

Kompakt laminat kompozit malzemenin tungsten karbür takımlarla delinmesinde delaminasyon faktörünün değerlendirilmesi

Evaluation of the delamination factor for drilling of compact laminate composite material with tungsten carbide tools

Tuncay BİLGE^{1*}, Ali Rıza MOTORCU², Aleksandar IVANOV³

¹Çanakkale Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye.
tuncaybilge@comu.edu.tr

²Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye.
armotorcu@comu.edu.tr

³Takım Tezgâhları ve İmalat Bölümü, Makine ve İmalat Mühendisliği Fakültesi, Ruse Angel Kanchev Üniversitesi, Ruse, Bulgaristan
akivanov@uni-ruse.bg

Geliş Tarihi/Received: 16.02.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 04.05.2016

doi: 10.5505/pajes.2016.97992

* Yazışılan yazar/Corresponding author

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Delaminasyon faktörü, kompakt laminat kompozit malzemelerin (KLK) delinmesinde oluşan yüzey hasarlarının değerlendirilmesi için önemli bir parametredir. Bu çalışmada, ön delik delinmiş KLK malzemenin yeni (T1) ve aşınmış tungsten karbür takımlarla (T2) delinmesinde delik çıkış bölgelerinde oluşan delaminasyonlar incelenmiş ve kontrol faktörlerinin delaminasyon faktörü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. KLK iş parçaları üç farklı kesme hızı (178, 250 ve 350 m/dk), üç farklı ilerleme miktarı (0.07, 0.111 ve 0.156 mm/dev) ve iki farklı delme tipi (doğrusal delik delme ve kademeli delik delme) ile CNC tezgâhında delinmişlerdir. Taguchi Metodu kullanılarak L18 (2¹×3²) ortogonal diziyeye göre deneysel çalışma gerçekleştirilmiş ve kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri belirlenmiştir. Ayrıca, delaminasyon faktörü üzerinde delme parametrelerinin etkilerini gösteren matematiksel modeller geliştirilmiştir. T1 takımlarla delmede delaminasyon faktörü ortalaması 1.036 olarak hesaplanmış iken T2 takımlarla delmede delaminasyon faktörü ortalaması 1.473 bulunmuştur. Kontrol faktörlerinin delaminasyon faktörü üzerindeki etkilerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. T1 takımlarla delmede delaminasyon faktörü üzerinde en etkili parametreler sırasıyla kesme hızı (%65.30), delme tipi (%11.63) ve ilerleme miktarı (%8.16) olmuş iken kullanılan T2 takımlarla delmede bu sıralama ilerleme miktarı (%58.79), delme tipi (%18.38) ve kesme hızı (%3.43) şeklinde olmuştur. Sonuç olarak; KLK malzemeyi aşınmış takımlarla delmede maksimum deforme olmuş çap daha büyük çıkmıştır.

Anahtar kelimeler: Kompakt laminat kompozit, Delik delme, Delaminasyon faktörü, Düz parmak freze takım, Taguchi metodu

Abstract

Delamination factor is an important parameter for evaluating the surface damage in the drilling of compact laminate composites (CLC). In this study, delamination occurred in the hole exit region was studied and the effects of control factors on delamination factor were investigated in the drilling of pre-drilled CLC materials with new (T1) and worn (T2) tungsten carbide flat end mill cutting tools. CLC workpieces are drilled on CNC machine at three different cutting speed (178, 250 and 350 m/min), three different feed rate (0.07, 0.111 and 0.156 mm/rev) and two different drilling type (linear drilling and peck drilling). An experimental study has been performed according to L18 (2¹×3²) orthogonal array using Taguchi method and the optimum levels of control factors are determined. In addition, predictive equations were developed showing the effects of drilling parameters on delamination factor. Delamination factor calculated with an average of 1.036 in drilling T1 tools while delamination factor was measured with an average of 1.473 in drilling T2 tools. Analysis of variance (ANOVA) was applied to determine the effects of control factor on the delamination factor. The most influential parameters on delamination factor in drilling with T1 tools has been the cutting speed (65.30%), type of drilling (11.63%) and feed rate (8.16%) when the cutting speed (58.79%), drilling type (18.38%) and feed rate (3.43%) has been the most influential parameters on delamination factor in drilling with T2 tools, respectively. As a result; higher maximum deformed diameter was obtained in the drilling CLC material with worn tools.

