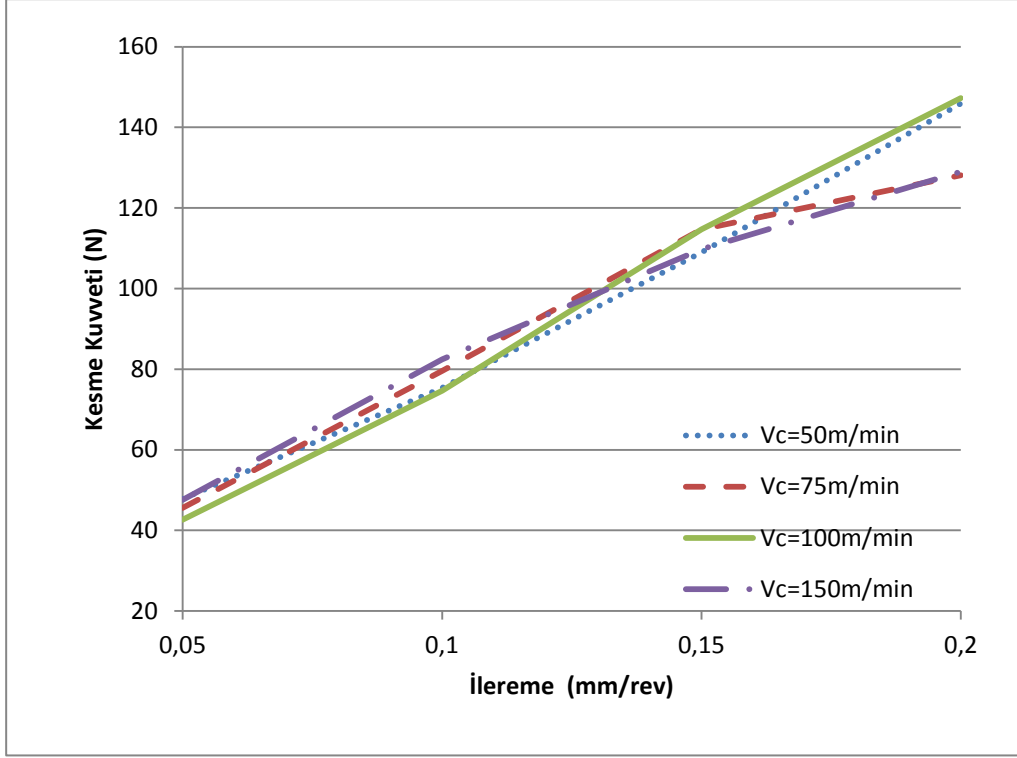
Deneylerden elde edilen veriler ile hazırlanan kuvvet-kesme hızı- ilerleme grafiklerinden de anlaşıldığı şekilde; özellikle sabit kesme hızında ilerlemenin artmasıyla kesme kuvvetlerinde önemli bir artış gerçekleştiği söylenebilmektedir. Kuvvet değerlerindeki bu artış ilerlemenin artması ile takımın aynı sürede kaldırdığı talaş miktarının dolayısıyla da talaş yükünün artması ile açıklanabilir. Yüksek kesme hızlarında ise bu etkinin azalıp, artışın azalarak devam ettiği söylenebilmektedir.



Şekil 4.2: 0/90° yönlenmede kuvvet sonuçları



Şekil 4.3: $\pm 45^\circ$ yönlenmede kuvvet sonuçları



Şekil 4.4: 0/90/±45° yönlenmede kuvvet sonuçları

Kesme deneylerinden elde edilen kuvvet sonuçlarının gösterildiği grafiklerinden, kesme kuvvetlerinin genellikle ilerlemenin artan değerleriyle arttığı yorumlanabilmektedir. Şekil 4.3'deki grafikte 0/90 derece elyaf yönlenmeli plakanın F_y kuvvet değeri sonuçları görülmektedir. En yüksek kesme kuvvet değerinin 0,2 mm/dev ilerleme değerinde elde edildiği gözlemlenebilmektedir. ±45° yönlenmeli plakada da kesme kuvvetinin en yüksek değerleri 0/90 derece yönlenmeli plakadaki gibi 0,2 mm/dev ilerleme değerinde gözlemlenmektedir. 0/90/±45° çok yönlü elyaf yönlenmesinde ise kesme kuvvetlerinin 0/90° ve ±45° elyaf yönlenmelerinden fazla olduğu; bu yönlenmedeki maksimum kuvvetlerin 100 ve 50 m/dak kesme hız değerlerinde 145 N kadar ulaştığı belirlenmektedir.

Kesme kuvvetleri ilerlemenin 0,2 mm/dev değerinde 0/90° elyaf yönlenmeli plakada 80 N ve ±45° elyaf yönlenmeli plakada 80 N'dan 100 N'a kadar yükselebilmektedir. 0/90° ve ±45° yönlenmeli plakalardaki kesme kuvvetleri kıyaslandığında, ±45° yönlenmeli plakadaki kuvvet sonuçlarının 0/90° yönlenmeli plakadakilerden yüksek olduğu görülmektedir ve bu durum, literatürde daha önce yapılmış olan çalışmalardan elde edilen sonuçlarla benzer şekilde olmasıyla beklenen bir sonuç olmaktadır. Davim'e, ±45° yönlenmeli plakada elyaflar talaş alma işleminde

kesilerek talaş oluşturmakta ve bunun da takım üzerinde oldukça yüksek bir aşındırıcı etkisi bulunmaktadır [2]. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre kesme kuvvetlerinin elyaf yönlenmesinin karmaşıkleşan değerlerinde artmakta olduğu söylenebilmektedir. F_y kuvvet değerleri $0/90^\circ$ yönlenmeli ve $0/90/\pm 45^\circ$ çok yönlenmeli plakalar için karşılaştırıldığında, çok yönlü plakanın kesme kuvve değerlerinin $0/90^\circ$ yönlenmeli plakaya göre yaklaşık iki kat daha fazla olduğu gözlemlenebilmektedir.

$0/90/\pm 45^\circ$ yönlenmeli plakada kesme kuvvetleri kesme hızının 50 ve 100 m/dak değerlerinde benzer şekilde değişmektedir. Tüm yönlenmeler için en düşük kesme kuvvetleri kesme hızının 75 ve 150 m/dak değerlerinde görülmekte, yalnızca $0/90^\circ$ yönlenmeli plakanın 150 m/dak kesme hız değerinde sonuçlar değişmektedir. $0/90^\circ$ yönlenmede, 150 m/dak kesme hız değerinde 0,15 mm/dev ilerleme değerine kadar kesme kuvvetlerinin yüksek olduğu gözlemlenmektedir.

