



Assessment of cutting performance on drilling with different drilling methods of fiber reinforced polymer composites: A Literature Review

Şenol Bayraktar*

Department of Mechanical Engineering, Recep Tayyip Erdogan University, Rize, 53100, Turkey

Highlights:

- Delamination and surface quality in drilling of fiber reinforced polymer composites.
- Effects of cutting parameters, cutting tool material and geometry on the delamination.
- Effects of adhesion and abrasive wear mechanisms on the delamination and surface quality.

Keywords:

- Metal stacks
- Drilling
- Delamination
- Hole surface quality

Article Info:

Received: 28.11.2016

Accepted: 26.03.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416371

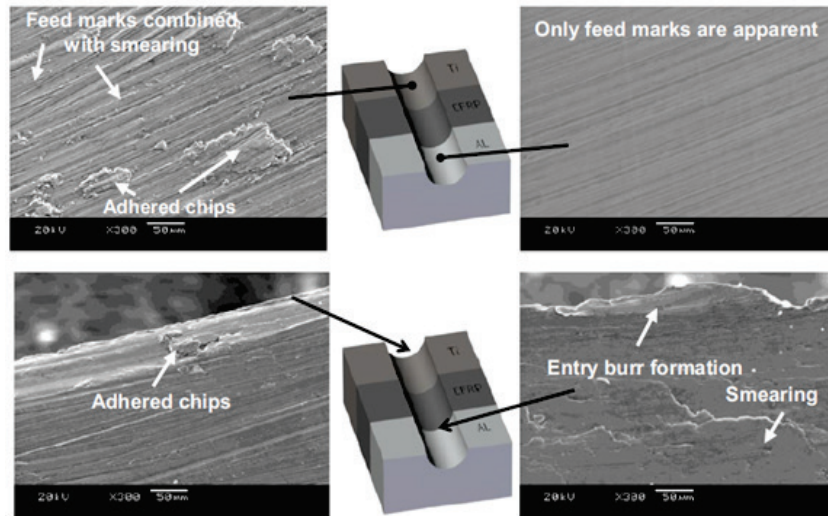
Acknowledgement:

Correspondence:

Author: Şenol Bayraktar
e-mail: senol.bayraktar@erdogan.edu.tr
phone: +90 464 223 75 18

Graphical/Tabular Abstract

Fiber reinforced polymer composite materials are important for aerospace industry due to their engineering properties. The delamination that occurs during cutting these materials with different cutting methods is adversely affecting engineering properties. This situation is prevalent especially in drilling operations. It has been found that stacking methods have been used in recent years and delamination has been significantly reduced. Therefore, in this study, it was aimed to transfer the findings obtained by researching the innovative studies made in the literature to the readers.



Purpose: The aim of this study is to identify the findings obtained from recent studies in the literature.

Theory and Methods: In this study, it is aimed to reveal the results obtained from the innovative studies carried out within the scope of the study.

Results: In the industrial applications, especially in aircraft industry, it is necessary to use the optimum cutting speed values in the stacked structures. However, in the case of stacked structures, it is necessary to use the optimum cutting speed values for each material. Ti or Al, FRP's/Ti, FRP's/Ti, FRP's/Ti and FRP's/Al/ FRP's stacked structures are used in the body and wing connections. Due to the adherence of the chips (BUE) to the machined surface and the cutting edge of the cutting tool due to adhesion, micro-level particles broken off from metal and FRP's materials due to the mechanical loads cause abrasive wear on the cutting tool. It has been determined that MQL and spray spray cooling method which can be used with PCBN or PCD tools as well as stepped or small angled point drills to minimize delamination, increase hole quality of metal and FRP's material to cause delamination in FRP's material.

Conclusion: It has been determined in the literature that low cutting speeds should be used in combination with high cutting speeds in order to reduce delamination. However, in addition to the cutting parameters, cutting tool geometry, coating method, and material type also have significant impact on cutting performance. It is considered that the abrasive water jet cutting method may be advantageous for metal-stacked ETPK structures in that the drilling of the front hole can reduce the occurrence of delamination particularly in the ETPK layers stacked with metals, thereby reducing the thermal effects that may occur during cutting. In addition, the relationship between the different fiber angles and the surface damage occurring at the cutting surface is of great importance in terms of the effectiveness of the results obtained by performing different statistical modeling studies for estimating the cutting temperatures in different regions as well as delamination, burr formation, cutting force and surface roughness in stacked structures.



Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin farklı delme yöntemleri ile delinmesinde kesme performansının değerlendirilmesi: Literatür Taraması

Şenol Bayraktar*

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı, 53100, Rize, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Elyaf takviyeli polimer kompozitlerin delinmesinde delaminasyon ve yüzey kalitesi
- Kesme parametreleri, kesici takım malzemesi ve geometrisinin delaminasyon üzerindeki etkileri
- Adhezyon ve abrasif aşınma mekanizmalarının delaminasyon ve yüzey kalitesi üzerindeki etkileri

Makale Bilgileri

Geliş: 28.11.2016

Kabul: 26.03.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416371

Anahtar Kelimeler:

Metal istifleme,
delme,
delaminasyon,
delik yüzey kalitesi

ÖZET

Elyaf takviyeli polimer kompozit (ETPK) malzemeler, yüksek mukavemet ve sönmeme, hafiflik, düşük termal genişleme gibi mühendislik özelliklerinden dolayı uzay ve havacılık sanayisinde cıvatalı, perçinli ve pimli bağlantılarda yaygınla kullanılmaktadır. Ancak, metallere göre daha karmaşık yapıya sahip oldukları için delme işlemi esnasında delik giriş ve çıkışında delaminasyon, matris fazında bozulma ve elyaf kopması gibi etkenler, bu malzemelerin sahip olduğu mühendislik özelliklerinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu malzemeler, uzay ve havacılık sektöründe özellikle gövde-kanat bağlantıları için titanyum ve alüminyum gibi metaller ile birlikte istifleterek delinmektedir. İstiflenmiş malzemelerin herbiri, farklı özelliklere sahip olduğundan, delme işlemi esnasında hassas işlenmiş yüzey kalitesi için optimum kesme şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, ETPK malzemelerin yekpare ve metaller ile istiflelenmiş halde delinmesi ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar araştırılarak elde edilen bulgular bir arada sunulmuştur.

Assessment of cutting performance on drilling with different drilling methods of fiber reinforced polymer composites: A Literature Review

H I G H L I G H T S

- Delamination and surface quality in drilling of fiber reinforced polymer composites
- Effects of cutting parameters, cutting tool material and geometry on the delamination
- Effects of adhesion and abrasive wear mechanisms on the delamination and surface quality

Article Info

Received: 28.11.2016

Accepted: 26.03.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416371

Keywords:

Metal stacks,
drilling,
delamination,
hole surface quality

ABSTRACT

Fiber reinforced polymer composite (FRPs) materials are widely used for joining bolted, riveted and pinned in aerospace and aircraft industries due to their engineering properties such as high strength, high damping, low weight and low thermal expansion. However, the structure of FRPs is more complicated than metals, the factors during the drilling process such as hole entry and exit delamination, matrix phase distortion and fiber breakage lead to the reduction of the engineering properties of these materials. These materials is stacked with metals such as titanium and aluminum for drilling operation, especially on body-wing connections in the aerospace and aircraft industries. Each stacked materials is required to determine the optimum cutting conditions for precision surface quality due to its different characteristics during drilling. In this study, the results obtained from studies are presented together regarding to the drilling operation of stacked with metals and unibody FRPs in literature.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: senol.bayraktar@erdogan.edu.tr / Tel: +90 464 223 7518

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elyaf takviyeli polimer kompozitler (ETPK), çeşitli fonksiyonel ve yapısal amaçlı havacılık, biyomedikal, spor, ulaşım ve savunma uygulamalarında yüksek özgül mukavemet ve korozyona karşı dirençlerinin iyi olması gibi özelliklerden dolayı yoğunlukla kullanılmaktadır. Bu malzemelerin birbirleri arasında montajı, ağırlıklı olarak vidalama veya perçinleme gibi birleştirme yöntemleri ile yapılmaktadır. Delme işleminden sonra elde edilen delik yüzey kalitesi, bu malzemelerin hassas bir şekilde montaj yapılması bakımından önem taşımaktadır. Ancak, delme işlemi esnasında kompozit malzemenin delik giriş ve çıkış yüzeyinde delaminasyon (peel-up/pull out), delik çıkış yüzeyinde çatlak ilerlemesi, matris fazında termal hasar oluşumu gibi kusurlar meydana gelmektedir [1, 2]. Bu kusurlar, delik yüzey kalitesi açısından önemli bir sorun teşkil etmekle birlikte [3, 4], bu malzemelerin hassas bir şekilde montajının yapılabilmesi için minimize edilmesi gerekmektedir [5, 6]. Delme işlemi esnasında, bu kusurların minimize edilebilmesi için ETPK'nın üst ve/veya alt bölümü metal malzeme ile desteklenmektedir. Bunun yanı sıra, mekanik sistemlerin performansının artırılmasında, özellikle termo-mekanik gerilmelere karşı direnç sağlanması için ETPK/metal (Titanyum, Alüminyum) istifleme yöntemi kullanılmaktadır. Günümüzde bu yöntem, yeni nesil Boeing 787 Dreamliner uçağının gövde-kanat bağlantılarında yoğunlukla kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve mükemmel korozyon direnci gibi metalurjik ve fiziksel özellik kombinasyonundan dolayı [7], özellikle ETPK/Al, ETPK/Ti, ETPK/Ti/ETPK, Ti/ETPK/Ti şeklinde istifleme yöntemleri kullanılmaktadır [8, 9]. Özellikle yüksek dayanım/ağırlık oranı, korozyon direnci ve özgül mukavemet bakımından ETPK/Ti istifleme yöntemi ETPK/Al'e göre daha iyi performans sergilemektedir [10]. Modern havacılık sanayisinde kullanılan bu yöntemler, ticari amaçlı büyük uçakların imalatında üstün mukavemet özelliklerinin elde edilmesinde anahtar rol oynamaktadır [7]. Delme operasyonunda istifleme yönteminin diğer bir avantajı ise yüksek adetlerde delik sayısının olduğu parçalarda ilave işlem gerektirmemesinin yanı sıra kompozit malzemede oluşan delaminasyonu ve matris fazında bozulmayı minimize ederek imalatta verimliliğin artırılmasına katkıda bulunmasıdır [11]. Bu malzemelerin sahip olduğu farklı yapısal özelliklere bağlı olarak delme işlemi esnasında, kesici takım ile istiflenmiş iş parçaları arasındaki etkileşimden kaynaklanan kesme kuvveti, tork, iş parçası yüzey kalitesinde değişkenlikler ortaya çıkabilmektedir. Bu durum, kesici takımın kesme performansını olumsuz etkilemektedir. Buna göre, kesici takım-ış parçası arasında oluşan bu etkileşimin kontrol edilebilmesi için kesme parametrelerinin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Metal malzemelerin aksine, elyaf takviyeli kompozitler karmaşık bir yapıya sahiptirler. İmalat operasyonları esnasında, kesici takım malzemesi ve geometrisi ile kesme parametreleri, her iki malzeme türü için farklılık göstermektedir [12]. Kesme parametreleri, ETPK malzemenin, delik giriş ve çıkışında delaminasyon, matris fazında termal bozulma ve çatlak oluşumu üzerinde etkili

olurken, izotropik yapıya sahip olan titanyum ve alüminyum gibi malzemelerin delinmesinde adhezyon aşınma mekanizmasına bağlı olarak ana kesme kenarında talaş yapışması (Built up edge-BUE) üzerinde etkili olmaktadır [13]. Bu durum, işlenmiş malzemelerin yüzey kalitesinin azalmasına ve kesici takım aşınmasına sebep olabilmektedir. Optimum kesme şartları belirlenerek bu olumsuz etkenler kontrol altına alınabilmektedir. Bu çalışmada, elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin delinmesi ile ilgili literatürde yapılan çalışmalara ait kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Bu bölümün ardından, 2. bölümde ETPK'ların özellikleri, ETPK'ların titanyum ve alüminyum plakalar ile istiflenerek delinmesi ile ilgili temel hususlar, kesici takım malzemesi ve geometrisinin kesme performansı üzerindeki etkileri, bölümde ise bu konu ile ilgili bundan sonra yapılması gereken çalışmaların hangi yönde olması gerektiği ve bu çalışma sonucunda araştırmalardan elde edilen sonuçların özeti, bir arada verilmiştir.

2. ELYAF TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLER (FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITES)

Elyaf takviyeli kompozitler, yüksek dayanım, korozyon direnci ve hafiflik gibi üstün mühendislik özelliklerinden dolayı birçok endüstriyel alanda yoğunlukla tercih edilmektedir. Uzun ve havacılık sanayisinde, yoğunlukla karbon ve cam elyaf takviyeli polimer kompozitler kullanılmaktadır [14]. Elyaf takviyeli kompozitlerin ana bileşenleri takviye (karbon, cam elyaf) ve polimer matris (termoplastik ve termoset reçine) fazından oluşmaktadır. Elyaf, malzemenin mekanik ve tribolojik özelliklerinin artırılmasına katkıda bulunurken, matris fazı ise elyafların birbirine bağlanmasını sağlamaktadır. Bu malzemelerin mekanik özellikleri, matris boyunca dizilen elyaf oryantasyonuna bağlıdır. Malzemenin sahip olması istenen özelliklerine göre elyaf oryantasyonları, tek yönlü (Şekil 1a), birbirine dik olacak şekilde örgülü (Şekil 1b) ve farklı açılarda ve katmanlar halinde (Şekil 1c) dizilerek belirlenmektedir [5].

2.1. Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitlerin Delinmesi (Drilling of Fiber Reinforced Polymer Composites)

ETPK malzemelerin delinmesi esnasında delik giriş ve çıkışında delaminasyon meydana gelmektedir. Giriş delaminasyonu, kesici takımın malzemenin üst yüzeyindeki tabakaya doğru ilerlemesiyle kesilmeye zorlanan elyaflar, matkap kanal boyunca çekme etkisi ile yukarıya doğru yönlendirilerek hasarın oluşmasına sebep olmaktadır (Şekil 2a). Bu durum, kısmen düşük ilerleme değerleri kullanılarak minimize edilebilmektedir [17]. Çıkış delaminasyonu ise matkap ucunun delik iç yüzeyinden aşağıya doğru ilerlemesine bağlı olarak malzeme alt yüzeyinde bulunan kesilmemiş elyaflar, itme kuvvetinin etkisi dışarıya doğru yönlendirilmesi ile gerçekleşmektedir (Şekil 2b) [18]. ETPK'ların delinmesi esnasında, delik giriş ve çıkışında oluşan yüzey hasarına ait maksimum çap ölçüsünün, matkap çap ölçüsüne oranlanması ile Eş.1'e göre delaminasyon faktörü belirlenmektedir (Şekil 2c).