Keywords: Compact laminate composite, Drilling, Delamination factor, Flat end mill tool, Taguchi method

1 Giriş

Delik delme işlemi, talaş kaldırma işlemlerinin yaklaşık üçte birini içermekte olup genellikle son işlem olarak uygulanmaktadır. Geleneksel delik delme yöntemi ekonomikliği ve basit uygulanabilirliği gibi sebeplerden dolayı çeşitli endüstri ürünlerinin elde edilmesinde başvurulan talaşlı imalat yöntemlerinden birisidir [1].

Delaminasyon, tabakalı kompozitlerin delinmesinde meydana gelen büyük hasarlardan birisidir. Kompozitlerin delinmesi esnasında iş parçası üzerindeki delik giriş ve çıkışlarında sıkça görülen bir durumdur. Delik etrafında oluşan delaminasyon faktörünü belirlemek için, delaminasyon bölgesindeki maksimum çapın (D_{max}) bulunması gerekmektedir (Şekil 1). Delaminasyon faktörü (Df) Şekil 1'den de görüleceği üzere,

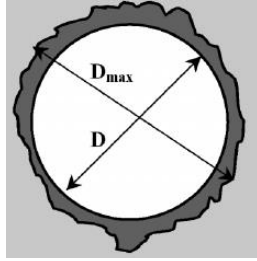
delme esnasında hasar bölgesinde oluşan maksimum hasar çapının (D_{max}) matkap çapına (D) oranlanmasıyla hesaplanan sayısal bir değerdir. Delaminasyon faktörü aşağıdaki formülle belirlenmektedir [2],[3]:

$$Df = D_{max}/D \quad (1)$$

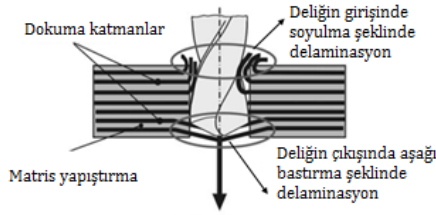
Bu faktör, kompozit malzemelerin delik delme işlemlerinde oluşan yüzey hasarlarının değerlendirilmesi için önemli bir parametredir [4]. Kompozit malzemelerde yapılan talaşlı imalat işlemlerinde oluşan yüzey hasarları iş parçası işleme kalitesinin değerlendirilmesi için önemli bir etkidir [2],[5].

Polimer kompozit malzemelerin delinmesinde oluşan delaminasyonlar; takımın kompozit malzemeye girişinde tabaka ayrılması şeklinde delaminasyon (Şekil 1a) ve takımın

malzemeden çıkışı esnasında saçaklanma şeklinde delaminasyon (Şekil 1b) olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleşir [3]. Delaminasyonun oluşumu kesme parametrelerinin bir fonksiyonu olarak ele alınmaktadır [3],[5].



(a): Delaminasyon faktörü.



(b): Kompozitlerin delinmesi esnasında oluşan delaminasyon.

Şekil 1: Delaminasyon faktörü ve kompozitlerin delinmesi esnasında oluşan delaminasyonun gösterimi [2],[3].