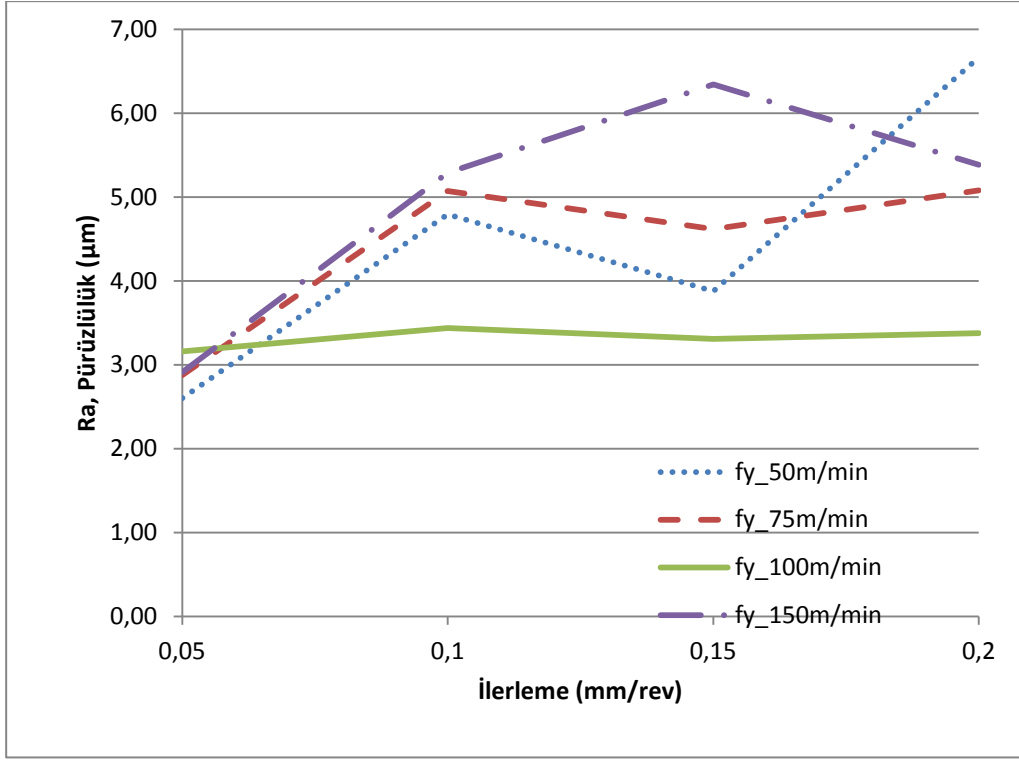
Yukarıda belirtilen sonuçlara göre; kesme kuvvelerinin elyaf yönlenmesinden ve ilerleme değerinden etkilemekte olduğu, fakat kesme hızının değişen değerlerinde üç elyaf yönlenmesinde de benzer şekilde değiştiği anlaşılmaktadır.

4.1.2 Yüzey pürüzlülüğü

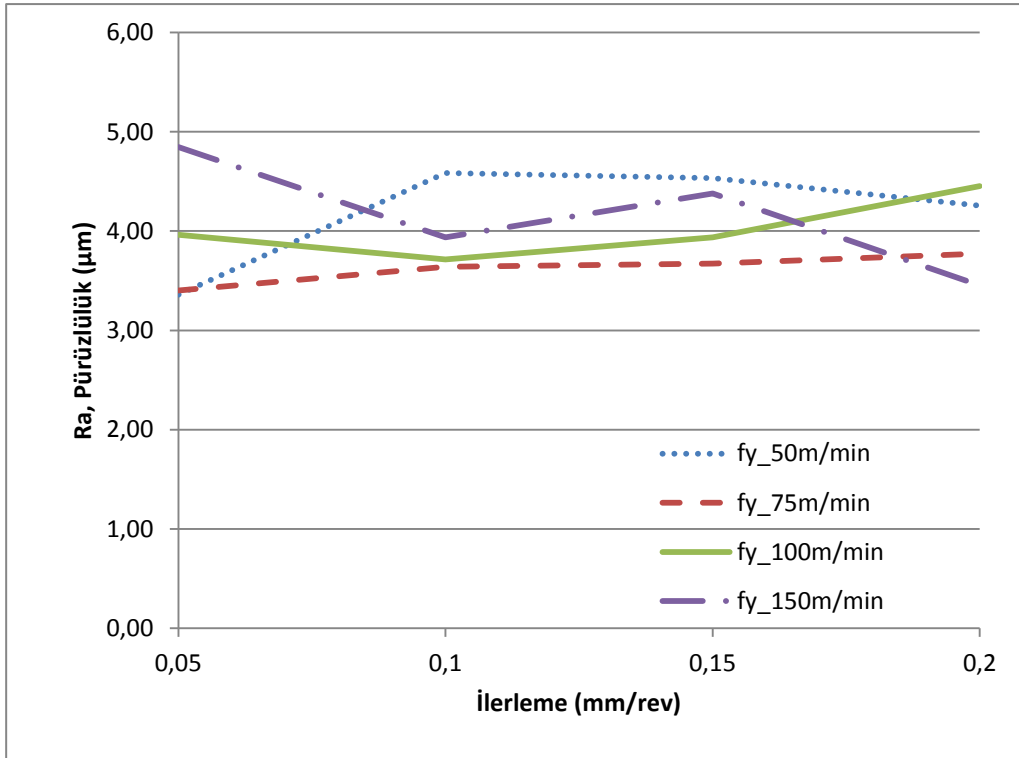
Şekil 4.5; 4.6 ve 4.7'deki grafiklerde, deneylerde işlenen kanalların üç farklı yönlenme için ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri gösterilmektedir. Fakat bu yüzey pürüzlülük değerleri işlenen yüzey pürüzlülük değerleri olmamaktadır. Deneylerde helisel freze takımı kullanıldığından dolayı, işlenen yüzeyler kanalların duvarları olmaktadır. Pürüzlülük değerinin ölçülmüş olduğu yüzeyler ise işleme sırasında takım tabanıyla temas eden yüzeyler olmaktadır.

Yüzey pürüzlülüğü işlenen yüzey hassasiyeti açısından önemli olmakla birlikte; kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği gibi parametreler yüzey pürüzlülüğüne önemli oranda etki eden parametreler olmaktadır [19].

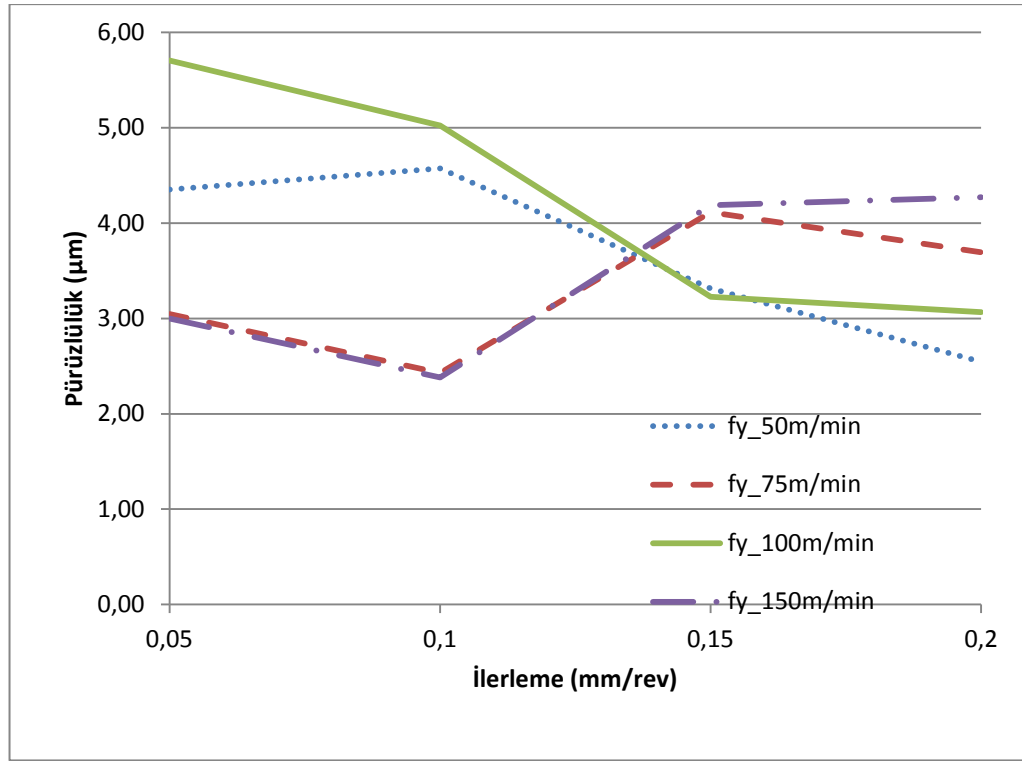
Kompozit plakalarda yönlenmeler tabakalara bağılı olarak değişebildiğinden, deneylerde her zaman ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş olup ortalama değeri alınmıştır [20].