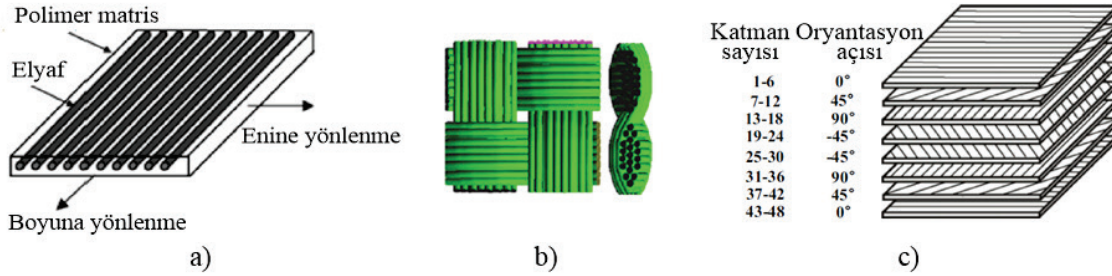
$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{drill}} \quad (1)$$

Eş.1'de F_d , delaminasyon faktörünü, D_{max} (mm) maksimum hasar çapını, D_{drill} (mm) ise matkap çapını ifade etmektedir (Şekil 2).

Literatürde yapılan birçok çalışmanın, ETKP'lerin delinmesi esnasında kesme parametrelerinin yanı sıra kesici takım geometrisinin delaminasyon faktörü, ilerleme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri ile ilgili olduğu gözlenmiştir. Karnik vd. [21] 5 mm çapında farklı uç açılara sahip karbür matkaplar ile örgülü karbon elyaf takviyeli polimer kompozit (KETPK) malzemenin farklı kesme hızları (53-630 m/dak), ilerleme oranlarında (1000-9000 mm/dak) delinmesinde minimum giriş delaminasyonu için yüksek kesme hızı, düşük ilerleme ve küçük matkap uç açısı kombinasyonunun kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Birçok araştırmacı ise ilerleme kuvveti ile delaminasyon oluşumunun yakından ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir [22, 23]. Tsao [24], KETPK malzemenin kademeli matkaplar ile delinmesinde ilerleme kuvvetinin azalması ile delaminasyonun azaldığını, Singh vd. [25] ilerleme oranı ve matkap uç açısının ilerleme kuvveti ve tork

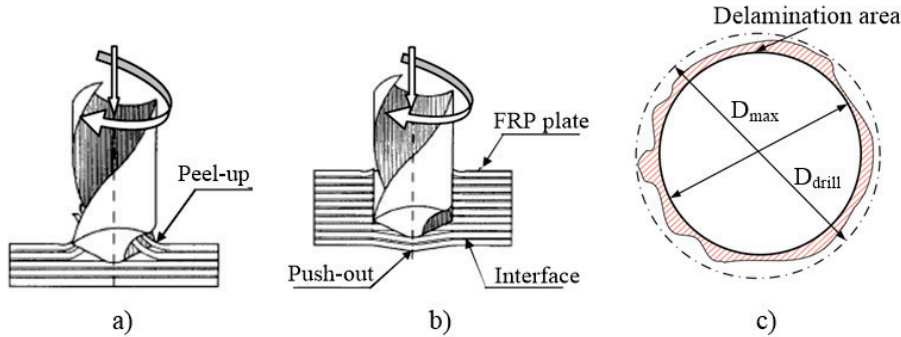
üzerinde önemli iki etken olduğunu, bunun da matkabın eksantrikliğini olumsuz etkileyerek delik yüzey kalitesini azalttığını belirtmişlerdir [26].

Zhang vd. [27] çok katmanlı ETKP'lerin delinmesinde delik çıkışında oluşan delaminasyon üzerinde, kritik ilerleme kuvvetinin etkisini ifade eden tahmini model geliştirmişlerdir. Khashaba vd. [28] cam elyaf takviyeli polimer kompozitin (CETPK) delinmesinde yüksek kesme hızlarında ilerleme kuvveti ve torkun azaldığını, Gaitonde vd. [29] KETPK'in delinmesinde, delaminasyonun minimize edilebilmesi için K20 karbür matkaplar ile düşük ilerleme, matkap uç açısı ve yüksek kesme hızı kombinasyonunun kullanılması gerektiğini, Durão vd. [30] KETPK malzemenin delinmesinde için farklı matkap geometrilerine sahip kesici takımlar kullanmışlardır (Şekil 3). İlerleme kuvveti ve delaminasyonun minimize edilebilmesi için düşük ilerleme değerinin yanı sıra 30° ve 120° uç açılı ve kademeli matkaplar önermişlerdir (Şekil 4). Shyha vd. [31] KETPK malzemenin standart ve kademeli karbür matkaplar (24-30° helis ve 118-140° uç açılı) ile Taguchi L_{12} deney düzeneğine göre delinmesinde takım ömrü ve ilerleme kuvveti üzerinde matkap geometrisi ve ilerleme oranının etkili olduğunu, takım ömrü açısından,



Şekil 1. Yaygın olarak kullanılan ETKP: a) Tek yönlü ETKP [5, 15] b) Örgülü ve katmanlı ETKP [5, 15] ve c) Farklı açılarda ve katmanlar halinde yönlendirilmiş ETKP [5, 16]

(Commonly used FRPs: a) Unidirectional fiber orientation ply, b) Bidirectional fiber orientations ply (woven-ply) and c) Typical quasi-isotropic laying-up sequence of a unidirectional-plies FRP composite laminate)



Şekil 2. Delaminasyon mekanizmaları: a) Giriş delaminasyonu b) Çıkış delaminasyonu [19], c) Delaminasyon faktörünün gösterimi [20]

(Delamination mechanisms: a) Entry delamination (peel-up) b) Exit delamination (push-out), c) View of delamination factor)



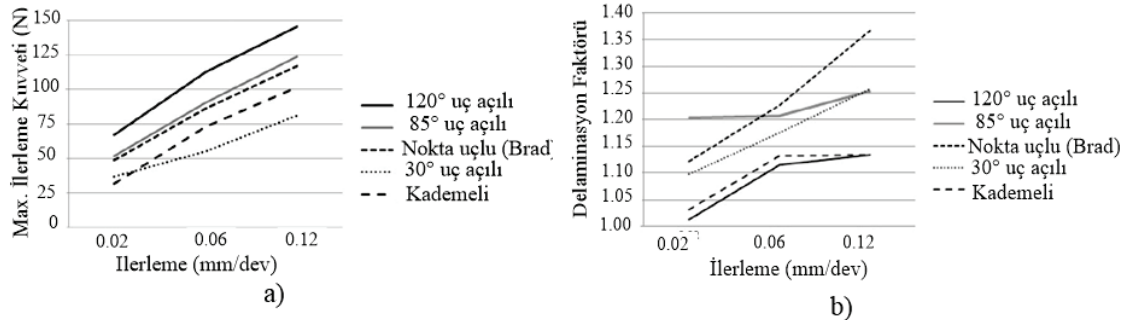
Şekil 3. Matkaplar: a) 120° uç açılı b) 85° uç açılı c) Nokta uçlu (Brad) d) 30° uç açılı e) Kademeli matkap [30]

(Drills: a) Twist 120° b) Twist 85° c) Brad d) Dagger e) Step)

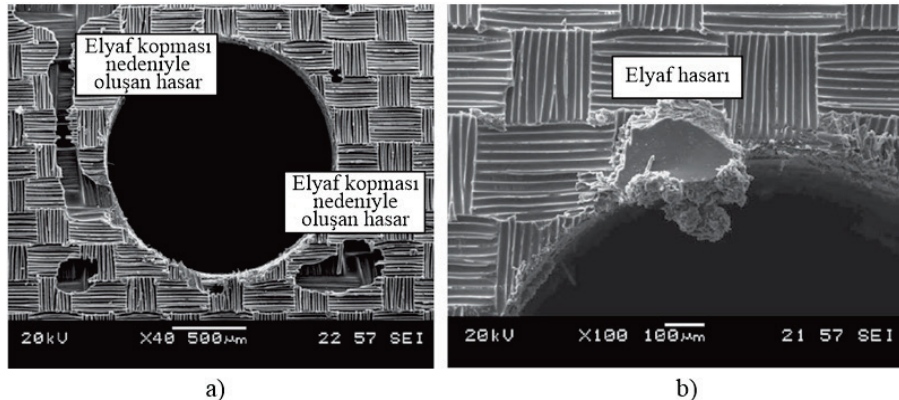
kaplamasız ve kademeli, 140° uç ve 30° helis açılı matkaplar ile 2900 (15 m/dak kesme hızı ve 0,2mm/devir ilerleme), TiN kaplamalı, 140° uç ve 24° helis açılı standart matkap ile 700 adet delik (45 m/dak kesme hızı ve 0,1 mm/dev ilerleme) delinebilmiştir. Giriş ve çıkış delaminasyonu için benzer sonuçlar elde edildiği gözlenirken, helis açısının delaminasyon üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir (Şekil 5a-b). Karnik vd. [21] farklı uç açılı matkaplar (85° - 115° - 130°) uç açılı matkaplar ile KETPK malzemenin delinmesi sonucunda, delaminasyonun azaltılabilmesi için düşük ilerleme ve matkap uç açısı ile birlikte yüksek kesme hızı kombinasyonunu önermişlerdir. Elde edilen deneysel sonuçlar yapay sinir ağları ile tahmin edilmiş ve sonuçların etkinliği ortaya konulmuştur.

Lazar ve Xirouchakis [32] KETPK ve CETPK malzemelerin delinmesinde, kesici takım geometrisinin (Şekil 6) kesme kenarında oluşan yük dağılımları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, T1 takımında, kesme kenarındaki yük dağılımları ani değişimler gösterirken, T2 takımında ise yük dağılımı kesici ağız yarıçapı boyunca, T3 takımında ise özellikle yüksek ilerleme değerlerinde yük dağılımı kesici ağızın kesmeye başladığı ilk noktada hızla arttığı belirlenmiştir. Tüm kesici takımlar ile KETPK malzemenin delinmesinde oluşan ilerleme kuvvetleri, CETPK malzemenin delinmesine göre %3, ortalama tork ise CETPK'nın delinmesinde %20 daha fazla oluşmuştur. Diğer bir çalışmada [33], örgülü KETPK malzemenin tungsten

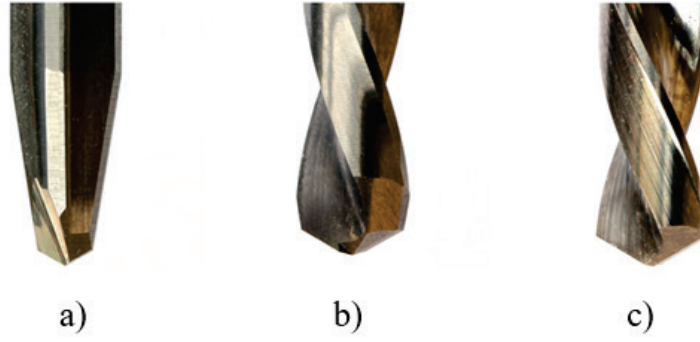
karbür matkaplar ile delinmesinde, ilerlemenin delik çıkış delaminasyonu ve ilerleme kuvveti üzerinde etkili olduğu, optimum kesme parametreleri olarak düşük ilerleme ve yüksek kesme hızı değerlerinin ($N=12000$ dev/dak, $f=0,137$ mm/dev) (Şekil 7b) kullanılması gerektiğini, kesme bölgesinde sürtünmeden dolayı oluşan ısı, malzemenin matris fazında bozulmaya sebep olarak yüzey kalitesini de olumsuz etkilediği belirlenmiştir (Şekil 7a). Doğal elyaf takviyeli polimer kompozit (DETPK) ile KETPK malzemenin HSS matkaplar ile delinmesinde kesme hızının artması ile her iki malzemede de delaminasyon azalmakta, aynı kesme şartlarında ise KETPK malzemede delaminasyon, DETPK malzemede ise yüzey pürüzlülüğü daha fazla oluşmaktadır. Delme işlemi altı farklı aşamada incelendiğinde (Şekil 8) 2. ve 3. aşamalarda, özellikle de ilerleme parametresinin artmasına bağlı olarak ilerleme kuvvetleri de artmaktadır. Optimum kesme şartları, maksimum kesme hızı, minimum ilerleme ve matkap çapı olarak kullanılması ile ilerleme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon minimize edilebilmektedir [34]. KETPK malzemenin TiN kaplamalı karbür matkap ile ultrasonik delme (UD) işleminde (Şekil 9) ilerleme kuvvetleri, geleneksel delme (GD) işlemine göre %60 daha az olmaktadır (Şekil 10). Gerilme testlerinde gözlenen ultrasonik yumuşatma etkisinin yanı sıra aralıklı kesme işlemi, ilerleme kuvvetlerinin azalmasında etkili olmaktadır. UD işlemi ile delaminasyon önemli derecede azaltılabilmektedir (Şekil 11) [35].