Kompakt laminat kompozit (KLK) paneller, fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde okullar, hastaneler, spor salonları, hava alanları, alışveriş merkezlerinin duvar kaplamalarında, tuvalet kabinlerinde, soyunma dolaplarında kullanılmakta olan malzemedir. Yüksek teknolojileri sayesinde darbelere, yangına, suya ve neme dayanıklıdır. Bu özelliklerinin yanı sıra çürümezler, bakteri barındırmazlar ve kolaylıkla temizlenebilirler. Fenol esaslı reçine emdirilmiş kraft kağıtları ile en dışında yer alan melamin esaslı reçinenin dekor kağıdına 150 °C sıcaklıkta ve 100 kg/cm² basınç altında 90 dk. preslenmesiyle oluşan levhalardır. KLK'larda bakteri üremesi üretim sırasında maruz kalınan basınç ve ısı sebebiyle imkansızdır. Bu sebeple KLK malzemeler hijyenik ürünlerdir. KLK malzeme yoğunluk ve sertlik bakımından değerlendirildiğinde, ahşap kompozit esaslı malzemelere oranla daha sert bir malzeme olduğundan kesme hızı, ilerleme miktarı, delme tipi ve talaş derinliği gibi kesme parametrelerinin uygun seviyelerinin seçilerek işlenmesi gerekmektedir. Özellikle CNC takım tezgâhında KLK malzeme yüzeyine yapılacak delik delme işlemi, kanal açma, cep boşaltma ve frezeleme işlemleri düşünüldüğünde uygun olmayan takımlarla çalışılması durumunda takım ömrünün azalması, artan malzeme sarfiyatı, istenmeyen yüzey bozuklukları gibi etkilerle karşılaşılabilir. Delaminasyon özellikle tabakalı kompozitlerin delinmesi esnasında iş parçası üzerindeki delik giriş ve çıkışlarında sıkça görülen bir yüzey hasar durumudur. Kompozitlerin delinmesinde delaminasyon oluşumunun azaltılması ve engellenmesi için yapılan çalışmalar yeni ve mevcut tabakalı tip kompozit malzemelerin geliştirilmesi devam ettiğinden/edeceğinden ve kalite istekleri arttığından dolayı önemini korumaktadır. Kılıçkap, delaminasyon faktörünün kesme hızı, ilerleme miktarı ve matkap uç geometrisi gibi delme parametrelerinden etkilendiğini ve en düşük delaminasyon faktörünün düşük kesme hızı ve ilerleme miktarı değerlerinde oluştuğunu belirtmiştir [6]. Koboevic ve diğ. karbon epoksi kompozit

malzemelerin üç farklı matkapla delinmesinde özellikle yüksek kesme hızı ve ilerleme miktarı değerlerinde delaminasyon faktöründe artış olduğunu belirlemişlerdir [7]. Valarmathi ve diğ. farklı çaplara sahip HSS helisel matkaplarla ön lamine edilmiş orta yoğunlukta lif levha (MDF) panellerin delinmesinde delaminasyon üzerinde en etkili parametreleri sırasıyla ilerleme miktarı ve matkap çapı olarak tespit etmişlerdir. Deneysel çalışmaların tasarım ve analizlerinde Taguchi Metodu (TM) ve Yanıt Yüzey Tekniği kullanılmıştır [8]. Colt-Stoica ve diğ. tabakalı karbon elyaf kompozitlerde delmeden kaynaklanan hataların olduğunu tespit etmişler ve delme kuvveti ölçümlerini yaparak delik kenarlarının durumunu ve yüzey özelliklerini gözlemlemişlerdir [9]. Benzer bir çalışmada Herbert ve diğ. 0°/90° yönlendirilmiş karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit laminatların (BCFREC) HSS takımlarla farklı kesme hızı ve ilerleme miktarlarında delinebilirliğinin araştırmışlardır. Çalışmada, delaminasyon eğilimi, itme kuvveti ve torkun ilerleme miktarı ve kesme hızının artmasıyla arttığı tespit edilmiştir [10]. Sardiñas ve diğ. KLK'nin delinmesinde talaş kaldırma oranı ve yüzey kalitesini etkileyen delaminasyon faktörünü mikro-genetik algoritma yöntemiyle analiz etmişler ve grafik formda sunmuşlardır [11]. Jindal ve Singla, cam elyaf takviyeli kompozitlerin (GFRP) delinmesinde kesme parametrelerini optimize etmek için TM metodunu kullanmışlardır. Çalışmada, kesme kuvveti üzerinde kesme hızı ve matkap çapının numune kalınlığı ve ilerleme miktarından daha etkili olduğu tespit edilmiştir [12]. Ramesh ve diğ. laminat olmayan cam elyaf takviyeli plastik kompozitlerin (GFRP) kaplamalı tungsten karbür kesici takımlarla delinmesinde deliğin ovalitesi üzerinde kesme hızı ve ilerleme miktarının etkilerini araştırılmıştır. Çalışma sonucunda ovalite üzerinde kesme hızının etkisi önemsiz, ilerleme miktarının ise önemli etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [13]. Madhavan ve diğ. cam elyaf-epoksi/rijit poliüretan köpük sandviç hibrid kompozitleri 6, 8 ve 10 mm olmak üzere üç farklı çaptaki HSS matkaplarla delmişler ve delaminasyon oluşumuna itme kuvveti ve torkun neden olduğunu tespit etmişlerdir. Bu sonucu desteklemek için ise delinen delikleri tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelemişlerdir [14]. Bayraktar ve Turgut, polimer matrisli kompozit (PMK) malzemelerin delinmesi üzerine yapılan çalışmaları değerlendirmişlerdir. Yazarlar, yapılan çalışmalarda, delme işlemlerinde delik giriş ve çıkışında oluşan yüzey hasarlarının, kesici takım, kesme parametreleri ve kesici takım geometrisi gibi faktörler dikkate alınarak araştırıldığını ve elde edilen verilerin Taguchi, Anova, Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Regresyon analizi gibi yöntemler kullanılarak yorumlanmaya çalışıldığını belirtmişlerdir. PMK malzemelerin delinmesinde yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme miktarı değerlerinin kullanılması gerektiği vurgulanmıştır [15]. Duraó ve diğ. hibrid kompozit laminatların delinmesinde delaminasyon üzerinde kesme parametrelerinin önemli olduğunu tespit etmişlerdir [4].