Şekil 4.5: 0/90° yönlendirmede pürüzlülük sonuçları



Şekil 4.6: ±45° yönlendirmede pürüzlülük sonuçları



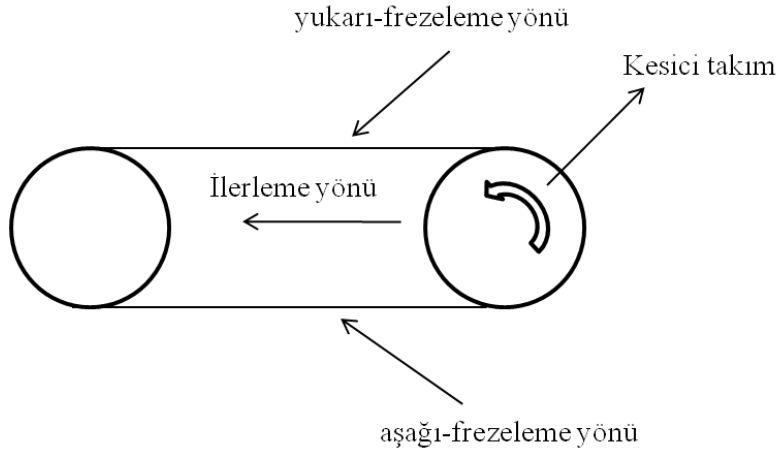
Şekil 4.7: 0/90/±45° yönlenmede pürüzlülük sonuçları

Yüzey pürüzlülük ölçümlerinden elde edilen sonuçlara göre ortalama yüzey pürüzlülüğü üç yönlenme türü için de yaklaşık 4 µm ±1 değerinde olup, pürüzlülük değerlerinin benzer şeklide değişim gösterdikleri yorumlanabilmektedir. Ayrıca pürüzlülük değerinin kesme hızı ve ilerlemeden etkilenmediği de gözlemlenebilmektedir. ±45° yönlenmeli plakada birbirine çok yakın pürüzlülük sonuçları kaydedilmiştir. 0/90/±45° yönlenmeli plakada ortalama pürüzlülük değeri 3 ve 5 µm arasında olup, 0/90° yönlenmeli plakada 7 µm değerinde olmaktadır.

Sonuçlardan anlaşılmaktadır ki, kanal taban yüzeyi pürüzlülük değeri elyaf yönlenmesi ve kesme parametreleriyle alakalı olmayıp plakaların üretim koşullarından etkilenmektedirler. Deneylerde kullanılan plakalar aynı anda üretilmemiş olup, vakum ve kürlenme işlemleri de aynı verimde gerçekleşmemiştir. Bundan dolayı kararlı olmayan vakum koşullarında ve farklı kürlenme koşullarında üretilen plakalarla yapılan öncü deneylerde, aynı parametreler için daha yüksek pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.

4.1.3 Plaka yüzeyinde çapak oluşumu

Deneylerde işlenen plakaların bulunduğu resimlerde, plaka yüzeyinde çapak oluşumları görülebilmektedir. Yukarı- ve aşağı frezeleme yönlerinde çapak oluşumları gözlemlenmektedir. Frezeleme işleminde yukarı- ve aşağı-frezeleme yönleri de aşağıdaki şekil 4.8’de gösterilmektedir.

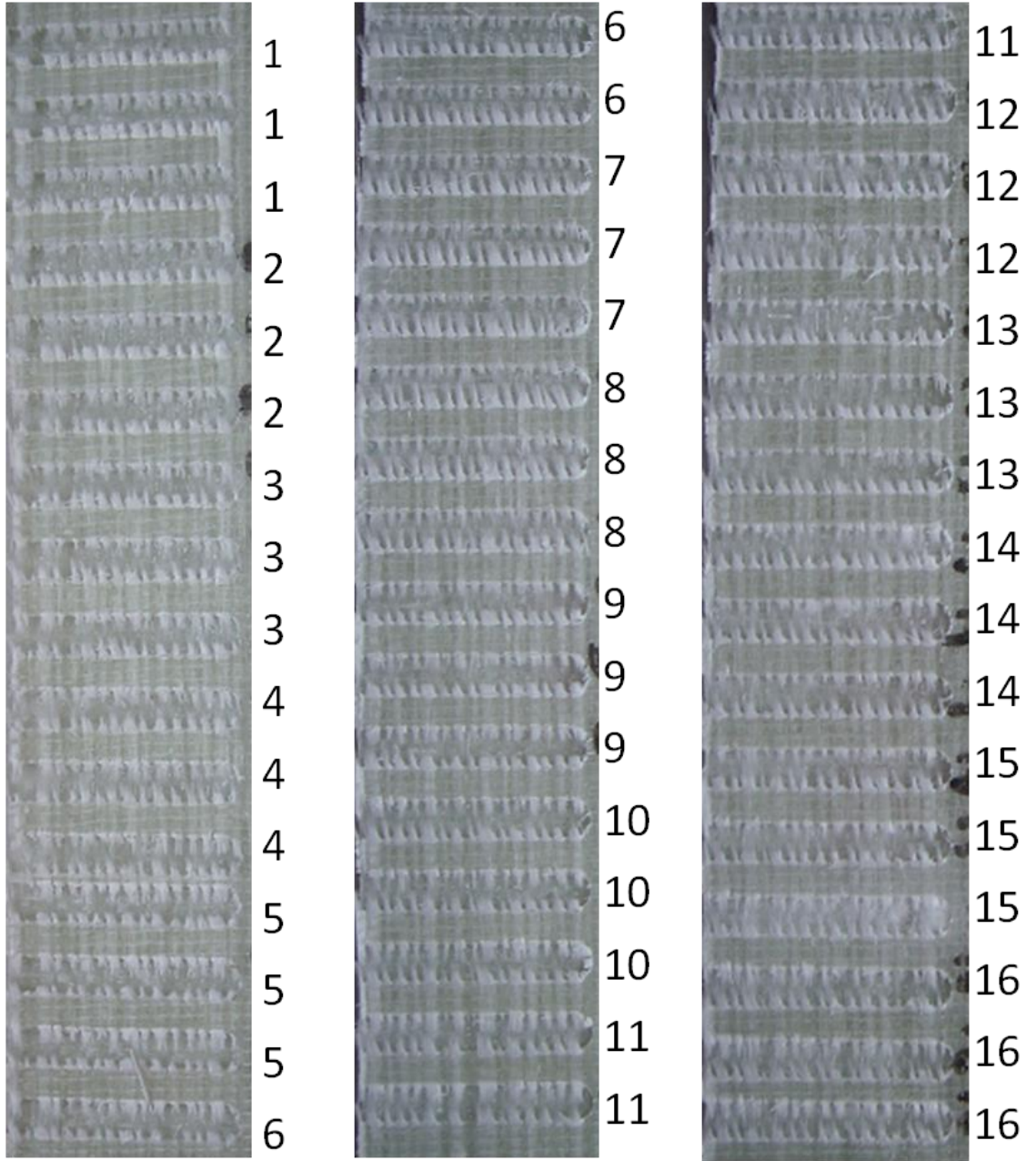


Şekil 4.8: Yukarı- ve aşağı-frezeleme yönlerinin şematik gösterimi

Şekil 4.8’de 0/90° yönlenmeli plakalarda çapak oluşumları görülmektedir. 0/90° yönlenmeli plaka için, plaka yüzeyinde en az miktarda çapak oluşumu düşük kesme hızı ve düşük ilerleme değerlerinde elde edilmiştir ve bu parametrelerle işlenen kanallar 1 ve 2 numaralı gösterilmektedirler. En fazla çapak oluşumu ise düşük kesme hızı ve yüksek ilerleme değerlerinde elde edilmiş olup, bu parametrelere ait kanallar 7 ve 8 numaralı kanallar olmaktadır ve şekil 4.9’da karşılaştırılmaktadır.