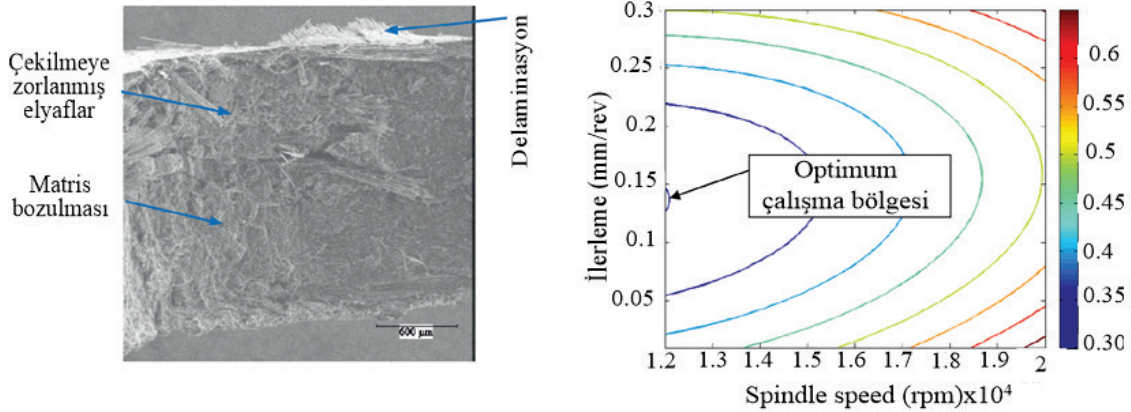
Şekil 4. İlerlemenin delaminasyon faktörü ve ilerleme kuvveti üzerindeki etkisi: a) İlerleme-ilerleme kuvveti ilişkisi b) İlerleme-delaminasyon faktörü ilişkisi [30] (Effect of feed rate on delamination factor and thrust force: a) Relationship between feed rate thrust force b) Relationship between feed rate and delamination factor)



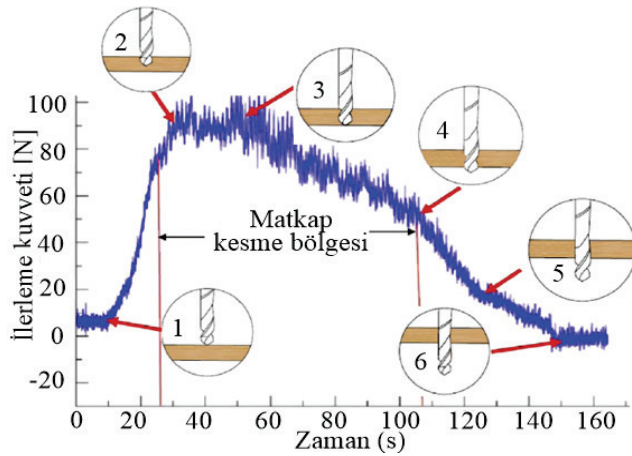
Şekil 5. Delik kenarında oluşan farklı problemler: a) Elyaf kopması nedeniyle oluşan hasar b) Elyaf hasarı [31] (Different problems at the edge hole: a) Damage due to peel ply removal b) Peel ply debris)



Şekil 6. Farklı matkap geometrileri: a) Açılı karbür rayba matkapı-T1 b) Sekiz kesici ağızlı karbür matkap-T2 c) Standart karbür matkap-T3[32] (Different drill geometries: a)Tapered drill reamer-T1 b) 8-flute drill twist c) 2-flute twist drill)



Şekil 7. KETPK'in delinmesi: a) Delaminasyon oluşumu ($N=12000\text{dev/dak}$, $f=0,01\text{ mm/dev}$) b) Optimum çalışma bölgesinin gösterimi [33] (Drilling of CFRP: a) Delamination formation ($N=12000\text{rev/min}$, $f=0.01\text{ mm/rev}$) b) View of the optimum working area)



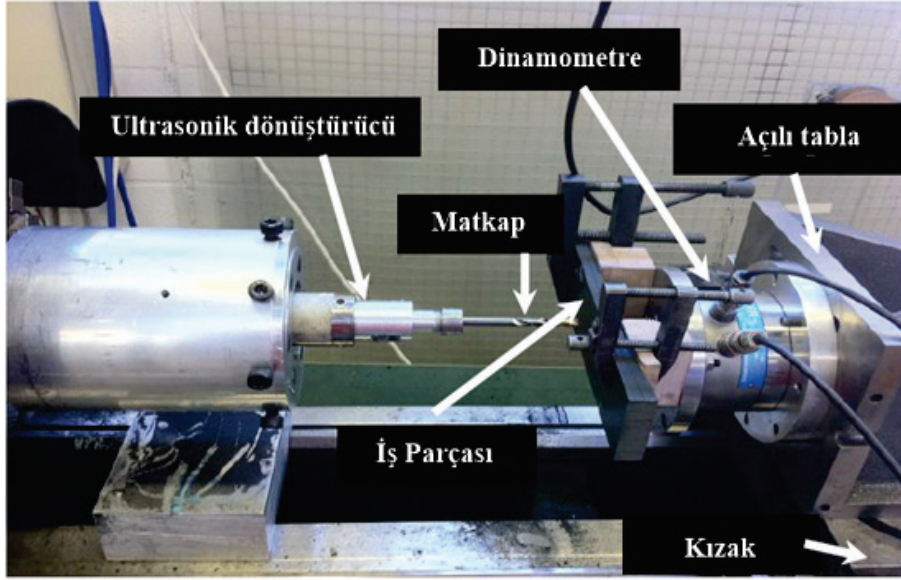
Şekil 8. Delme işlemi esnasında oluşan ilerleme kuvvetinin zamana göre değişimi [34] (Interaction between thrust force and time during drilling operation).

2.2. Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitlerin Metaller İle İstiflenerek Delinmesi

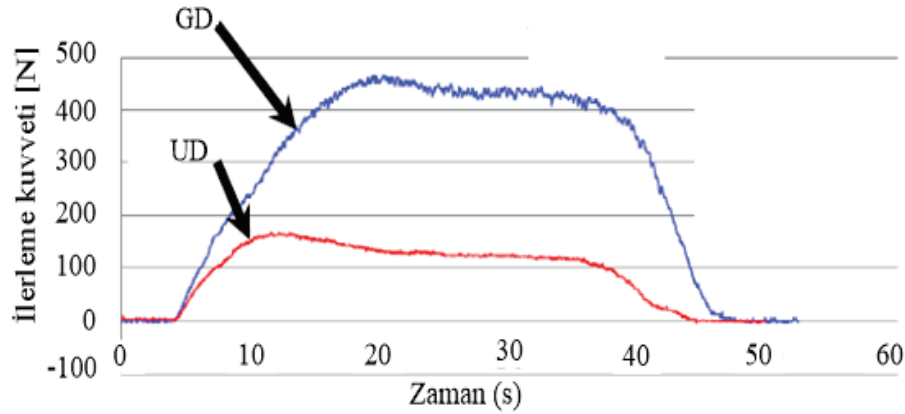
(Drilling of Fiber Reinforced Polymer Composites With Metal Stacks)

Kompozit malzemelerin aksine, özellikle alüminyum ve titanyum gibi izotropik yapıya sahip olan metallerin

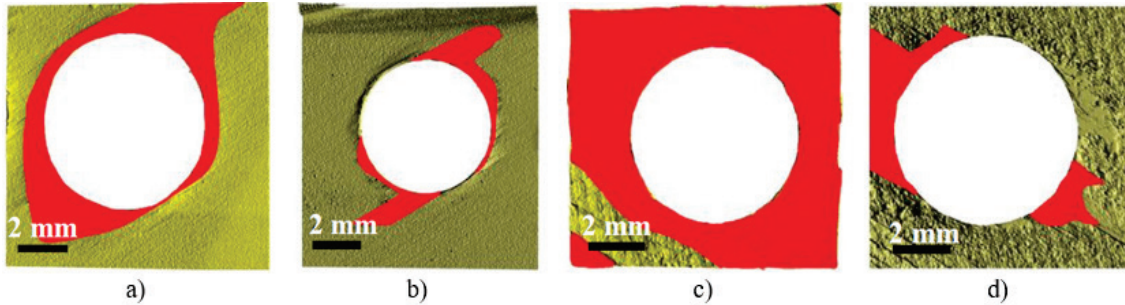
delinmesinde ana problem, kesici takım ile malzeme arasında termal etkiye bağlı olarak adhezyon aşınma mekanizmasından dolayı kesme kenarı üzerine talaşın yapışmasıdır (Built up edge-BUE). Kesme kenarında BUE oluşumu, kesici takımın aşınmasına, delik ölçü hassasiyetinin ve yüzey kalitesinin azalmasına sebep olmaktadır [13]. Birçok araştırmacı, düşük kesme hızları kullanıldığında (25 m/dak'ya kadar) esas kesme kenarına alüminyumun yapıştığını belirtmiştir[36, 37]. Kesici takımda BUE oluşumu, özellikle yüksek ilerleme değerlerinde ve derin delik delme işlemlerinde kısmen minimum miktarda yağlama (MQL-Minimum quantity lubrication) yöntemi kullanılarak önenebilmektedir [36]. Kesici takımda BUE oluşumunun azaltılarak delik yüzey kalitesi ve işleme verimliliğinin artırılması için nano kaplamalı matkaplar kullanılabilir [37]. Bunun yanı sıra, delik yüzey kalitesini etkileyen diğer bir yöntem ise kesme hızının artırılmasıdır [38, 39]. Titanyum ve alüminyum gibi malzemelerin delinmesinde ölçüsel hassasiyet ve hassas yüzey kalitesi elde etmek için optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Literatürdeki deneysel çalışmalar incelendiğinde, ETPK'lerin delinmesinde delik giriş ve çıkışında delaminasyonun olduğu, ancak ilerlemenin etkisiyle delik çıkış bölgesinde oluşan delaminasyonun daha fazla olduğu



Şekil 9. Deneysel düzenek [35] (Experimental setup)



Şekil 10. İki farklı delme yönteminde oluşan ilerleme kuvvetlerinin zamana göre değişimi [35]
(Relationship between thrust force-time in two different drilling techniques)



Şekil 11. Delaminasyon analizi, a) GD'de oluşan giriş delaminasyonu, b) UD'de oluşan giriş delaminasyonu, c) GD'de oluşan çıkış delaminasyonu ve d) UD'de oluşan çıkış delaminasyonu [35]
(Delamination analysis: a) Entry delamination in CD, b) Entry delamination in UD, c) Exit delamination in CD and d) Exit delamination in UD)

belirlenmiştir [17]. ETPK'lerin istiflenerek delinmesinde kullanılan yöntemler, delaminasyonun azaltılabilmesi bakımından önemli bir etkiye sahiptir. İstifleyerek delme işlemi için genel olarak üç farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi, "metal/ETPK", ikincisi, "ETPK/metal" üçüncüsü ise "metal/ETPK/metal" istifleme yöntemleridir.

2.2.1. Metal/ETPK ve ETPK/metal istiflenmiş plakaların delinmesi (Drilling of metal/FRP and FRP/metal Stacks)

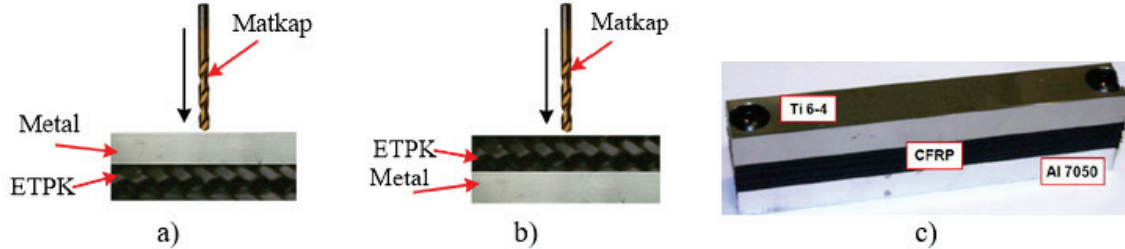
Plakaların istiflenmesinde, metal malzemesi olarak genellikle titanyum ve alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Metal/ETPK'nın delinmesi esnasında

kesici takım/malzeme arasındaki sürtünmeye bağlı oluşan ısı ve kimyasal etkileşime bağlı olarak kesici kenarda BUE meydana gelmektedir. BUE etkisiyle kesici takımda başlayan aşınma, ETPK malzemenin delinmesi esnasında delaminasyonu arttıran bir etken olarak ortaya çıkmaktadır. İlerleme kuvvetinin etkisiyle, ETPK malzemenin delik çıkışında oluşan delaminasyon, diğer istifleme yöntemlerine göre daha fazla gerçekleşmektedir. Ancak, delik girişindeki delaminasyonun minimize edilebilmesi bakımından özellikle, uzay ve havacılık sanayisinde hibrit montaj işlemlerinin yapıldığı alanlarda genel olarak bu yöntem tercih edilmektedir (Şekil 12a).

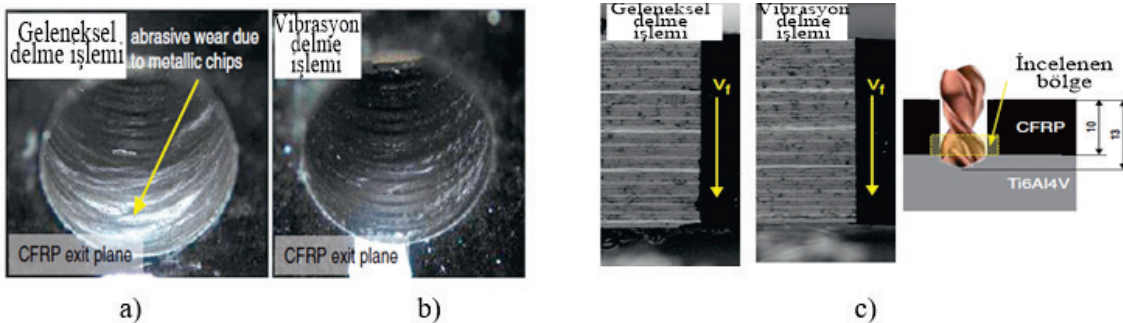
ETPK/Metal istifleme yöntemi, kullanım alanının yanı sıra delaminasyonun azaltılabilmesi bakımından sıklıkla tercih edilmektedir (Şekil 12b). Özellikle, ETPK malzemenin delinmesi esnasında delik çıkışında bulunan metal plakanın desteği ile delaminasyon oluşumu önemli miktarda azalmaktadır. Delme işlemi esnasında metal plakadan çıkan ve delik boyunca geçen talaşın şekli ve uzunluğunun yanı sıra esas kesme kenarı üzerinde oluşan BUE etkisiyle takım aşınmasının meydana gelmesi, ETPK plakasının delik yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir [41]. Bu durumda, delik yüzey kalitesinin artırılması bakımından bazı araştırmacılar, küçük ve kesik talaş oluşumu için 0,1 mm/dev ilerleme ve 2500 dev/dak kesme hızı parametreleri tavsiye etmektedirler. Nano kaplamalı (nc-CrAlN/a-Si₃N₄) matkapların kullanılması da istenilen delik yüzey kalitesinin için önemli etkiye sahiptir. Nano kaplama metodunun, KETPK/Al istiflenmiş plakanın delinmesinde, kompozit malzemenin delik yüzey pürüzlülüğünü ve ilerleme kuvvetini sırasıyla,

%30 ve %20 oranında azalttığı belirlenmiştir [42, 43]. Delik yüzey kalitesini etkileyen en önemli hususlar, takım aşınması, işlenmiş yüzey kalitesi ve plakalar arasında meydana gelen çapak oluşumudur [44, 45]. Kim ve Ramulu [46], Gr-Bi/Ti'nin delinmesinde kesme hızının artması ile çap hatasının ve delik yüzey pürüzlülüğünün azaldığını, ilerlemenin artması ile delik çap hatası ve yüzey pürüzlülüğünün arttığını belirtmişlerdir.