Literatür araştırmaları sonucunda; takım ömrünü belirleyen ve takım ucundaki aşınmalara sebep olan matkap boyutları ve geometrisi, kesme hızı, ilerleme miktarı, fener mili devir sayısı, moment, kuvvet, işleme süresi, ilerleme kuvveti gibi faktörlerin delaminasyon üzerindeki etkilerinin deneysel ve teorik çalışmalarla incelendiği ve matematiksel modeller geliştirildiği görülmüştür [8],[11],[12],[15]. Geliştirilen bu modellerle elde edilen teorik değerler ile deneysel sonuçların da uyumlu olduğu görülmektedir. Deneysel tasarım ve

modelleme tekniğinin bu avantajlarından yararlanmak için bu çalışmada Taguchi metodu tercih edilmiştir [8],[15].

Bu çalışmada, ön delik delinmiş (\varnothing 8 mm) kompakt laminat kompozit malzemenin yeni (T_1) ve aşınmış düz parmak frezesi takımlarla (T_2) delinmesinde delik çıkış bölgelerinde oluşan delaminasyon incelenmiş ve delme parametrelerinin delaminasyon faktörü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda elde edilmiş olan verilerin bu malzemenin işlenebilirlik veri tabanına katkı sağlayacağı ve bu alanda çalışan uygulayıcılara doğru kesme koşullarının belirlenmesi açısından katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2 Malzeme ve metot

2.1 İş parçası, kesici takım ve takım tezgahı

İşlenebilirlik deneylerinde kullanılan iş parçası malzemesi EN 438-2 standardında, CGS sınıfı standart KLK olup bu malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [16].

Tabaka halindeki malzemeden 300x100x12 mm boyutlarında kesilen iş parçası malzemeleri delme deneylerinde kullanılmıştır. Vakumla sıkma yapan CNC tezgâhın tablasına iş parçasını bağlamak ve boydan boya delik delebilmek için iş parçası malzemeleri bir başka malzemeye bağlanarak delinmiştir.