Şekil 4.9: 0/90° yönlenmedeki plakada 2 ve 8 nolu kanallar



Şekil 4.10: 0/90° yönlenmedeki plakalara işlenen kanallar ve numaraları

Çizelge 4.1: Kanal numaraları ve işlendiği parametreler

Kanal #	1	2	3	4	5	6	7	8
Vc [m/dak]	50	50	50	50	75	75	75	75
f [mm/dev]	0.05	0.1	0.15	0.2	0.05	0.1	0.15	0.2
	9	10	11	12	13	14	15	16
	100	100	100	100	150	150	150	150
	0.05	0.1	0.15	0.2	0.05	0.1	0.15	0.2

Şekil 4.10’da gösterilen $\pm 45^\circ$ yönlenmeli plakada, plaka yüzeyinde çapak oluşumları en fazla yukarı-frezeleme yönünde görülmektedir. En az çapak oluşumu düşük kesme hızı ve düşük ilerleme değerlerinde gözlemlenmektedir ve 1 numaralı kanalda gösterilmektedir. En fazla çapak ise yüksek kesme hızı ve yüksek ilerleme değerlerinde oluşmuş olup, 16 numaralı kanalda bu parametrelere ait çapak oluşumu görülebilmektedir. Şekil 4.11 ‘de bu kanallar kıyaslanmaktadır.