Pecat ve Brinksmeier [47], KETPK/Ti'ninAlCrN kaplamalı tungsten karbür matkaplar ile delinmesinde, titanyum plakada oluşan yüksek kesme sıcaklıkları ile birlikte tahliye edilen Ti talaşları, KETPK malzemenin delik yüzeyinde termo-mekanik hasara sebep olduğunu, düşük frekanslı vibrasyonlu delme işleminin ise geleneksel delme işlemine göre daha az yüzey hasarına sebep olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 13). KETPK/Ti istiflenmiş yapıda Ti malzemenin PCD matkaplar ile delinmesi, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek termal iletkenlik özelliklerinden dolayı, tungsten karbür (WC) matkaplara göre adhezyon aşınma mekanizmasını önemli ölçüde azaltmaktadır. Böylelikle, KETPK'nin delinmesinde ilerleme kuvveti, WC'ye göre daha düşük değerlerde olmaktadır. İlerleme kuvvetlerinin minimize edilmesi, KETPK malzemenin kesme yüzeyinde oluşabilecek delaminasyonu azaltmada etkin bir kriterdir. Yüksek kesme hızlarında tungsten karbür matkaplar ile titanyumun delinmesinde, aşınmanın etkisi ile ilerleme kuvvetleri, delik sayısına bağlı olarak artmaktadır (Şekil 14)[48]. KETPK/Ti'nin özel geometriye sahip matkaplar ile delme işleminde, her bir aşamada farklı ilerleme kuvvetleri meydana gelmektedir.



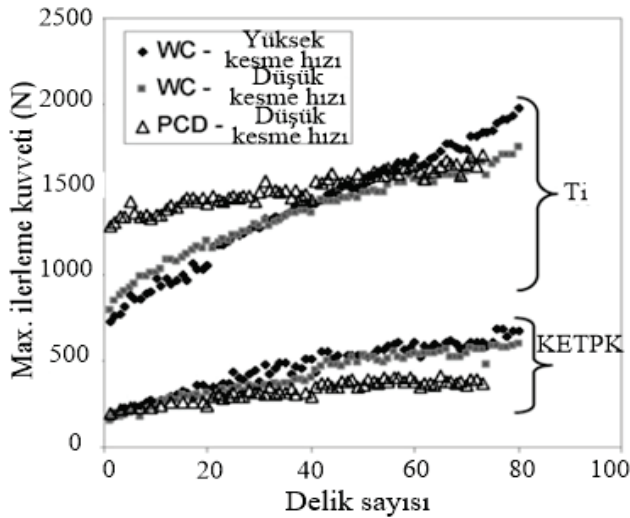
Şekil 12. İstiflenmiş metal ve kompozit malzeme delme yöntemleri: a) Metal/ETPK b) ETPK/Metal [6] ve c) Metal/ETPK/Metal [40] (Drilling methods metal and composite material stacks: a) Metal/FRP, b) FRP/Metal and c) Metal/FRP/Metal).



Şekil 13. KETPK/Titanyumun delinmesi: a) Geleneksel delme işlemi b) Vibrasyonlu delme işlemi ve c) Geleneksel ve vibrasyonlu delme işleminde KETPK malzeme yüzey durumu [47]

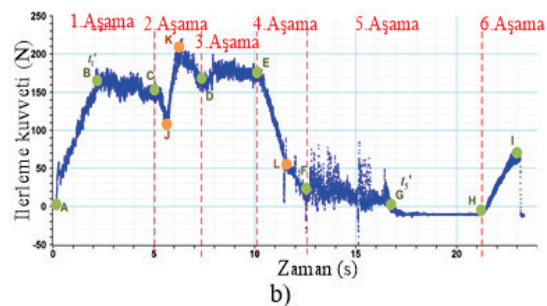
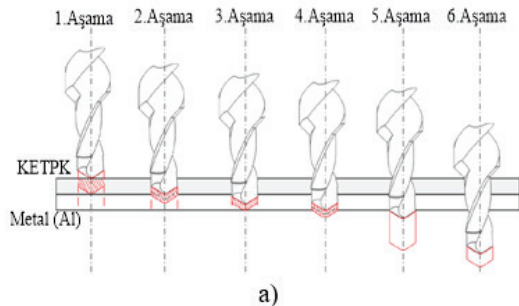
(Drilling of CFRP/Ti: a) Conventional drilling, b) Vibration drilling and c) Surface quality of CFRP material in conventional and vibration drilling)

Kesici takım geometrisinin yanı sıra kesme parametreleri ile değişen ilerleme kuvvetleri, her bir aşama için ayrı ayrı matematiksel olarak hesaplanabilmektedir (Şekil 15) [49]. KETPK/Ti-6Al-4V'de KETPK plakasının 1. ve 15. deliğinin girişinde (Şekil 16a ve 16b) kayda değer bir delaminasyonun olmadığı, 1. delme operasyonunda delik çıkışında kayda değer bir delaminasyonun oluşmadığı (Şekil 16c) ancak, 15. delme operasyonunda delik çıkışında Ti malzemeden çıkan abrasif toz parçacıklar, kesici takımda krater ve yan yüzey aşınmalarına sebep olarak delaminasyon oluşumunu arttırmaktadır (Şekil 16d) [50]. Titanyumun sahip olduğu düşük termal iletkenliğinin yanı sıra kesici takıma TiAlN kaplama işlemi ve kesme anında yüksek basınçlı soğutma suyunun uygulanması ile kesici takımda oluşabilecek adhezyon aşınma mekanizması azaltılarak delaminasyon oluşumu minimize edilebilmektedir [50]. TiAlN ve TiN çok katmanlı kaplamalı karbür matkaplar ile KETPK/Ti'nin delinmesinde oluşan titanyum talaşları (Şekil 17a, b, c), KETPK malzemenin delik girişinde özellikle de ilerlemenin artması ile yüzey hasarının ve delik yüzey pürüzlülüğünün artmasına, delik ölçü hassasiyetinin ise azalmasına sebep olmaktadır (Şekil 17d, e, f) [51].

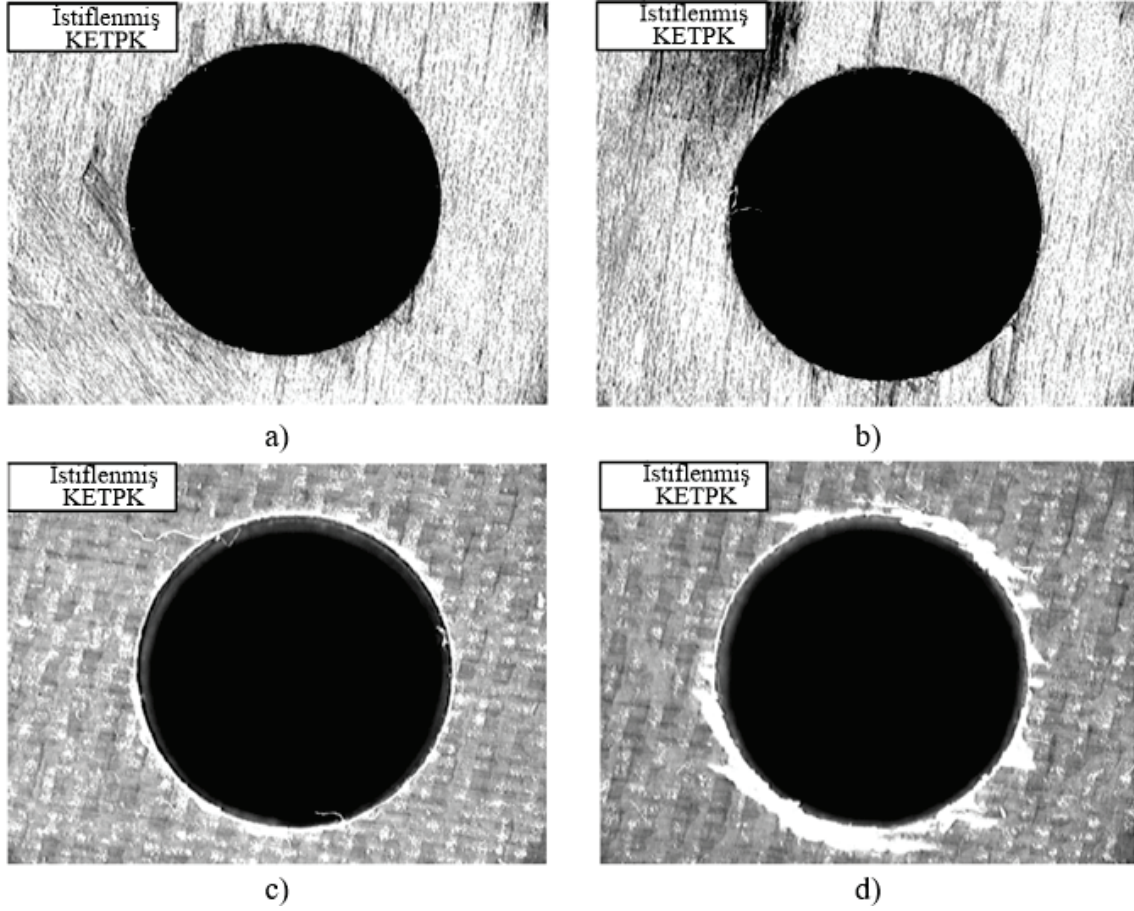


Şekil 14. Farklı kesici takım ve kesme şartlarında delik sayısına bağlı olarak maksimum ilerleme kuvveti değerleri [48] (Maximum thrust force depending on the number of holes drilled by different cutting tools and conditions)

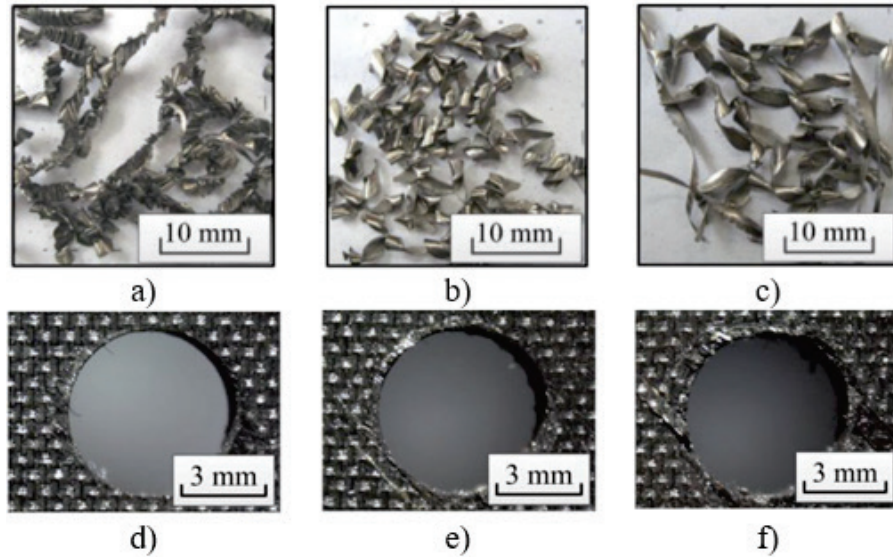
KETPK/Ti'nin karbür kesici takımlar ile geleneksel delme (GD) ve delik büyütme (DB) işleminde, kesme işlemi esnasında üç farklı nokta (A: KETPK malzemenin orta eksen, B: KETPK/Ti'nin arayüzü, C: Ti malzemenin orta eksen) için sıcaklık ölçümleri (Şekil 18a) yapıldığında, en fazla sıcaklığın titanyum malzeme yüzeyinde (Şekil 19c) gerçekleşmektedir. Bu durum, yüksek kesme sıcaklıklarına bağlı olarak adhezyon etkisi ile kesici takım yüzeyine yapışan titanyum talaşı (Şekil 18b), KETPK malzemenin delik yüzey kalitesinin azalmasına sebep olmaktadır (Şekil 18a) [52]. Şekil 19a-b-c'de referans delme süresine göre, delik büyütme yönteminde A, B ve C noktalarında oluşan sıcaklıkların geleneksel delme işlemine göre daha az ve en düşük kesme sıcaklığının her iki delme yönteminde de A noktasında gerçekleşmektedir. Delik büyütme (DB) işleminde oluşan kesme sıcaklığı, geleneksel delme (GD) yöntemine göre ortalama %36,3 daha az oluşmakta ve böylelikle DB işlemi ile KETPK malzemede daha iyi yüzey kalitesi elde edilmektedir. Ramulu vd. [53] HSS, HSS kobalt ve karbür matkaplar ile Gr-Bi/Ti'nin delinmesinde, HSS ve HSS kobalt matkaplarda kesme hızının artması, Ti plakasının delinmesi esnasında yüksek ısı oluşumu, takım aşınmasını ve her iki malzemenin delik yüzey pürüzlülüğünü arttırdığını (Şekil 20a-b) ve optimum kesme şartları olarak 660 dev/dak kesme hızı, 0,08 mm/dev ilerleme ve karbür matkapların kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. KETPK/Al plakaların elmas kaplamalı sementit karbür matkaplar ile delinmesinde, alüminyum plakasının delinmesi esnasında ilerlemenin artmasına bağlı olarak talaş tahliyesi zorlaşmakta ve bu durum ilerleme kuvvetini ve delme sıcaklığını arttırmaktadır (Şekil 21b). Kesme esnasında oluşan bu durumlar, KETPK malzemenin delik yüzey kalitesinin azalmasına ve delaminasyon oluşumunun artmasına da sebep olmaktadır. Daha düşük ilerleme değerleri kullanılarak (Şekil 21a) istenmeyen bu durumlar minimize edilebilmektedir [54]. Benzer şekilde istifleme yönteminin kullanıldığı diğer bir çalışmada, optimum kesme şartları için elmas kaplamalı tungsten karbür matkaplar tavsiye edilmiştir. Alüminyum talaşlarının tahliyesi esnasında sürtünmeden dolayı KETPK malzemenin delik girişinde yüzey hasarı (Şekil 22d) oluşmakta ve karbon elyaf partiküllerin etkisiyle abrasif, alüminyumun delinmesi esnasında ise adhezyon (BUE) aşınma mekanizmaları meydana gelmektedir (Şekil 22) [55].