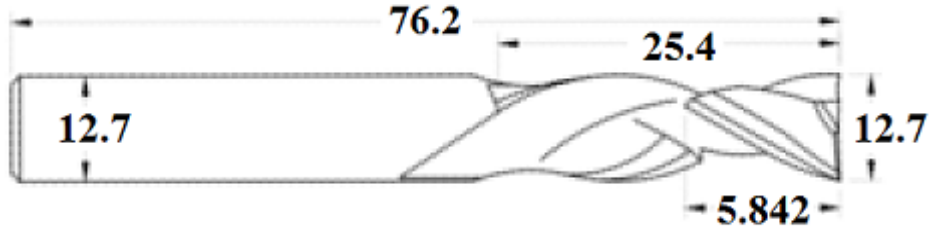
Kullanım alanı giderek genişleyen KLK malzemelerin CNC dik işleme merkezlerinde işlenmesi halihazırda ağaç işleri endüstrisinde kullanılan kesici takımlar kullanılarak yapılmakta olup işleme parametrelerinin seçimi kazanılmış mesleki deneyimlere dayanmaktadır. KLK malzemelerin işlenmesinde diğer önemli bir sorun ise halihazırda ağaç ürünlerinin işlenmesi için belirli malzemelerden ve belirli geometrilere yapılmış olan kesici takımların ömürlerinin aşılacak yüksek aşınma oranlarıyla kullanılmasına devam edilmesidir. Bu olumsuz uygulamaların parçaların kalitesine yansımalarının olacağı bilindiği halde kesici takımlarla işlemler sürdürülmektedir. Bu çalışmanın bir amacı da aşınmış takımlarla işlemeyi sürdürmenin delaminasyon üzerindeki etkisini değerlendirmektir. Delik delme deneylerinde, Şekil 2a'da teknik özellikleri verilen ROYCE AYR firmasına ait Tervelli R 60-12004 kodlu tungsten karbür kalitesine sahip yeni (T_1) (Şekil 2b-d) ve aşınmış (T_2)

(Şekil 2e-g) düz parmak frezesi takımlar kullanılmıştır [17]. Bu kesici takımlar, helisel matkaplar, şamdan tipi takımlar gibi KLK, kaplamalı ağaç ve ağaç kompozit malzemelerin işlenmesinde üst ve alt yüzeylerin bitirme kalitesinin kritik olduğu işlemlerde (delik delme ve büyütme, cep işleme, kanal açma vd.) tercih edilmektedir [17]. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Çanakkale Teknik Bilimler MYO Malzeme ve Malzeme İşleme Teknolojileri Bölümü Uygulama Atölyesindeki seri imalat uygulamalarında, KLK malzeme üzerine delik delmede helisel matkaplar gibi parmak frezelerde oldukça sık kullanıldığından aşınmış ve kullanılmaya devam eden 12 mm çapındaki düz parmak frezelerden 15-20 adedi incelenmek üzere seçilmiştir. Bu takımların kesme kenarları x1000 büyütme yapabilen, 0.001 mm hassasiyetinde ölçümlerin yapılabildiği portatif Dino Lyte optik mikroskop altında incelenmiştir (Şekil 2). Takımların kesme kenar ve yüzeylerinde yapılan takım aşınması incelemelerinde, köşe ve serbest/yan kenar aşınması $V_b=0.3-0.5$ mm aralığında olduğu hassas olarak ölçülmüş olan 9 adet parmak freze T_2 takım olarak deneylerde kullanılmak üzere ayrılmıştır (Şekil 2e-g).

Delme deneyleri Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Çanakkale Teknik Bilimler MYO Malzeme ve Malzeme İşleme Teknolojileri Bölümü Uygulama Atölyesinde yapılmıştır. Deneylerde tabla ölçüleri 2100x2800 mm, motor gücü 9 kW, maksimum devir sayısı 24000 dev/dk. olan 3 eksenli AES RAPTOR 2128 CNC dik işleme merkezi kullanılmıştır (Şekil 3). CNC takım tezgahı üzerinde yürütülen deneysel çalışmalar Şekil 3'te gösterilmektedir. Kontrol faktörlerinin farklı seviyelerinde delinmesi için uygun bir CNC program yazılmıştır. Yazılan CNC programa isteğe bağlı durdurma satırı eklenerek her delik delme sonrasında yeni takım takılarak takım boyu istenilen mesafeye ayarlanmıştır (Şekil 3). Deneylerin başlangıcında \varnothing 8 mm çapında HSS helisel matkapla ön delik delinmiştir. Daha sonra \varnothing 12.7 mm çapındaki T_1 ve T_2 takımlarla doğrusal delik delme ve kademeli delik delme operasyonları uygulanarak nihai delikler delinmiştir. Kademeli delik delme operasyonlarında takım dönerken bir miktar deler ve biriken talaş atmak için emniyet mesafesine çıkar ve tekrar delmeye devam eder böylelikle takım delik içerisindeki talaş dışarı atar.

Tablo 1: KLK malzemeye ait teknik özellikler [16].