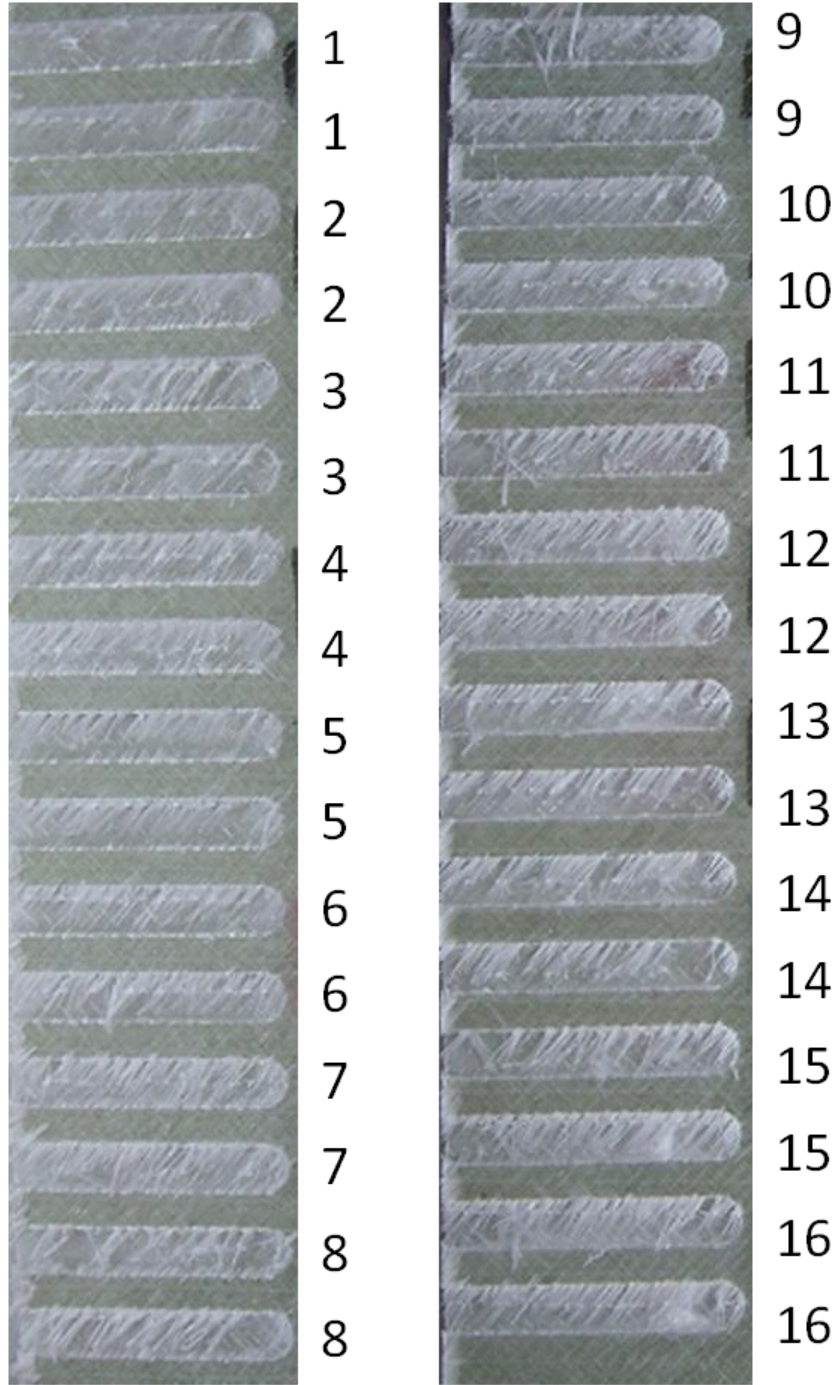


Şekil 4.11: $\pm 45^\circ$ yönlenmedeki plakada 1 ve 16 nolu kanallar

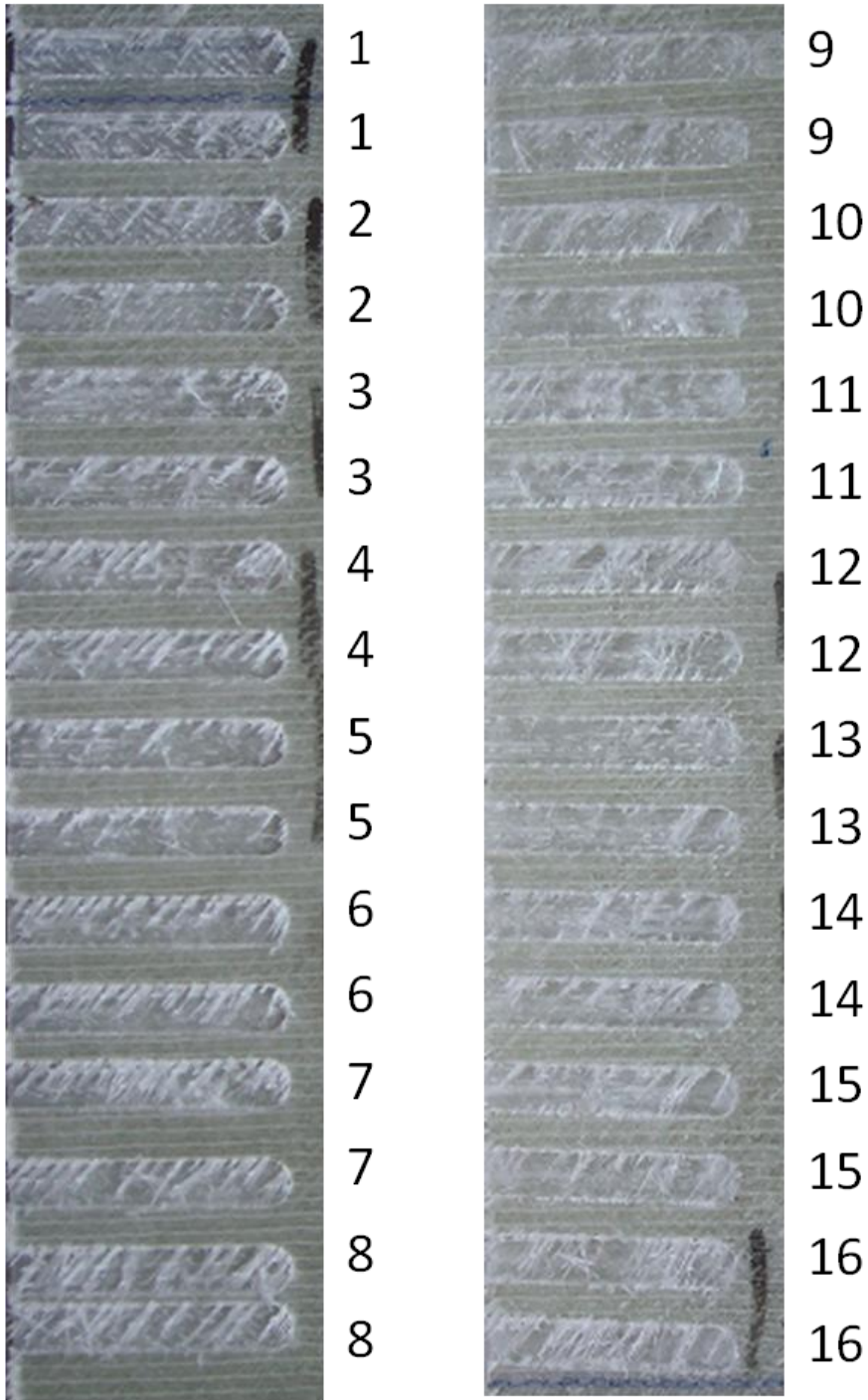
Şekil 4.11’de gösteriln çok yönlenmeli plakada ise çapaklar en fazla yukarı-frezeleme yönünde ve 45° yönlenmeli olarak oluştuğu gözlemlenmiştir. Bunu nedeni ise plakanın en üst katmanının 45° yönlenmeli tabaka olmasına bağlanmaktadır. En az çapak oluşumu ise yine düşük hız ve düşük ilerleme değerinde 1 ve 2 no ile gösterilen kanarlarda; en fazla çapak oluşumu da yüksek hız ve yüksek ilerleme değerlerinde 15 ve 16 nolu kanallarda gözlemlenmiştir ve şekil 4.12’de kıyaslanmaktadır. Her bir kanal numarası ve ilgili kesme parametreleri de çizelge 4.1’de verilmektedir.



Şekil 4.12 : $\pm 45/0/90^\circ$ yönlenmedeki plakada 2 ve 16 nolu kanallar



Şekil 4.13: $\pm 45^\circ$ yönlenmedeki plakalara işlenen kanallar ve numaraları



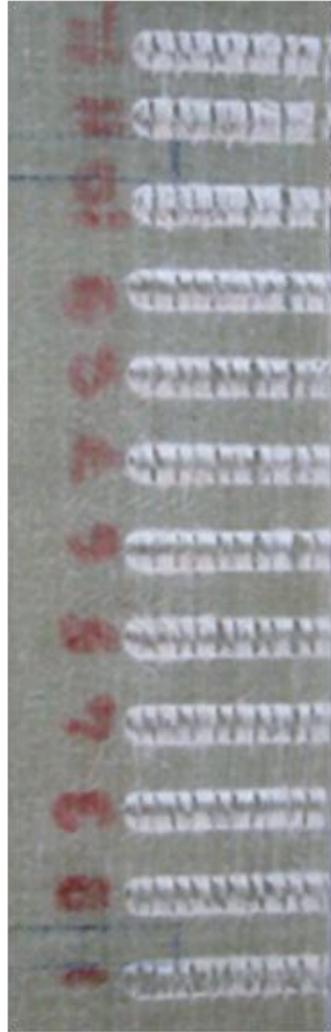
Şekil 4.14: $\pm 45/0/90^\circ$ yönlenmedeki plakalara işlenen kanallar ve numaraları

Plaka yüzeylerinde çapak oluşum mekanizması şekil 4.12’de gösterilen 2 ağızlı ters helisli bir takım ile incelenmiştir. Bu takım ile yapılan deneylerde işlenen kanallarda en fazla talaş oluşumu düşük kesme hızlarında gözlemlenmiş olup, yüksek kesme hızlarında ise temiz bir plaka yüzeyi elde edilmiş olmaktadır. Bu takım ile işlenen plakalar şekil 4.13’de gösterilmektedir.



Şekil 4.15: 2 ağızlı ters helisli takım

Deney sonuçlarından anlaşılmaktadır ki, laminat malzemenin en üst tabakası, takım geometrisi ve kesme parametreleri plaka yüzeyinde çapak oluşumunda etkili olmaktadır.



(a)

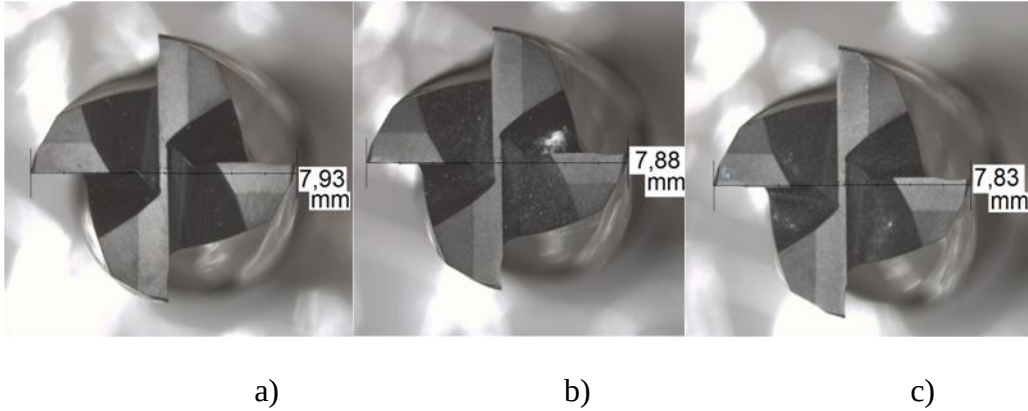


(b)

Şekil 4.16: 0/90° yönlenmede (a) düşük hızlarda, (b) yüksek hızlarda yüzeyde çapak oluşumu

4.1.4 Takım aşınması

Talaşlı işlemede takım aşınmasını gözlemlemek için, kesme işleminden önce ve sonra takım çapları optik mikroskopla ölçülmüş, aşınma yüzdeleri belirlenmiştir. Toplamda 1800 mm kesme uzunluğunda %1 oranında takım aşınması hesaplanmıştır. Bu da yapılan deneylerde önemli bir oranda takım aşınması oluşmadığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.17: Optik mikroskopla ölçülen takım çapı (a) işlemeden önce, (b) 0/90/±45° yönlenme için işlemeden sonra, (c) ±45° yönlenme için işlemeden sonra

4.2 İkinci Aşama Test Sonuçları

Yapılan ikinci aşama kesme deneylerinde helis açısı, talaş açısı ve serbest açının işlenebilirlik üzerine etkileri ve değişen yönlenme değerlerinde takım aşınmasının incelenmesi amaçlanmıştır. Deneyler sabit kesme hızı ve sabit devirde; helis açısının, talaş açısı ve serbest açının farklı değerinde kuvvet değişimleri gözlemlenerek gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvvetleri 2 farklı helis ve 3 farklı talaş açısı değerinde incelenmiş olup, deneylerin sonunda ±45° ve 0/90° yönlemeli plakalara farklı talaş ve serbest açılarındaki takımlarla aşınma aşınma testi uygulanmıştır. Diğer parametrelerden kesme derinliği ise aşınma testlerinde 1 mm olarak sabit alınmaktadır.