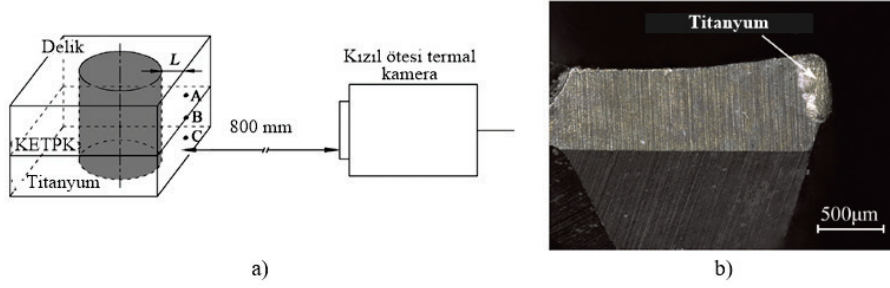
Şekil 15. KETPK/Ti'nin havşa açarak delinmesinde farklı kesme aşamalarının gösterimi, a) Altı farklı aşamaların gösterimi ve b) Her bir aşama için ilerleme kuvvetinin zamana göre değişimi- $f: 0,06 \text{ mm/dev}$, $n: 1000/60 \text{ rad/s}$ [49] (View of different cutting steps in drilling-countersinking (DC): a) View of six different steps and b) Interaction between thrust force and for each step- $f: 0.06 \text{ mm/rev}$, $n: 1000/60 \text{ rad/s}$)



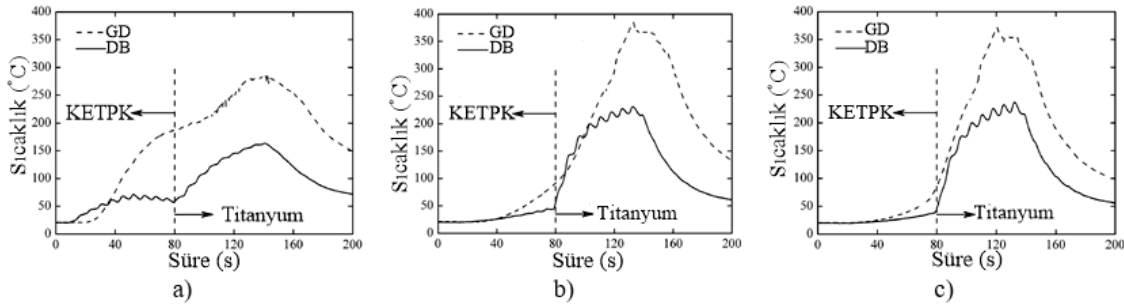
Şekil 16. KETPK/Ti-6Al-4V'nin delinmesinde KETPK plakada delaminasyon oluşumu ($S:4500$ dev/dak, $f: 457$ mm/dak): a) KETPK/Ti-6Al-4V'nin delinmesi- 1. Delik girişi, b) KETPK/Ti-6Al-4V'nin delinmesi-15. Delik girişi, c) KETPK/Ti-6Al-4V'nin delinmesi-1. Delik çıkışı ve d) KETPK/Ti-6Al-4V'nin delinmesi-15. Delik çıkışı [50] (Delamination at hole on CFRP in drilling of CFRP/Ti-6Al-4V ($S:4500$ rev/min, $f: 457$ mm/min): a) Drilling of CFRP/Ti-6Al-4V-1st hole entry, b) Drilling of CFRP/Ti-6Al-4V-15th hole entry, c) Drilling of CFRP/Ti-6Al-4V-1st hole exit and d) Drilling of CFRP/Ti-6Al-4V-15th hole exit)



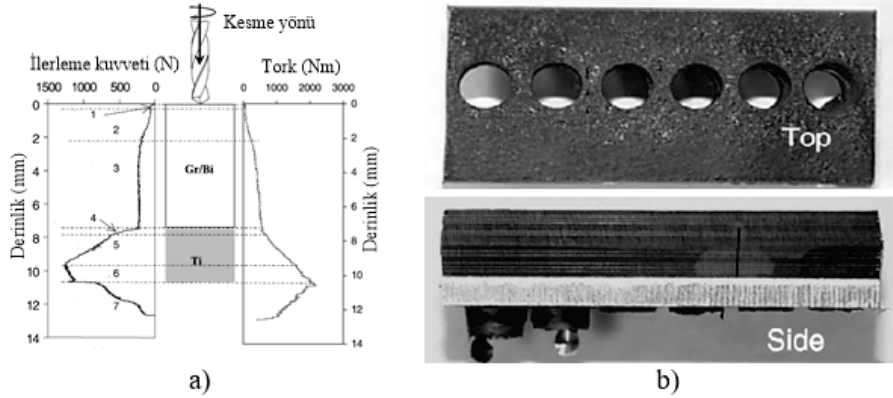
Şekil 17. KETPK/Ti'nin 12 m/dak sabit kesme hızı ile delinmesinde oluşan titanyum talaşları ve KETPK malzeme delik yüzey durumları, a, d) 0,03 mm/dev, b, e) 0,13 mm/dev ve c, f) 0,25 mm/dev [51] (Titanium chips and CFRP material hole surface conditions constant cutting speed of 12 m/min in drilling of CFRP/Ti stacks: a, d) 0.03 mm/rev, b, e) 0.13 mm/rev and c, f) 0.25 mm/rev)



Şekil 18. KETPK/Ti'nin delinmesi için deney düzeneği ve kesici takım yüzey durumu, a) Kızıl ötesi termal kamera ve KETPK/Ti istiflenmiş yapı için sıcaklık ölçüm noktaları ve b) Titanyum alaşımının kesici takım kenarına yapışması [52] (Experimental setup for drilling of CFRP/Ti stacks and cutting tools surface condition: a) Infrared thermal camera and temperature measurement points for CFRP/Ti stacks and b) Titanium alloy adhered to the cutting tool edge)



Şekil 19. Delme işlemi esnasında KETPK/Ti'nin farklı bölgelerinde oluşan sıcaklıklar, a) A noktası, b) B noktası ve c) C noktası [52] (Temperatures in different areas of CFRP/Ti stacks during drilling: a) A point, b) B point and c) C point)

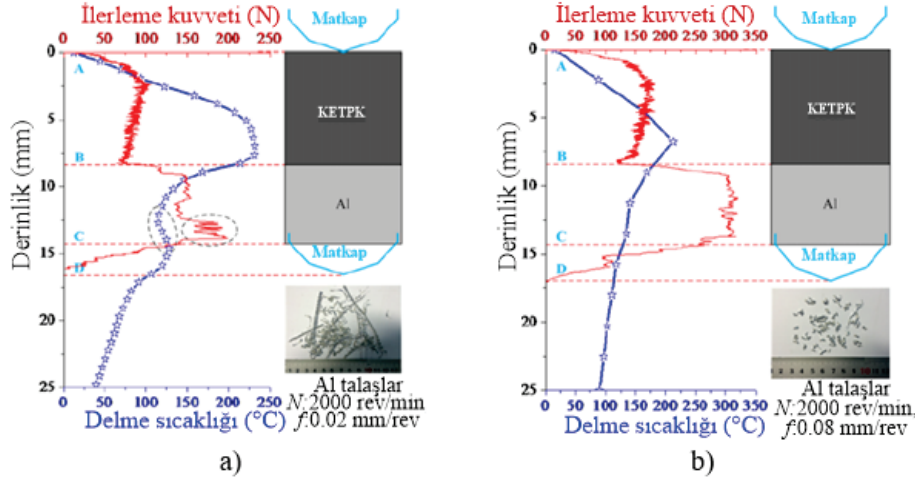


Şekil 20. Gr-Bi/Ti istiflenmiş plakaların delinmesi: a) Standart HSS matkaplar için derinliğe bağlı olarak tork ve ilerleme kuvvetindeki değişim ($N: 660$ dev/dak, $f:0,2$ mm/dev) ve b) HSS kobalt matkap ile delinmiş Gr-Bi/Ti plakaların üstten ve yandan görünüşü ($N: 660$ dev/dak, $f:0,13$ mm/dev)[53]

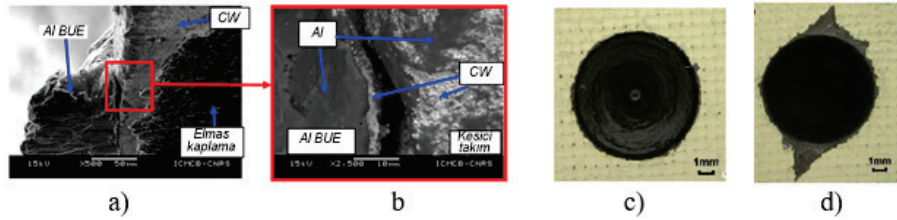
(Drilling of Gr-Bi/Ti stack: a) Relationship torque and thrust force depending on depth for standard HSS drills ($N:660$ rev/min, $f:0.2$ mm/rev) and b) Top and side view of Gr-Bi/Ti stack drilled by a HSS-Co drill ($N:660$ rev/min, $f:0.13$ mm/rev))

KETPK/Al'un tungsten karbür matkaplar (Şekil 23) ile delinmesi esnasında, kompozit ve alüminyum malzeme talaşları, ısıya bağlı BUE'nin etkisiyle delik yüzeyine yapışması sonucunda yüzey pürüzlülüğü, ilerlemenin artması ile ilerleme kuvveti ve tork değerleri artmaktadır (Şekil 24). Takım A'nın kesme performansı ise kesici takım geometrisinden dolayı Takım B'ye göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir [56]. Kesici takımların sahip olduğu üstün termo-mekanik özellikler, mükemmel iş parçası-kesici takım etkileşimi sağlayarak, takım aşınmasına karşı direnç göstermekte ve böylelikle ETPK/Ti plakaların delinmesinde, daha iyi delik yüzey kalitesinin elde edilmesine katkıda bulunmaktadır. Her bir plakanın delinmesinde farklı aşınma

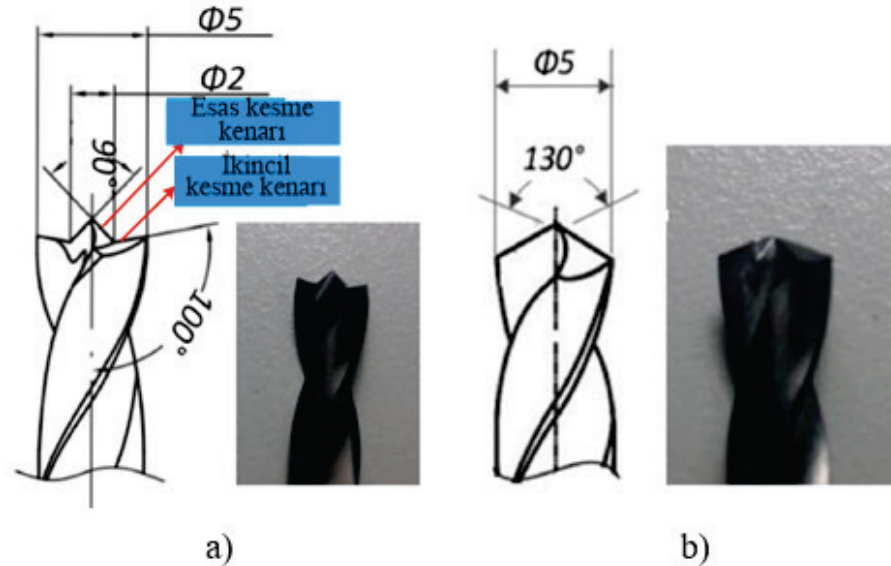
özelliklerinden dolayı, uygun kesici takım seçimi zordur. Örneğin, kompozit malzeme fazında, termal ve mekanik yüklerden dolayı kesme esnasında oluşan abrasif haldeki elyaf parçacıklar, kesici takımda yan yüzey aşınmasına ve kesici kenarın yuvarlanmasına sebep olmaktadır [57]. Titanyum fazın delinmesi esnasında ise kesme anında ortaya çıkan yüksek ısı, takım-talaş ara yüzünde adhezyon aşınma mekanizması meydana gelmektedir. Bu aşınma mekanizması, kesici kenarda talaş yapışmasına (BUE) ve kesici kenarın kırılması sebep olmaktadır. Aşınma oluşumunun azaltılabilmesi için kesici takım, yüksek sertlik ve tokluk, aşınma direnci, iyi kimyasal kararlılığın yanı sıra yüksek termal iletkenlik gibi özelliklere sahip olması



Şekil 21. KETPK/Al plakaların delinmesinde oluşan ilerleme kuvveti ve delme sıcaklığı: a) $N: 2000 \text{ dev/dak}$, $f: 0,02 \text{ mm/dev}$ ve b) $N: 2000 \text{ dev/dak}$, $f: 0,08 \text{ mm/dev}$ [54] (Thrust force and drilling temperature curves with the evolution of drilling depth during drilling of the CFRP/Al stacks: a) $N: 2000 \text{ rev/min}$, $f: 0.02 \text{ mm/rev}$ and b) $N: 2000 \text{ rev/min}$, $f: 0.08 \text{ mm/rev}$).