Genel Özellikler	Deney Metodu	Özellik veya Nitelik	Birim (Max veya Min)	Değerler
Yüzey Aşınmasına karşı mukavemeti	EN 438-2.10	İlk Aşınma noktası Aşınma Değeri	Devir (min) Devir(min)	≥ 150 ≥ 350
Büyük çaplı bilye çarpmasına mukavemet	EN 438-2.21	Zedelenme çapı $2 \leq t < 6$ Zedelenme çapı $t \geq 6$	mm mm	$h \ 1400 / d \leq 10$ $h \ 1800 / d \leq 10$
Yüzey çatlamasına mukavemet	EN 438-2.24	Görünüm	Derecelendirme (min)	4
Çizilmeye mukavemet	EN 438-2.25	Görünüm-Pürüzsüz tamamlamalar Görünüm-Tekstürlü tamamlamalar	Derecelendirme (min) Derecelendirme (min)	2 3
Leke oluşumuna dayanım	EN 438-2.26	Görünüm Grup 1&2 Görünüm Grup 3	Derecelendirme (min) Derecelendirme (min)	5 4
Eğilme modülü	EN ISO 178	Gerilme	Mpa (min)	9000
Eğilme mukavemeti	E NISO 178	Gerilme	Mpa (min)	80
Çekme mukavemeti	EN ISO 527-2	Gerilme	Mpa (min)	60
Yoğunluk	EN ISO 1183	Yoğunluk	g/cm^3	≥ 1.35
Formaldehit salımı	EN 717-2	Gaz analizi Sınıflandırma	$mg/(m^2 \cdot h)$ Sınıflandırma	0.5 E1
Yanmaya mukavemet/CGS	EN 13823	Sınıflandırma- t: 6 mm-10 mm	Sınıflandırma	D-s2 d0
Yanmaya mukavemet/CGF	EN 13823	Sınıflandırma: t:6 mm	Sınıflandırma	C-s2 d0



Takım çapı, boyu: $\varnothing 12.7 \times 76.2$ mm
Kesme kenarı sayısı 2

Kesme boyu (helis boyu): 25.4 mm
Helis yönü: Sol helis

Kesme kenarı uzunluğu 5.842 mm
Helis açısı: 30°

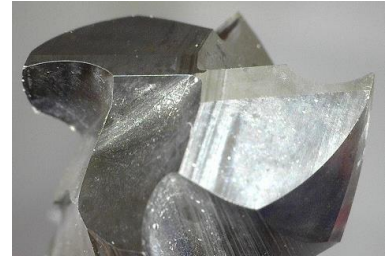
(a): Kesici takımın teknik özellikleri.



(b): Yeni takım (T₁).



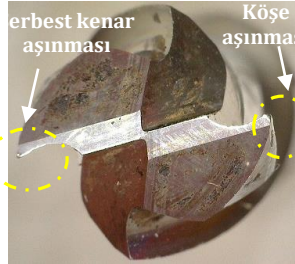
(c): T₁ takımın keskin kesme kenarları.



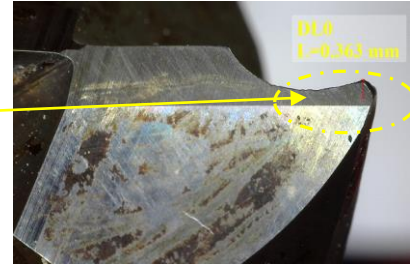
(d): T₁ takımın kesme kenarlarının açılı görüntüsü.



(e): Aşınmış takım (T₂).



(f): T₂ takımın aşınmış kesme kenarları.



(g): T₂ takımında köşe aşınması.

Şekil 2: Deneylede kullanılan yeni ve aşınmış kesici takımların teknik özellikleri ve aşınma optik görüntüleri.