4.2.1 Kesme kuvvetleri

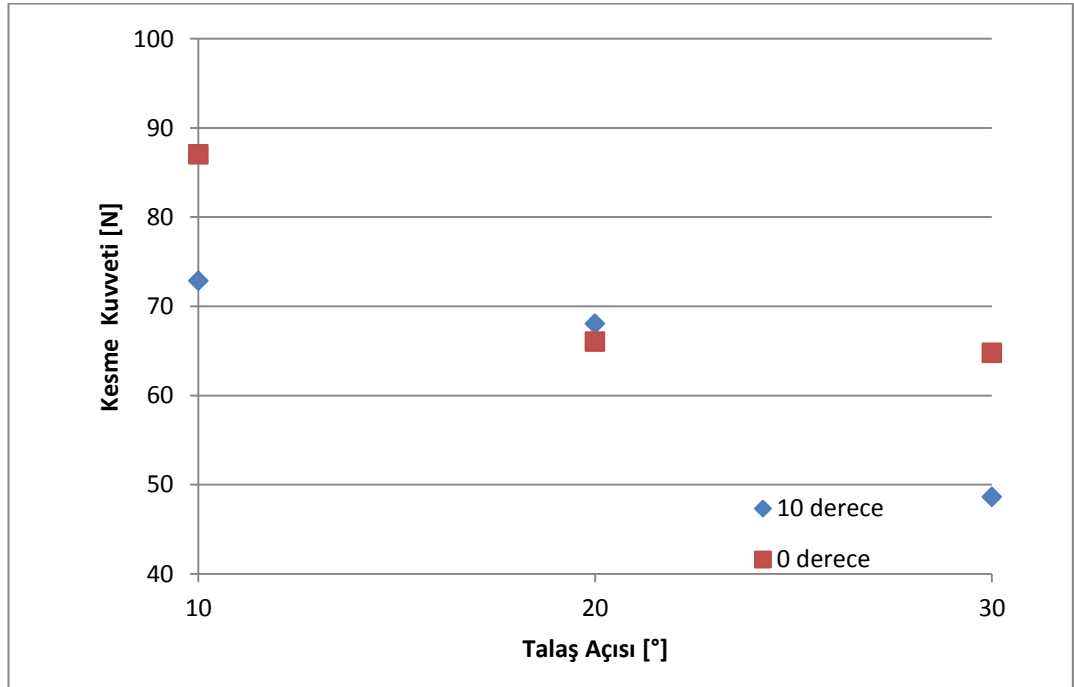
Deneylerde yönlenme olarak 0/90° elyaf yönlenmesi seçilmiş olup, kesme hızı 125 m/dak ve ilerleme 0,15 mm/devir olarak seçilmiştir. Helis açısının değişen değerleri 0° ve 10° olup; talaş açının değişen değerleri 10°, 20° ve 30° olmaktadır. Her varyasyon için 3 tekrarla gerçekleştirilen deneylerde önce helis açısının sabit

değerinde talaş açısının değişen değerlerine göre kuvvet değişimleri gözlemlenmiş olup elde edilen kesme kuvvetleri F_y kıyaslanmıştır. Çizelge 4.2’de deneyde kullanılan parametreler gösterilmektedir.

Çizelge 4.2: İkinci aşama deney parametreleri

Varyasyon #	1	2	3	4	5	6
Kesme Hızı [m/dak]	125	125	125	125	125	125
İlerleme [mm/dev]	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Helis açısı	0	0	0	10	10	10
Talaş açısı	10	20	30	10	20	30

Helis açısının sabit ve 0° olduğu değerlerde talaş açının artan değerlerinde kesme kuvvetlerinde azalma olduğu gözlemlenmiş olup, kesme kuvveti F_y ’nin en yüksek değeri 87 N, talaş açının en düşük değeri olan 10 derecede gözlemlenmiştir. Kesme kuvvetinin en düşük değeri 64,8 N ise talaş açının en büyük değeri olan 30 derecede elde edilmiştir. Talaş açının artmasıyla takım keskinliği arttığından dolayı, takım iş parçası üzerine daha kolay nüfuz etmekte ve bu durum da kesme kuvvetlerinin artmasını sağlamaktadır.



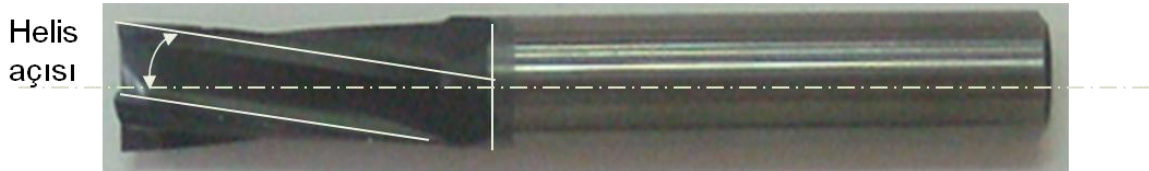
Şekil 4.18: 0/90° elyaf yönlenmeli plakada 0° ve 10° serbest açılarında; 10° , 20° ve 30° talaş açılarındaki takımlarla yapılan deneylerin kuvvet sonuçları

Şekil 4.18'deki grafikte kesme kuvvetlerinin 0 ve 10 derece serbest açısında; 10, 20 ve 30 derece olarak değişen talaş açlarındaki sonuçları karşılaştırılmaktadır.

Helis açısının 10° olduğu değerlerde de talaş açısının artan değerlerinde kesme kuvvetleri azalmakta ve kesme kuvvetinin en yüksek değeri 10 derece talaş açısında 72,9 N olup en düşük değeri ise 30 derece talaş açısında 48,6 N olarak elde edilmiştir.

Deney sonuçlarından anlaşılmaktadır ki talaş açısının 10° ve 30° değerinde yapılan kesme işlemlerinde ölçülen ortalama kesme kuvveti değerlerine göre; helis açısının 0° olduğu değerlerde maksimum kesme kuvveti değeri 10° olduğu değerden fazla çıkmaktadır. Talaş açısının 10° olduğu durumda, serbest açının 10° değerinde kesme kuvvetleri ortalaması 80-90 N arasında olup; 0 derece olduğu durumda ise 70-80 N aralığında olmaktadır. Bu durum helis açısının artmasıyla ölçülen F_y kuvvet bileşeni de azalmakta olması; basitçe ifade ile diğer kuvvet bileşenlerinin artmış olması şeklinde ifade edilebilir. Bundan dolayı en yüksek F_y kuvvet bileşen değerinin helis açısının '0' derece olduğu durumda ölçülmesi beklenmektedir.

Talaş açısının 20° değerlerinde ise ölçülen kesme kuvveti değerlerinde, helis açısının azalan değerindeki kesme kuvvetleri talaş açısının 10° olduğu durumdaki gibi artmamaktadır. 20° talaş açısında 0° ve 10° helis açılarındaki kuvvet değerleri yakın çıkmaktadır.