Şekil 22. KETPK/Al'nin delinmesinde kesici takım yüzey durumu: a) Kesici kenarda BUE oluşumu b) KETPK'nin delinmesi esnasında delik girişinde oluşan hasar ve c) Alüminyum talaşlarının tahliyesinden sonra delik girişinde oluşan hasar [55] (Cutting tool edge condition drilling of CFRP/Al stack: a) Built up edge (BUE) on the cutting edge and b) CFRP damages at the hole entry before and c) after aluminium chip evacuation)



Şekil 23. Farklı matkap geometrileri: a) Çift kesme kenarına sahip matkap-Takım A b) Standart matkap-Takım B [56] (Different drill geometries: a) Twist drill-Tool A and b) Conventional drill-Tool B)

gerekmektedir. Sertlik ve aşınma direnci gibi özelliklerden dolayı, istiflenmiş malzemelerin delinmesinde yaygın olarak, karbür ve düşük kobalt içerikli kesici takımlar kullanılmaktadır. Bunların yanında, PCBN (Polikristalin kübik bor nitrid), PCD (Polikristalin elmas), WC (Tungsten karbür), sermet ve HSS gibi kesici takımlar da tercih

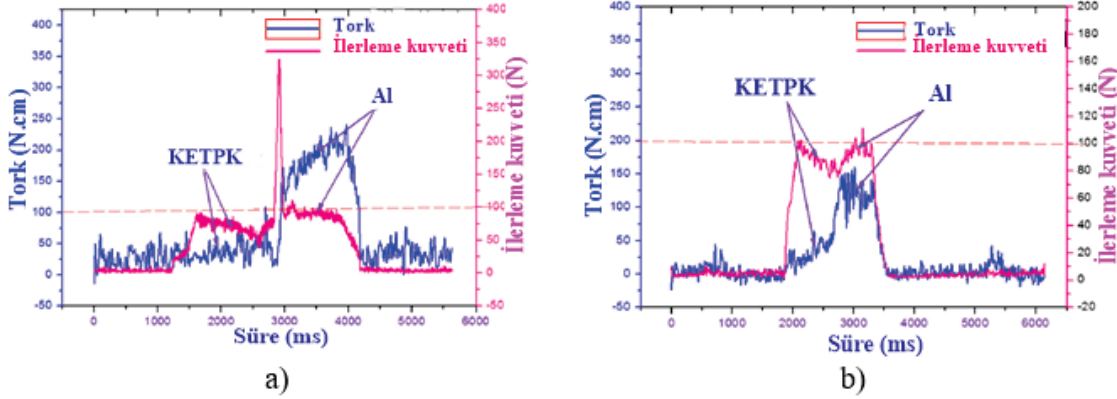
edilmektedir (Şekil 25). Birçok araştırmacı [7], kaplamalı takımların ETPK/Takım ve Ti/Takım etkileşimi arasında mükemmel tribolojik özellikler sergilediğini belirtmiştir. Fujiwara vd. [59] KETPK/Ti6Al4V istiflenmiş plakanın delinmesinde, TiAlCr/TiSi kaplama yönteminin TiAlN ve TiSiN kaplamalı kesici takımlara göre yüksek aşınma

direncinin yanı sıra takım-talaş ara yüzeyinde adhezyonun azaltılabilmesi bakımından daha iyi performans sergilediğini belirtmişlerdir, TiN ve Al_2O_3 kaplamalar, düşük termal iletkenliklerinden dolayı ETPK malzemenin delinmesi esnasında termal bariyer oluşturmaktadır. ETPK'in delinmesinde, yüksek aşınma direnci ve termal iletkenliğe, titanyum fazının delinmesinde ise adhezyon aşınma mekanizmasını azaltabilmesi bakımından PCD kesici takımlar (Şekil 25) tercih edilmektedir [60, 61]. İstiflenmiş ETPK/Metal malzemelerin yüksek hassasiyet ile delinmesinde, kesici takım geometrisi de önem taşımaktadır. Matkap geometrisi, ETPK malzemede delik yüzey hasarı ve kesici takım aşınması üzerinde etkili olmaktadır. Wika vd. [62] iki ağızlı ve büyük helis açısına sahip matkaplar ile KETPK/Ti istiflenmiş malzemelerin delinmesinde, talaş tahliyesi için gerekli hacim ve ısı dağılımından dolayı diğer takımlara göre daha düşük kesme kuvvetlerinin yanı sıra düşük kesme sıcaklığı elde etmişlerdir. Takım aşınmasının minimize edilmesi ve talaşın kolay tahliyesi bakımından büyük uç açılı matkaplar [63], düşük kesme kuvvetlerinin

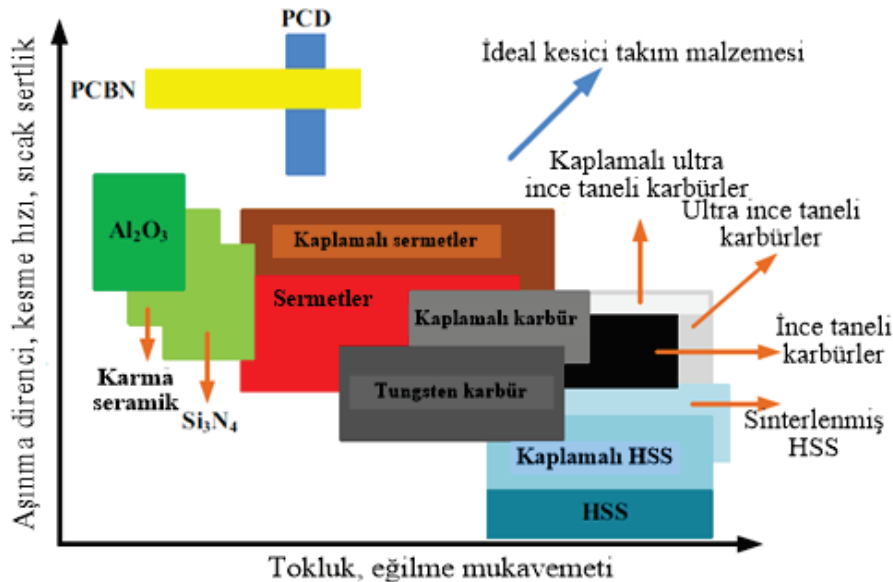
yanı sıra delaminasyonun azaltılabilmesi bakımından, matkap ucu kesme kenar genişliği (chisel edge) daha küçük olan matkapların kullanılması tavsiye edilmektedir [64]. İstiflenmiş plakaların delinmesinde kesici takımdan istenen başlıca özellikler, yüksek aşınma direnci ve sertliğin yanı sıra yüksek termal iletkenliktir. Bu özellikler sonucunda belirlenen kesici takım için daha sonra optimum geometri tespit edilerek takım aşınması, delaminasyon, yüzey pürüzlülüğü, ilerleme kuvveti ve tork gibi kriterlerin kontrol altına alınması gerekmektedir.

2.2.2. Metal/ETPK/Metal İstiflenmiş Plakaların Delinmesi (Drilling of Metal/FRP/Metal Stacks)

Metal/ETPK/Metal istifleme yöntemi, genellikle birbirleri arasında montaj yapılan parçaların tek operasyon ile delinmesi açısından önem taşımaktadır. Böylelikle, eş merkezlilik ve dairesellik gibi ölçüsel toleransların daha hassas bir şekilde elde edilmesinin yanı sıra imalatta zaman ve maliyet açısından önemli avantaj elde edilmektedir.

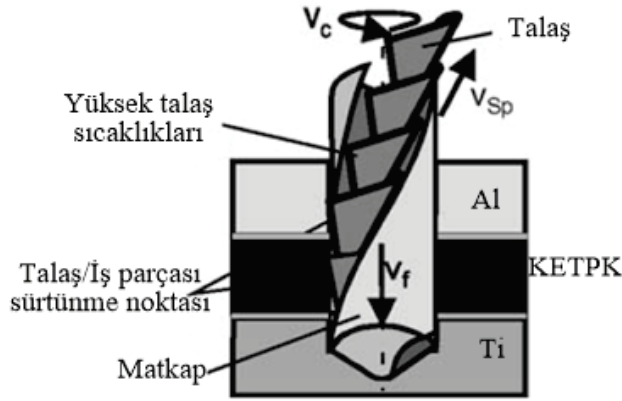


Şekil 24. KETPK/Al'un delinmesinde oluşan tork ve ilerleme kuvveti ilişkisi ($N:3500$ dev/dak, $f: 0,05$ mm/dev), a) Takım A ve b) Takım B [56]
(Relationship torque-thrust force drilling of CFRP/Al ($N:3500$ rev/min, $f:0.05$ mm/rev): a) Tool A and b) Tool B)



Şekil 25. ETPK/Ti plakaların delinmesinde farklı kesici takım malzemelerinin kesme performansı [7, 58]
(Cutting performance of different cutting tool materials in drilling of FRP/Ti stack).

Endüstriyel uygulamalarda genel olarak, Al/ETPK/Ti ve Ti/ETPK/Ti istifleme yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak, farklı malzeme özelliklerinden dolayı bu şekilde istiflenmiş malzemelerin delinmesinde, talaş tahliyesinde zorlanma, adhezyon ve abrasif aşınma mekanizmaları meydana gelmektedir. Bu mekanizmalar ise delik yüzey kalitesinin yanı sıra kesici takım aşınması üzerinde önemli etkiye sahip olmaktadır. Al/ETPK/Ti şeklinde istiflenmiş bir yapıda, titanyumun delinmesi esnasında karbür matkapların, termal ve mekanik yüklere maruz kalarak sürtünmenin etkisiyle matkap kanalı boyunca hareket eden keskin geometriye sahip talaşlar, ETPK malzemenin delik yüzeyinde yapışmaya (BUE), erozyona ve delaminasyona sebep olmaktadır (Şekil 26).

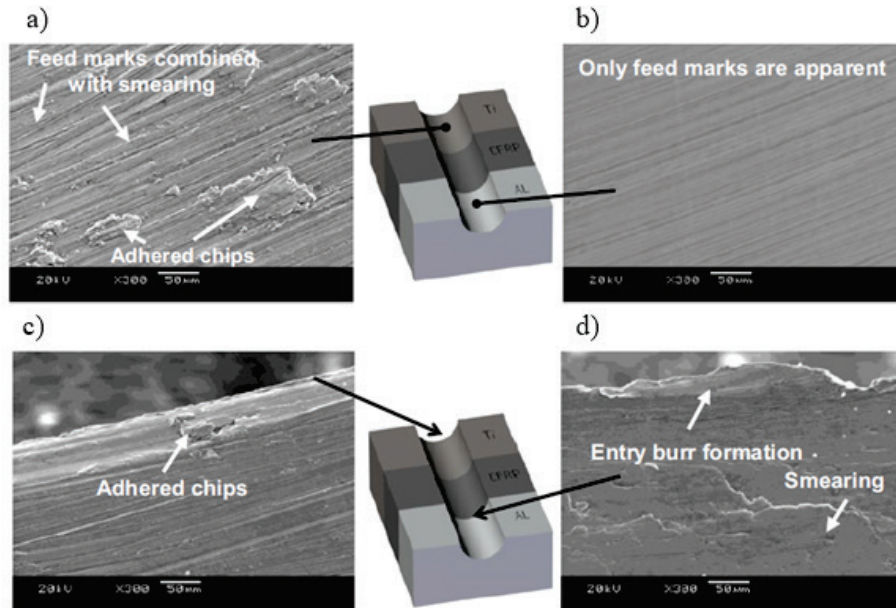


Şekil 26. Al/KETPK/Ti istiflenmiş yapının delinmesi [8](Drilling of Al/CFRP/Ti stack structure)

Buna göre, kademeli matkapların yanı sıra minimum miktarda yağlama (MQL-Minimum quantity lubrication)

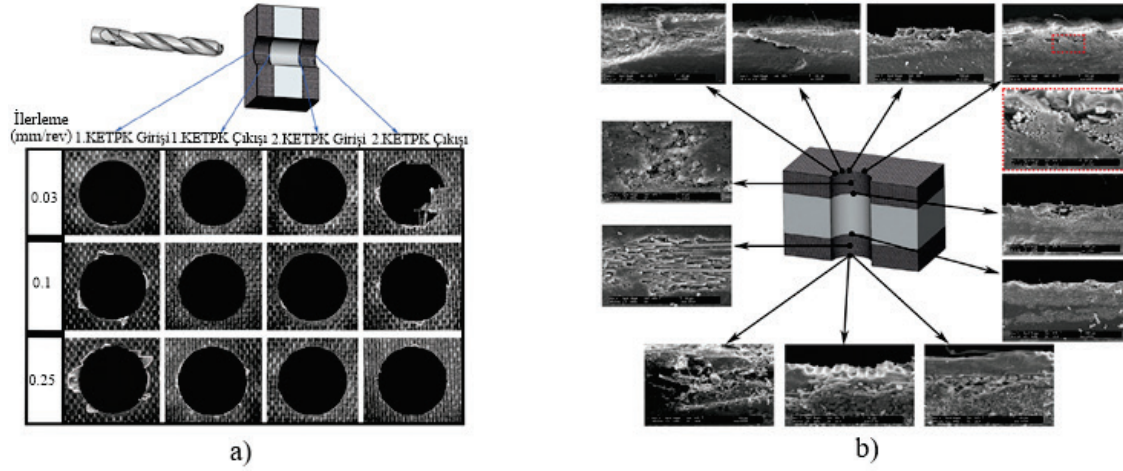
yöntemi kullanılarak bu olumsuz faktörler minimize edilebilmektedir [8]. Ti/KETPK/Al'nin tungsten karbür matkaplar ile delinmesinde, titanyum ve alüminyum plakadan dolayı delaminasyon oluşumu önemli derecede azaldığı, ancak titanyumun delik çıkışında oluşan çapak, KETPK malzemenin delik yüzeyinde mikro düzeyde hasara sebep olmaktadır. Kesme bölgesine yüksek basınçta (~70 bar) uygulanan püskürtme yöntemi, bu bölgede oluşan ısının düşürülmesinin yanı sıra daha iyi yüzey kalitesinin elde edilmesine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, alüminyum plakasının delik girişinde çapak (Şekil 27d) ve titanyum plakasının delik yüzeyinde ise adhezyondan dolayı talaş yapışması meydana gelmektedir (Şekil 27a-c) [40].

KETPK/Al/KETPK'nin kaplamalı karbür matkaplar ile delinmesinde kaplamasız matkaplara göre ilerleme kuvvetleri daha fazla oluşmaktadır. Bu durum, kaplamanın etkisiyle kesici kenar kalınlığı artmakta ve kesici kenar keskinliğinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Küçük matkap ucu kesme kenar uzunluğunun (chisel edge) yanı sıra küçük helis ve uç açısına sahip matkaplar kullanılarak ilerleme kuvvetleri minimize edilebilmektedir. 1. KETPK malzemenin delik girişinde yüksek ilerleme, 2. KETPK malzemenin delik çıkışında ise düşük ilerleme değerlerinden dolayı delaminasyon oluşumunda artış meydana gelmektedir (Şekil 28a). Delik yüzey kalitesi bakımından 2. KETPK plakada delme esnasında oluşan delaminasyon, yüzey pürüzlülüğü ve ölçüsel hatalar 1. KETPK malzemeye göre daha fazla oluşmaktadır (Şekil 28b) [65].Ti/Gr (polimer matrisli grafit kompozit)/Ti'nin karbür matkaplar ile delinmesinde, kompozit malzemenin delik girişinde ve çıkışında delaminasyon meydana gelmektedir. Titanyumun düşük termal iletkenliğe sahip olması, kesme bölgesinde oluşan ısının hızlı bir şekilde dağılmasına engel olmaktadır.