Bu sayede takım ve iş parçası zarar görmez. 12 mm kalınlığındaki KLK malzeme üzerinde delikler delinirken kesici takım referans alınan iş parçası üst yüzeyinden $z=+10$ mm güvenli mesafede delmeye başlamış ve $-z$ yönünde $Q=5$ mm delerek talaşı atmak için emniyet mesafesine geri gelmiş ve tekrar $-z$ yönünde bu sefer $Q=5+5$ mm ilerleyerek ikinci talaşı kaldırmış ve bir önceki işlemleri tekrar etmiştir. Bu kademeli delik delme işlemi, her delik delme işleminde, kesici takım iş parçasının alt yüzeyinden 8 mm dışarıya çıkıncaya kadar ((10 mm güvenli mesafe+12 mm parça kalınlığı+8 mm matkabin parçanın alt yüzeyinden çıkması=30 mm)/5 mm kademe mesafesi) 6 kez tekrarlanarak delinmiştir. Doğrusal delik delme işlemlerinde ise matkap iş parçası üst yüzeyinden $z=+10$ mm güvenli mesafeden delik delmeye başlamış ve iş parçasının alt yüzeyinden 8 mm dışarıya çıkıncaya kadar delmeye devam edilerek delikler elde edilmiştir. Her deney yeni bir kesici takım ile başlanılmıştır.

2.2 Delaminasyon ölçümü

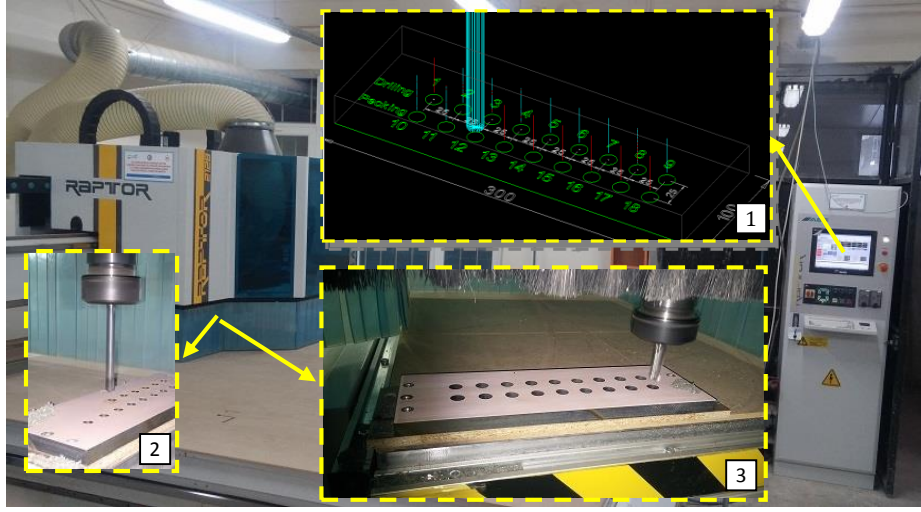
T₁ ve T₂ takımlarla KLK iş parçası malzemesi üzerinde delinen deliklerdeki delaminasyonlar bilgisayar bağlantılı Dino Lite Pro AM4000 1.3 Mgp. optik mikroskop ile görüntülenerken, Dino Capture 2.0 programıyla ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4a). Delik girişlerinde delaminasyon oluşumu tespit

edilmediğinden her deliğin çıkış bölgesinden maksimum olduğu belirlenen 6 delaminasyon oluşum bölgesi belirlenerek ölçüm yapılmış ve delaminasyon faktörüne dönüştürülerek kaydedilmiştir (Şekil 4b). En büyük üç delaminasyon faktörünün ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak çözümlenelerde kullanılmıştır.

2.3 Taguchi metodu ile deneysel tasarım

KLK malzemenin aşınmamış/yeni ve aşınmış olmak üzere iki tip kesici takımla delinmesinde delaminasyon faktörü üzerinde delme parametrelerinin etkilerini belirlemek amacıyla Taguchi Metodu (TM) kullanılmış ve kontrol faktör grubunun toplam serbestlik derecesi de göz önünde bulundurularak en uygun ortogonal dizi olarak L₁₈ (2⁴×3²) seçilmiştir [18],[19]. TM, süre ve maliyetin azaltılması için etkili bir yöntemdir. Bu yöntem sayesinde en iyi parametre değerleri belirlenirken performans özellikleri de optimize edilebilmektedir [18],[19].