Şekil 4.19: Helis açısının takım üzerinde gösterimi

Birinci aşama kesme deneylerinde ölçülen kuvvet değerleri hatırlandığında; helis açısının 10° olduğu takım ile $0/90^\circ$ elyaf yönlenmeli plakada 0,15 mm/dev ilerlemede ve 150 m/dak kesme hızında gerçekleştirilen kesme işlemlerinde bulunan ortalama kesme kuvvet değeri 60-70 N arasında değişmektedir. İkinci aşama deneylerde ise bu değer aynı parametreler için 70-80 N arasında 70 N'a yakın çıkmaktadır. Fakat burada birinci aşama deneylerde kullanılan takımın talaş açısı 6° iken, ikinci aşama deneylerde kıyaslanmış olan takımın talaş açısı 10° 'dir. Bu açıdan talaş açısının büyük olduğu değerlerde artan kesme kuvvet değerleri elde edilebildiğinin söylenebilmesi için; diğer tüm parametrelerin sabit olduğu yalnız talaş açısının

değiştirdiği durumlarda tekrarlanacak deneylere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da devam edecek araştırmalara yön vermesi açısından gözönünde bulundurulabilecek bir durumdur.

4.2.2 Takım aşınması

Talaş açının ve serbest açının değişen yönlenme değerlerinde takım aşınması üzerine de etkisinin yorumlanabilmesi amacıyla, takım aşınma değerleri talaş açısının ve serbest açının iki farklı değerleri için ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Aşınma testi için toplamda 36 metre kanal işlemiş olup malzeme yönlenmesi $\pm 45^\circ$ ve $0/90^\circ$ olarak iki farklı yönlenmedir. Daha önce de belirtildiği gibi serbest açısı değişen değerleri 5° ve 10° olup talaş açısı 10° , 20° olarak değişmektedir ve kesme derinliği 1 mm olarak sabittir.

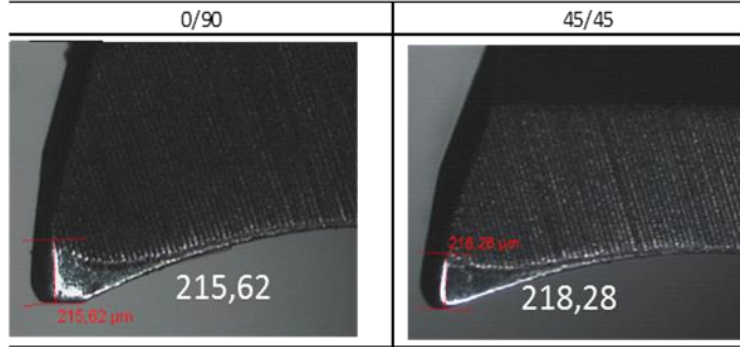
Şekil 4.16'da işlemler sonunda takımlarda yapılan aşınma ölçüm sonuçları ve aşınma resimleri karşılaştırılmalı olarak gösterilmektedir. Ölçülen en düşük aşınma değeri $192,73 \mu\text{m}$ olup talaş açısının ve serbest açının en düşük değerleri ile yönlenmenin $0/90^\circ$ olduğu durumda elde edilmiştir. En yüksek aşınma değeri ise $218,28 \mu\text{m}$ olup talaş açısının ve kesme açısının en yüksek değerleri ile yönlenmenin $\pm 45^\circ$ olduğu durumda elde edilmiştir. Sonuçlara göre talaş açısının ve serbest açının azalan değerlerinde takım aşınmasının da azalmakta olduğu görülmektedir. Aynı zamanda $\pm 45^\circ$ yönlenmeli plaka ile yapılan kesme sonunda takım aşınmasının, $0/90^\circ$ yönlenmeli plaka ile yapılan kesme sonundaki aşınmalardan daha fazla olduğu yorumlanabilmektedir.

Serbest açının sabit ve 10° derece olduğu durumda ve talaş açısının artan değeri için $0/90^\circ$ derece yönlenmeli plakada aşınma miktarları karşılaştırıldığında takım aşınmasında $15 \mu\text{m}$ civarında belirgin bir artış olduğu görülmektedir. Aynı durumda $\pm 45^\circ$ derece yönlenmeli plakada ise aşınma değerlerinde değişiklik oluşmamıştır. Bu durum takım aşınmasında yüksek açılardaki yönlenmenin etkinliğinin talaş açısına göre daha yüksek olması şeklinde yorumlanabilir. Benzer durum serbest açının sabit ve 20° derece olduğu durumda da geçerli olmuştur.

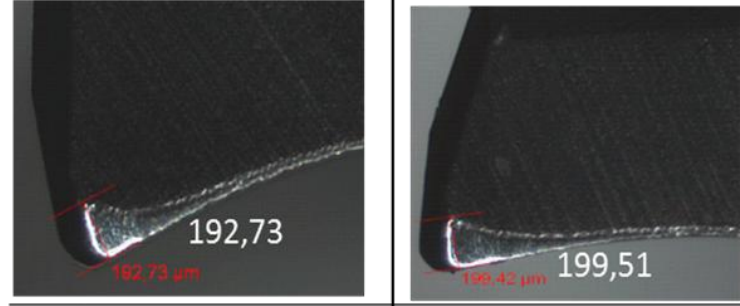
Talaş açısının sabit olduğu ve serbest açının artan değerlerinde ise her iki yönlenme türünde de aşınma değerlerinin yaklaşık $8 \mu\text{m}$ kadar arttığı gözlemlenmektedir.

Talaş açısı \ Serbest açısı

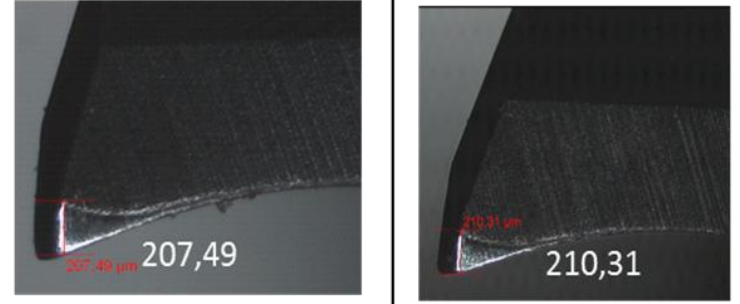
20° \ 10°



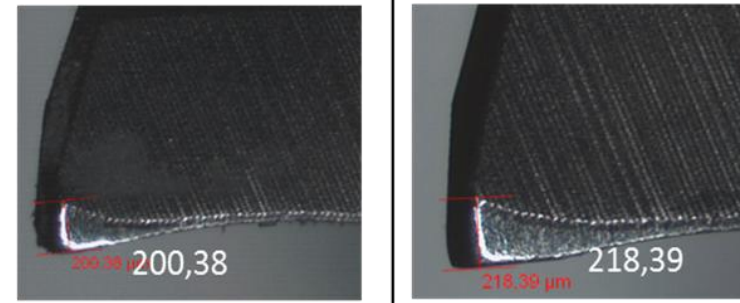
10° \ 5°



20° \ 5°



10° \ 10°



Şekil 4.20: $\pm 45^\circ$ ve $0/90^\circ$ elyaf yönlenmeli plakalarda; 5° ve 10° serbest açılarında; 10° ve 20° talaş açılarındaki takımlarla yapılan deneylerde takım aşınma sonuçları

Çizelge 4.3: İkinci aşama deney aşınma ölçüm sonuçları

Talaş açısı [°]	Serbest aç [°]	Yönlenme [°]	Aşınma değeri [µm]
10	5	±45°	199,51
10	5	0/90°	192,73
10	10	±45°	218,39
10	10	0/90°	200,38
20	5	±45°	210,31
20	5	0/90°	207,49
20	10	±45°	218,28
20	10	0/90°	215,62