Şekil 27. Kaplamasız karbür matkap ile delme esnasında oluşan yüzey durumu (Kesme hızı:20/40m/dak, ilerleme: 0.05 mm/dev): a) Titanyum delik yüzeyi b)Alüminyum delik yüzeyi c) Titanyum delik girişinde talaş yapışması ve d)Alüminyum delik girişinde çapak oluşumu [40]

(Surface condition during drilling with uncoated carbide drill (Cutting speed:20/40 m/min, feed rate : 0.05 mm/rev): a) Titanium hole surface, b) Aluminium hole surface c) Chip adhering in hole entry of titanium material and d) Burr formation in hole entry of aluminium material)



Şekil 28. KETPK/Al/KETPK istiflenmiş yapının delinmesi, a) KETPK malzemelerin AlTiN kaplamalı karbür matkaplar ile 35. delme işlemi sonucunda delik girişi ve çıkışında oluşan delaminasyon ve b) KETPK/Al/KETPK'nin delinmesinde oluşan yüzey durumları [65]

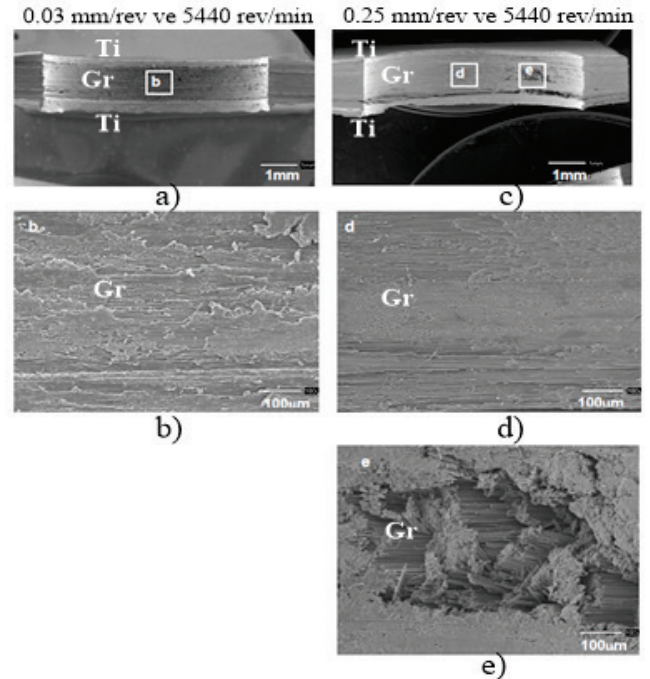
(Drilling of CFRP/Al/CFRP stack structure: a) Delamination at hole entry and exit of CFRP material while drilling 35th hole using AlTiN coated carbide drills and b) Surface conditions in drilling of CFRP/Al/CFRP stack)

Özellikle, yüksek ilerleme ve kesme hızı kombinasyonlarında delme esnasında kompozit malzemenin delik yüzeyindeki ısıl etkilerden dolayı matris fazı bozulmaktadır (Şekil 29a-d). İlerlemenin artması ile kesme kuvvetleri artmakta ve buna bağlı olarak kompozit malzemenin delik yüzeyinde kesme esnasında elyaflar da kopma (Şekil 29e) meydana gelmektedir. Bu durum delik yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir [66]. CETPK/Zırh çeliği/CETPK'in tungsten karbür matkaplarla delinmesinde, zırh çeliğinin delinmesi esnasında ilerleme kuvvetine bağlı oluşan ısı ve basınç etkisi ile CETPK malzemenin yüzeyinde elyaf tabakasında kopma (Şekil 30a) ve erime, matris fazında ise erime (Şekil 30b) meydana gelmektedir. Bu durumda, düşük ilerleme ve daha küçük matkap çaplarının kullanılması tavsiye edilmektedir [67].

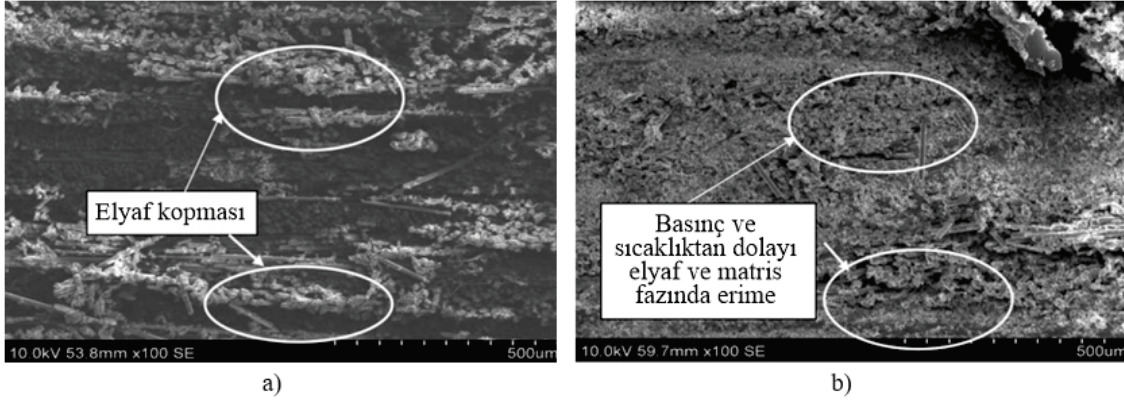
Kuo vd. [68] yaptıkları çalışmada, Ti/KETPK/Al'nin elmas kaplamalı tungsten karbür matkaplar ile delinmesi esnasında, KETPK'in delik yüzey pürüzlülüğü ve matris fazında bozulma, özellikle 45° ve 135°elyaf oryantasyonlarında (Şekil 31b)ilerlemeye bağlı olarak artmaktadır. Bu durum, artan ilerleme ile kesici takımın kaplama özelliğini kaybetmesine bağlı oluşan takım aşınmasından kaynaklanmaktadır. Düşük kesme hızları (30/120/120m/dak) ve orta ilerleme değerlerinde (0,8 mm/dev), 70 adet delme işleminden sonra kesici kenarda 1 mm kadar aşınma olduğu, ancak kesme kenarında kırılma veya kopma olmadığı belirlenmiştir. Kesme kenarında oluşan aşınma, titanyum ve alüminyum malzemelerinin delik yüzeyinde mikro ölçekte adhezyonun etkisi ile talaş yapışmasına ve ilerleme izlerinin oluşmasına (Şekil 31a-c) sebep olmaktadır.

Metal/ETPK/Metal istiflenmiş yapılarda her bir malzeme, farklı özelliklere sahip olduğu için delme işlemi esnasında bu malzemelerin her biri için uygun kesme parametrelerinin

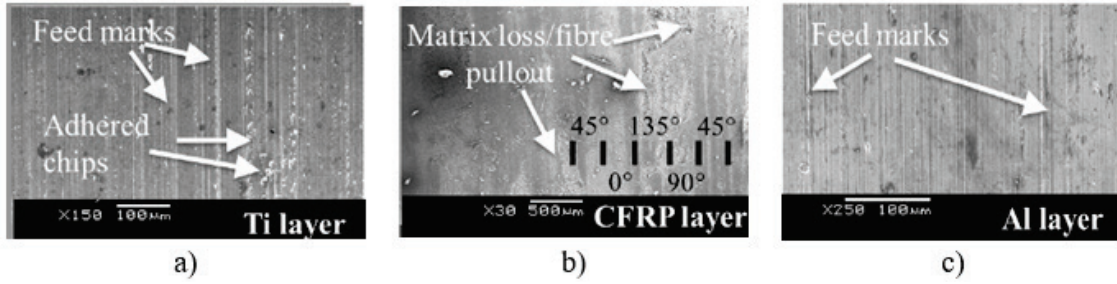
belirlenmesi gerekmektedir [69]. Böylelikle, termal ve mekanik yüklere bağlı olarak adhezyon ve abrasiv aşınma mekanizmalarından dolayı oluşabilen yüzey pürüzlülüğü [70, 71] takım aşınması [72] ve delaminasyon kontrol altına alınabilmektedir.



Şekil 29. Ti/Gr/Ti'nin delinmesinde ilerlemenin etkisi: a, b) Gr kompozitin yüzeyinde Matris fazında bozulma ($N: 5440$ dev/dak, $f: 0,03$ mm/dev) c, d) Grkompozitin yüzeyinde matris yapısının yapışması ($N: 5440$ dev/dak, $f: 0,25$ mm/dev) ve e) Elyaf kopması [66] (Effect of feed rate in drilling of Ti/Gr/Ti stack: a, b) Deterioration in matrix phase on surface of Gr composite ($N:5440$ rev/min, $f: 0.03$ rev/min), c, d) Adhering of matrix phase on surface of Gr composite ($N:5440$ rev/min, $f: 0.25$ rev/min) and e) Fiber breakage)



Şekil 30. CETPK malzeme kesme yüzeyinin SEM görüntüsü, a) Üst katmandaki CETPK plakanın SEM görüntüsü ve b) Alt katmandaki CETPK plakanın SEM görüntüsü [67]
(SEM image of GFRP material cutting surface: a) SEM image of GFRP plate on top layer and b) SEM image of GFRP plate on bottom layer)



Şekil 31. Ti/KETPK/Al'nin delinmesinde oluşan yüzey durumları: a) Titanyumun delinmesinde oluşan ilerleme izleri ve talaşın yüzeye yapışması b) Matris fazında bozulma ve elyaf kopması ve c) Alüminyumun delinmesinde oluşan ilerleme izleri [68] (Surface conditions drilling of Ti/CFRP/Al stack: a) Feed marks in drilling of titanium and chip adhering to surface, b) Deterioration in matrix phase and fiber breakage and c) Feed marks in drilling of aluminium)

3. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemeler, yüksek sertlik, mukavemet ve sönümlenmenin yanı sıra düşük termal genişleme gibi mühendislik özelliklerine sahip oldukları için uzay, havacılık ve otomotiv sanayisinde yaygın kullanım alanına sahiptir. Bu malzemeler, istenilen geometride üretilmelerine rağmen, genellikle birbirleri arasında civata, pim veya perçinleme gibi yöntemler ile montaj yapılabilmesi için delme işlemine tabi tutulmaktadır. Delme işlemi esnasında bu malzemelerde, delik giriş ve çıkışında delaminasyon, matris yapıda hasar, elyaf kopması ve yüzey pürüzlülüğü gibi olumsuz durumların oluşması, sahip oldukları mühendislik özelliklerin azalmasına sebep olmaktadır.

Literatürde yapılan çalışmalarda, bu olumsuz durumların minimize edilebilmesi için genel olarak yüksek kesme hızları ile birlikte düşük ilerleme değerlerinin kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. Ancak, kesme parametrelerinin yanı sıra kesici takım geometrisi, kaplama yöntemi ve malzeme türü de kesme performansı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Ön delik delme işlemi yapılarak özellikle de metaller ile istiflenmiş ETPK tabakalarda delaminasyon oluşumunun azaltılabileceği, bununla birlikte kesme anında oluşabilecek termal etkilerin azaltılması bakımından aşındırıcı su jeti kesme yönteminin metaller ile istiflenmiş ETPK yapılar için

avantaj sağlayabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, farklı elyaf açıları ile kesme yüzeyinde oluşan yüzey hasarı arasındaki ilişki, istiflenmiş yapılarda delaminasyon, çapak oluşumu, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün yanı sıra farklı bölgelerde oluşan kesme sıcaklıklarının tahmini için farklı istatistiksel modelleme çalışmalarının yapılması da elde edilen sonuçların etkinliği açısından son derece önem taşımaktadır. Bu çalışmada, ETPK malzemelerin farklı metaller ile istiflenerek delinmesi ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar araştırılarak elde edilen bulgular bir arada sunulmuştur. Buna göre; İlerlemenin artması ile kesici takımda ilerleme kuvvetleri, tork ve ETPK malzemede delik girişinde ve çıkışında delaminasyonun arttığı, Kesme hızının artması ile ETPK malzemede delaminasyon oluşumunun azaldığı, ancak istiflenmiş yapılarda ise her bir malzeme için optimum kesme hızı değerlerinin kullanılması gerektiği, Endüstriyel uygulamalarda, özellikle uçak sanayisinde gövde ve kanat bağlantılarında ETPK/Ti, ETPK/Al, Ti/ETPK/Ti ve ETPK/Al/ETPK istiflenmiş yapıların kullanıldığı, İstiflenmiş yapıların delinmesinde, özellikle yüksek ilerleme değerlerinde termal etkiden dolayı ETPK malzemenin delik yüzeyinde matris fazında bozulmanın olduğu, Ti veya Al talaşlarının adhezyonun etkisiyle işlenmiş yüzeye ve kesici takımın kesme kenarına yapıştığı (BUE), mekanik yüklerin etkisiyle metal ve ETPK malzemelerden kopan mikro düzeydeki partiküllerin kesici takımda abrasif aşınmaya sebep olduğu, Metal malzemenin

delinmesi esnasında delik girişinde veya çıkışında oluşan çapak, ETPK malzemede delaminasyona sebep olduğu, Delaminasyonun minimize edilebilmesi için kademeli veya küçük uç açılı matkapların yanı sıra PCBN veya PCD takımların kullanılabilceği, MQL ve sprey püskürtme ile soğutma yönteminin, metal ve ETPK malzemenin delik yüzey kalitesini arttırdığı belirlenmiştir.