Sonuçlardan anlaşıldığı şekilde ±45 derece yönlenmeli plakalarla 0/90 derece yönlenmeli plakalara yapılan kesme işlemindeki takım aşınmasından daha fazla olduğu belirgin şekilde gözlemlenmiştir. Literatürdeki araştırmalarda ise elyaf yönlenme açısının artması ile takım aşınmasının da arttığı belirtilmektedir. Palanikumar'ın araştırmasında 90° elyaf yönlenmesinde 30° elyaf yönlenmesine göre daha fazla takım yüzeyi aşınması gözlemlenmiş olup; bu durum elyaf yönlenme açısının artması ile işleme sırasında malzeme üzerine etkiyen basma gerilmelerinin de artmasına bağlanmaktadır [21, 22]. Aynı zamanda palanikumarın gerçekleştirmiş olduğu deneylerde de takviye yönlenmesinin artmasının takım aşınmasının da artmasına neden olduğu belirlenmiştir [19]. Bu durumun 0/90 ve ±45 derece yönlenmeli plakalarda gerçekleştirilen ikinci aşama deneylerde farklı gibi görünmesinin sebebi ±45 dereceli plakada 45 ve 135 dereceli takviyeler birlikte bulunurken; 0/90 dereceli plakada ise 90 dereceli yüksek açılı takviyelerin yanında 0 dereceli düşük açılı takviyelerin de işleniyor olmasına bağlanabilmektedir. Dolayısıyla yönlenmenin yüksek değerleri için takım aşınmasının artıyor olması beklenen bir durum olmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan tüm bu deneyler sonucunda kesme parametreleri, takım parametreleri ve takviye yönlenmesinin işlenebilirlik üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, çapak oluşumu ve takım aşınması sonuçları değerlendirilmiş olup, işlenebilirliğin belirtilen parametrelerden etkilenmesi ise özetle şu şekildedir;

- Elyaf yönlenmesi ve ilerlemedeki değişimler kesme kuvvetlerini etkilemekte; elyaf yönlenmesi karmaşıklaştıkça kesme kuvvetleri artmakta; ilerlemenin atmasıyla da kesme kuvvetleri artmaktadır. Ayrıca helis açısı ve talaş açısının artması kesme kuvvetlerini arttırmaktadır.
- Malzemenin üretim aşamasındaki vakum koşulları ve kurlenme koşulları işlenmiş yüzey pürüzlülüğünü etkilemekte; düzgün olmayan üretim koşullarından dolayı malzemenin işlenmesi sırasında boşluklar ve ayrılmalar oluşabilmekte, bu da işlenen yüzeyde pürüzlülüğü arttırmaktadır.
- Çapak oluşumu; takım geometrisi, kesme parametreleri ve son tabaka yönlenmesine bağlı olmaktadır. Genellikle düşük kesme hızı ve düşük ilerleme değerlerinde daha az çapak oluşumu gözlemlenmiş olup, çapak yönlenmeleri son tabakanın yönlenmesiyle benzerlik göstermektedir. Ayrıca ters helisli bir takım ile yapılan kesmelerde çapaksız yüzeyler elde edilmiştir.
- Takım aşınması ise elyaf yönlenmesi, talaş açısı ve serbest açığa bağlı olarak değişebilmektedir. Yönlenme açısının artması ile takım aşınması arttığı gözlemlenmiş olup; talaş açısı ve serbest açının da azalmasının da takım aşınmasını azaltıcı yönde etkisi olmaktadır.

İlerleyen çalışmalarda deneylere farklı talaş açısı ve serbest aı değerlerinde takımlarla devam edilebilir; bulunan kesme kuvveti değerleriyle talaş açısı ve serbest açısının kesme kuvvetleri üzerine etkileri detaylı şekilde incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **R. Teti**, “Machining of Composite Materials,” *CIRP Annals-Manuf. Tech.*, vol. 51, (2002), p. 611-634.
- [2] **J.Paulo Davim** *machining composite materials*, (WILEY Publications, USA, 2010)
- [3] **Arola, D., Ramulu, M., and Wang, D.H.** Chip Formation in Orthogonal Trimming of Graphite=Epoxy Composite. *Composites Part A*, (1996) p. 121–133.
- [4] **Wang, D.H., Ramulu, M., and Arola, D.** Orthogonal Cutting Mechanisms of Graphite-Epoxy Composite. Part I: Unidirectional Laminate. *Int. J. Mach. Tools and Manuf.* 35(1995) p.1623–1638.
- [5] **Hasegawa, Y., Hanasaki, S., Satanaka, S.**, Characteristics of tool wear in cutting of GFRP. In: *Proceedings of Fifth Int. Conference on Production Engineering*, Tokyo, Japan,(1984) p. 185–190.
- [6] **Palanikumar, K., Karunamoorthy, L., Karthikeyan, R.**, Assesment of factors influencing surface roughness on the machining of GFRP composites. *Mater. Des.* 27,(2007) 862–871.
- [7] **Sheik-Ahmad,P** *machining of polymer composite*, (Springer, Abu Dhabi, 2008),.
- [8] **K. Palanikumar, F. Mata, and J. Davim**, “Analysis of surface roughness parameters in turning of FRP tubes by PCD tool,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 204, (2008), p. 469-474.
- [9] **Davim J.P, Reis P., Lapa V., Antonio C.C.**, Machinability study on Polyetheretherketone (PEEK) unreinforced and reinforced (GF30) for applications in structural components, *Composite Structures*, Vol. 62, 2003, p. 67-73
- [10] **Ramulu M.**, Machining and surface integrity of fiber-reinforced plastic composites, *Sadhana*, Vol.22, 1997, p.449-472
- [11] **Wang X.M., Zhang L.C.**, An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fiber reinforced plastics, *Internaional Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, 2003, p. 1015-1022
- [12] **Sağlam H.**, 2001, Frezelemede kesme parametreleri ile kesme kuvvetlerinin değişimi ve bunların takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin deneysel incelenmesi, *Selçuk-Teknik Online Dergisi*, ISSN 1302-6178, Volume 1, Number: 3-2001
- [13] **D. Iliescu**, *Approches expérimentales at numériques de l’usinage a sec des composites carbone/epoxy*, PhD N 2008 ENAM 0045, Sciences des Métiers de l’Ingénieur, Arts et Métiers ParisTech, Bordeaux, 2008.

- [14] **Koplev A., Lystrup A., Vorm T**, The cutting process, chips and cutting forces in machining CFRP, *Composites*, Vol. 14, no 4, pp. 371-376, 1983
- [15] **J.P. Davim et al.**, *Composite Structures* 64 (2004), 493-500
- [16] **Davim J.P, Reis P.**, Damage prediction on milling carbon fiber-reinforced plastic using design experiments, *Journal of Material Processing Technology* 160, 160-167, 2005
- [17] **Akkurt M.**, 2004, *Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları*, Birsen Yayınevi
- [18] **Armarego E.J.A., Brown R.H.**, 1969, *The Machining of Metals*, Printice Hall
- [19] **K. Palanikumar and J. Davim**, “Assessment of some factors influencing tool wear on the machining of glass fibre-reinforced plastics by coated cemented carbide tools,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, (2009), p. 511-519.
- [20] **Konig W, Wulf Ch, Grab P**, Willerscheid H. Machining of fiber reinforced plastics. *Ann CIRP* 1985;34:537–48
- [21] **Palanikumar K., Davim J.P.**, Mathematical model to predict tool wear on the machining of glass fibre reinforced plastic composites, (2006)
- [22] **Takeyama H, Lijima N.**, Machinability of glass fibre reinforced plastics and application of ultrasonic machining. *Annal CIRP* 1988; 37/1:93–6.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Eda Eren AKKUZU

Doğum Yeri ve Tarihi: İSTANBUL / 1986

Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi

Bildiriler: Effect of Fiber Orientation on Machinability of Multiaxial GFRP in
Milling, AMPT2011, 13-16 July, Istanbul, Turkey