4. SİMGELER (SYMBOLS)

D_{max}	: Maksimum hasar çapı [mm]
D_{drill}	: Matkap çapı [mm]
V_c	: Kesme hızı [m/dak]
V_{sp}	: Talaş hızı [m/dak]
V_f	: İlerleme hızı [mm/dev]

4.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

BUE	: Built up edge
CETPK	: Cam elyaf takviyeli polimer kompozit
CFRP	: Carbon fiber reinforced polymer
DB	: Delik büyütme
DETPK	: Doğal elyaf takviyeli polimer kompozit
ETPK	: Elyaf takviyeli polimer kompozit
FRPs	: Fiber reinforced polymers
GD	: Geleneksel delme
Gr-Bi	: Graphite-Bismaleimide
HSS	: High speed steel
KETPK	: Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit
MQL	: Minimum quantity lubrication
PCBN	: Polycrystalline cubic boron nitride
PCD	: Polycrystalline diamond
TiN	: Titanyum nitrür
UD	: Ultrasonik delme
WC	: Tungsten carbide

KAYNAKLAR(REFERENCES)

1. Bayraktar Ş., Turgut Y., Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Talaşlı Şekillendirilebilirliği, 1. Uluslararası Plastik & Kauçuk Teknolojileri Sempozyumu ve Ürün Sergisi, Ankara-Türkiye, 9-18, 29-31 Mayıs, 2013.
2. Bayraktar Ş., Turgut Y., Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Delinmesi Üzerine Bir Araştırma, 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Ankara-Türkiye, 153-158, 4-5 Ekim, 2012.
3. Krishnamoorthy A., Boopathy S.R., Palanikumar K., Davim J.P., Application of grey fuzzy logic for the optimization of drilling parameters for CFRP composites with multiple performance characteristics, Measurement, 45 (5), 1286-1296, 2012.
4. Khashaba U., Delamination in drilling GFR-thermoset composites, Compos. Struct, 63 (3-4), 313-327, 2004.
5. Liu D.F., Tang Y.J., Cong W.L., A review of mechanical drilling for composite laminates, Compos. Struct, 94 (4), 1265-1279, 2012.
6. Qi Z., Zhang K., Li Y., Liu S., Cheng H., Critical thrust force predicting modeling for delamination-free drilling of metal-FRP stacks, Compos. Struct, 107, 604-609, 2014.
7. Xu J., Mkaddem A., El Mansori M., Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: A state-of-the-art review, Compos. Struct, 135 (1), 316-338, 2016.
8. Brinksmeier E., Janssen R., Drilling of multi-layer composite materials consisting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), titanium and aluminum alloys, CIRP Ann.-Manuf. Technol, 51 (1), 87-90, 2002.
9. Xu J., El Mansori M., Cutting modeling using cohesive zone concept of titanium/CFRP composite stacks, Int. J. Precis. Eng. Manuf, 16 (10), 2091-2100, 2015.
10. Denkena B., Boehnke D., Dege J.H., Helical milling of CFRP-titanium layer compounds, CIRP J. Manuf. Sci. Technol, 1 (2), 64-69, 2008.
11. Xu J., El Mansori M., Experimental study on drilling mechanisms and strategies of hybrid CFRP/Ti stacks, Compos. Struct, 157, 461-482, 2016.
12. Wern C.W., Ramulu W., Shukla A., Investigation of stresses in the orthogonal cutting of fiber-reinforced plastics, Exp. Mech, 36 (30), 33-41, 1996.
13. Zitoune R., Krishnaraj V., Collombet F., Le Roux S., Experimental and numerical analysis on drilling of carbon fibre reinforced plastic and aluminium stacks, Compos. Struct, 146, 148-158, 2016.
14. Soutis C., Fibre reinforced composites in aircraft construction, Prog. Aerosp. Sci, 41 (2), 143-151, 2005.
15. Gay D., Hoa S.V., Tsai S.W., Composite materials: design and applications, CRC Press, New York, U.S.A., 2013.
16. Lee S.C., Jeong S.T., Park J.N., Kim S.J., Cho G.J., Study on drilling characteristics and mechanical properties of CFRP composites, Acta Mech. Solida Sin, 21 (4), 364-368, 2008.
17. Ho-Cheng H., Dharan C.K.H., Delamination during drilling in composite laminates, J. Eng. for Ind, 112 (3), 236-239, 1990.
18. Durão L.M.P., Gonçalves D.J.S., Tavares J.M.R.S., Albuquerque V.H.C., Marques A.T., Drilling process of composite laminates - a tool based analysis, 14th European conference on composite materials (ECCM14), Budapest-Hungary, 1-10, 7-10 June, 2010.
19. Persson E., Eriksson I., Zackrisson L., Effect of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates, Compos. Part A: Appl. Sci&Manuf, 28 (2), 141-151, 1997.
20. Xu J., An Q., Chen M., A comparative evaluation of polycrystalline diamond drills in drilling high-strength T800S/250F CFRP, Compos. Struct, 117, 71-82, 2014.
21. Karnik S.R., Gaitonde V.N., Rubio J.C., Correia A.E., Abrão A.M., Davim J.P., Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model, Mater. Des, 29 (9), 1768-1776, 2008.
22. Kim D., Influence of consolidation process on the drilling performance and machinability of PIXA-M and PEEK thermoplastic composites, J. Thermoplast. Compos. Mater, 18 (3), 195-217, 2005.

23. Hocheng H., Tsao C.C., Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials, *Int. J. Mach. Tools Manuf*, 46 (12-13), 1403-1416, 2006.
24. Tsao C.C., Investigation into the effects of drilling parameters on delamination by various step-core drills, *J. Mater. Process. Technol*, 206 (1-3), 405-411, 2008.
25. Singh I., Bhatnagar N., Viswanath P., Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastics: experimental and finite element study, *Mater. Des*, 29 (2), 546-553, 2008.
26. Tsao C.C., Hocheng H., Effect of eccentricity of twist drill and candle drill on delamination in drilling of composite materials, *Int. J. Mach. Tools Manuf*, 45 (2), 125-130, 2005.
27. Zhang L.B., Wang L.J., Liu X.Y., A mechanical model for predicting critical thrust forces in drilling composite laminates, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Manuf*, 215 (2), 135-146, 2001.
28. Khashaba U.A., Seif M.A., Elhamid M.A., Drilling analysis of chopped composites, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf*, 38 (1), 61-70, 2007.
29. Gaitonde V.N., Karnik S.R., Campos R.J., Esteves C.A., Abrao A.M., Paulo D.J., Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites, *J. Mater. Process. Technol*, 203 (1-3), 431-438, 2008.
30. Durão L.M.P., Gonçalves D.J., Tavares J. M.R., Albuquerque V.H.C., Vieira A.A., Marques A.T., Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates, *Compos Struct*, 92 (7), 1545-1550, 2010.
31. Shyha I.S., Aspinwall D.K., Soo S.L., Bradley S., Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP, *Int. J. Mach. Tools Manuf*, 49 (12), 1008-1014, 2009.
32. Lazar M.B., Xirouchakis P., Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites, *Int. J. Mach. Tools Manuf*, 51 (12), 937-946, 2011.
33. Krishnaraj V., Prabukarthi A., Ramanathan A., Elanghovan N., Kumar M.S., Zitoune R., Davim J.P., Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates, *Compos. Part B: Eng*, 43 (4), 1791-1799, 2012.
34. Ismail S.O., Dhakal H. N., Popov I., Beaugrand J., Comprehensive study on machinability of sustainable and conventional fibre reinforced polymer composites, *Eng. Sci. Technol. Int. J*, 19 (4), 2043-2052, 2016.
35. Makhadmeh F., Jennings L.T., Roy A., Silberschmidt V.V., Cutting forces in ultrasonically assisted drilling of carbon fibre-reinforced plastics, In *Journal of Physics: Conference Series*, 382 (1), 1-6, 2012.
36. Biermann D., Iovkov I., Investigations on the thermal workpiece distortion in MQL deep hole drilling of an aluminium cast alloy, *CIRP Ann. Manuf Technol*, 64 (1), 85-88, 2015.
37. Ilyuschenko A.P., Feldshtein E.E., Lisovskaya Y.O., Markova L.V., Andreyev M.A., Lewandowski A., On the properties of PVD coating based on nanodiamond and molybdenum disulfide nanolayers and its efficiency when drilling of aluminium alloy, *Surf. Coat. Technol*, 270, 190-196, 2015.
38. Gökkaya H., Nalbant M., Investigating the Effects of Cutting Speeds Over the Built-up Layer and Built-up Edge Formation with Sem, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 22 (3), 481-488, 2007.
39. Sekmen M., Günay M., Şeker U., Alüminyum Aşırıların İşlenmesinde Kesme Hızı ve Talaş Açısının Yüzey Pürüzlülüğü, Yığıntı Talaş ve Yığıntı Katmanı Oluşumu Üzerine Etkisi, *J Polytech*, 18 (3), 141-148, 2015.
40. Shyha I.S., Soo S.L., Aspinwall D.K., Bradley S., Perry R., Harden P., Dawson S., Hole quality assessment following drilling of metallic-composite stacks, *Int. J. Mach. Tools Manuf*, 51 (7), 569-578, 2011.
41. Sanchez J.M., Rubio E., Alvarez M., Sebastien M.A., Marcos M., Microstructural characterisation of material adhered over cutting tool in the dry machining of aerospace aluminium alloys, *J. Mater. Process. Technol*, 164-165, 911-918, 2005.
42. Zitoune R., Krishnaraj V., Almabouacif B., Collombet F., Sima M., Jolin A., Influence of machining parameters and new nano-coated tool on drilling performance of CFRP/aluminium sandwich, *Compos. Part B: Eng*, 43 (3), 1480-1488, 2012.
43. Zitoune R., Krishnaraj V., Collombet F., Study of drilling of composite material and aluminium stack, *Compos. Struct*, 92 (5), 1246-1255, 2010.
44. Pecat O., Brinksmeier E., Tool wear analyses in low frequency vibration assisted drilling of CFRP/Ti6Al4V stack material, *Procedia CIRP*, 14, 142-147, 2014.
45. Abdelhafeez A.M., Soo S.L., Aspinwall D.K., Dowson A., Arnold D., Burr formation and hole quality when drilling titanium and aluminium alloys, *Procedia CIRP*, 37, 230-235, 2015.
46. Kim D., Ramulu M., Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks, *Compos. Struct*, 63 (1), 101-114, 2004.
47. Pecat O., Brinksmeier E., Low damage drilling of CFRP/titanium compound materials for fastening, *Procedia CIRP*, 13, 1-7, 2014.
48. Park K.H., Beal A., Kwon P., Lantrip J., Tool wear in drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools, *Wear*, 271 (11), 2826-2835, 2011.
49. Cheng H., Zhang K., Wang N., Luo B., Meng Q., A novel six-state cutting force model for drilling-countersinking machining process of CFRP-Al stacks, *Int. J. of Adv. Manuf. Technol*, 89 (5-8), 2063-2076, 2017.
50. Isbilir O., Ghassemieh E., Comparative study of tool life and hole quality in drilling of CFRP/titanium stack using coated carbide drill, *Mach. Sci. Technol*, 17 (3), 380-409, 2013.
51. Nan C., Wu D., Gao Y., Ma X., Chen K., Influence of metal chips on drilling quality of carbon fiber reinforced plastic and titanium stacks, *5th Annu. IEEE Int. Conf.*

- Cyber Technol. Autom. Control Intell. Syst, Shengyang-China, 204-1209, 8-12 June, 2015.
52. Wang B., Gao H., Cao B., Zhuang Y., Zhao Z. Mechanism of damage generation during drilling of carbon/epoxy composites and titanium alloy stacks, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Manuf, 228 (7), 698-706, 2014.
 53. Ramulu M., Branson T., Kim D., A study on the drilling of composite and titanium stacks, Compos. Struct, 54 (1), 67-77, 2001.
 54. Wang C.Y., Chen Y.H., An Q.L., Cai X.J., Ming W.W., Chen M., Drilling temperature and hole quality in drilling of CFRP/aluminum stacks using diamond coated drill, Int. J. Prec. Eng. Manuf, 16 (8), 1689-1697, 2015.
 55. Montoya M., Calamaz M., Gehin D., Girot F., Evaluation of the performance of coated and uncoated carbide tools in drilling thick CFRP/aluminium alloy stacks, Int. J. Adv. Manuf. Technol, 68 (9-12), 2111-2120, 2013.
 56. Zhang L., Liu Z., Tian W., Liao W., Experimental studies on the performance of different structure tools in drilling CFRP/Al alloy stacks, Int. J. Adv. Manuf. Technol, 81 (1-4), 241-251, 2015.
 57. Kim K.S., Lee D.G., Kwak Y.K., Namgung S., Machinability of carbon fiber-epoxy composite materials in turning, J. Mater. Process. Technol, 32 (3), 553-570, 1992.
 58. Lantrip J., New tools needed, Cutting Tool Engineering, 60, 72-84, 2008.
 59. Fujiwara J., Nagaura R., Tashiro T., Drilling of CFRP/Ti6Al4V stack board, Int. J. Autom. Technol, 7 (3), 426-432, 2013.
 60. Ferreira J.R., Coppini N.L., Miranda G.W.A., Machining optimisation in carbon fibre reinforced composite materials, J. Mater. Process. Technol, 92-93, 135-140, 1999.
 61. Uhlmann E., Lachmund U., Brücher M., Wear behavior of HFCVD-diamond coated carbide and ceramic tools, Surf. Coat. Technol, 131 (1-3), 395-399, 2000.
 62. Wika K.K., Sharman A.R.C., Goulbourne D., Ridgway K., Impact of number of flutes and helix angle on tool performance and hole quality in drilling composite/titanium stacks, SAE Technical Paper, Doi: 10.4271/2011-01-2744, 2011.
 63. SenthilKumar M., Prabukarthi A., Krishnaraj V., Study on tool wear and chip formation during drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP)/titanium alloy (Ti6Al4V) stacks, Procedia Eng, 64, 582-592, 2013.
 64. Ahmad J., Machining of polymer composites, Springer, Boston, 2009.
 65. Ashrafi S.A., Sharif S., Farid A.A., Yahya M.Y., Performance evaluation of carbide tools in drilling CFRP-Al stacks, J. Compos. Mater, 48 (17), 2071-2084, 2014.
 66. Kim D., Ramulu M., Pedersen W., Machinability of titanium/graphite hybrid composites in drilling, Trans. North Am. Manuf. Res. Inst. SME, 33, 445-452, 2005.
 67. Bosco M.A.J., Palanikumar K., Prasad B.D., Velayudham A., Analysis on influence of machining parameters on thrust force in drilling GFRP-armor steel sandwich composites, J. Compos. Mater, 49 (13), 1539-1551, 2015.
 68. Kuo C.L., Soo S.L., Aspinwall D.K., Thomas W., Bradley S., Pearson D., M'Saoubi R., Leahy W., The effect of cutting speed and feed rate on hole surface integrity in single-shot drilling of metallic-composite stacks, Proc. CIRP, 13, 405-410, 2014.
 69. Bayraktar Ş., Turgut Y., Investigation of the cutting forces and surface roughness in milling carbon fiber reinforced polymer composite material, Mater. Technol, 50 (4), 591-600, 2016.
 70. Kaçal A., Yıldırım F., Determining the Effects of CBNCutting Insert's Cutting Performance on Surface Roughness and Tool Wear at Turning of PMD 23 Steel, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (1), 181-189, 2016.
 71. Göv K., Experimental Investigation of the Effects of the Coolant on the Performance Parameters of Electrical Discharge Drilling of Some Aerospace Materials, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (1), 293-301, 2017.
 72. Yaman K., Başaltın M., Investigations on the Cutting Parameters and The Tool Wear of SAE 1030 Forged Steel Material by Acoustic Emission in Turning Operation, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (4), 1077-1088, 2017.