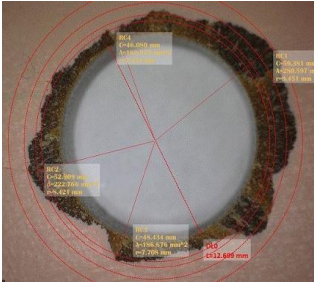
İş parçası üzerinde yapılan ön deneyler, kesici takım firmasının önerileri, kesici takım-takım tezgâhının performansları ve delik delme prosesleri göz önünde bulundurularak Tablo 2'de verilen delme parametrelerinin uygun seviyeleri belirlenmiştir.



Şekil 3: Deney tasarımına göre kesici takım hareketlerinin simülasyonu ve CNC takım tezgâhında işlenebilirlik deneyleri.



(a): Optik mikroskop ile delaminasyonların incelenmesi.



(b): Delik çıkış bölgesinden delaminasyon ölçümleri.

Şekil 4: Delaminasyon faktörünün belirlenmesi için optik mikroskopla delaminasyon ölçümü.

Tablo 2: Delme parametreleri ve seviyeleri.

Sembol	Kontrol Faktörleri	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Delme Tipi, (Dt)	-	Doğrusal delik delme	Kademeli delik delme	-
B	Kesme Hızı, (Vc) İlerleme	m/dk	178	250	350
C	Miktarı, (f)	mm/dev	0.07	0.111	0.156

KLK'nın delinmesinde delaminasyon faktörü değerlerinin en düşük olması istendiğinden bağımlı değişkenin kalite karakteristiği sinyal/gürültü (S/N) oranları dB cinsinden "Daha küçük daha iyi" yaklaşımına göre 2 nolu formül ile hesaplanmıştır [18],[19].

$$S/N_{SB} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

Bu denklemde, n deney sayısı, y_i ise elde edilen i. veriyi ifade etmektedir [19]. Her bir kontrol faktör seviyelerinin Df üzerindeki etkileri S/N oranları kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca, kontrol faktörlerinin ana etkileri %95 güven seviyesinde gerçekleştirilen Varyans Analizi (ANOVA) ile belirlenmiştir. ANOVA analizlerinden anlamlı etkileri tespit edilen kontrol faktörlerinin optimal seviyeleri ile tahminsel optimal kalite karakteristikleri (Tahminsel optimal delaminasyon faktörleri; $Df_{1,opt}$ ve $Df_{2,opt}$) belirlenmiştir. Doğrulama deneyleri kalite karakteristiğini belirlemek için güven aralığı hesaplanmıştır. Tahminsel optimal kalite karakteristiği $Df_{1,opt}$ ve $Df_{2,opt}$ için güven aralığı (CI);

$$CI = \sqrt{F_{\alpha;1,V_2} V_e \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (3)$$

formülü ile hesaplanmıştır. Burada; $F_{\alpha;1,V_2}$ anlamlı seviye α 'nın F-oranı, α : anlamlı seviye, v_2 : birleştirilmiş hata varyansının serbestlik derecesi, V_e : birleştirilmiş hata varyansı, r: tekrar deneylerinin sayısı, n_{eff} geçerli ölçüm sonuçlarının sayısıdır. Geçerli ölçüm sonuçlarının sayısı (n_{eff});

$$n_{eff} = \frac{T_{den}}{1 + dof} \quad (4)$$

Bu denklemde; T_{den} : toplam deney sayısı, dof : tahmin için kullanılan faktörlerin toplam serbestlik derecesidir.

TM ile elde edilen tahminsel değerlerle kıyaslamak ve TM'nin tahmin yeteneğini belirlemek amacıyla lineer regresyon analizi ile birinci dereceden tahminsel denklemler geliştirilmiştir. Birinci dereceden tahminsel denklemler aşağıdaki gibi formülüne edilebilir.

$$Y_2 = y - \varepsilon = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (5)$$

Denklem 5'te; Y_2 birinci dereceden denklemin yanıtı, y logaritmik ölçekte ölçülen delaminasyon faktörleri; $x_0=1$ sabit değişken, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_2, x_3$ kontrol faktörleri kesici takım, kesme hızı ve ilerleme miktarının logaritmik dönüşümleri; ε deneysel hata; $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ ise parametre katsayıları olup en küçük kareler yöntemi ile tahmin edilmiştir [18],[19].

3 Sonuçlar ve tartışma

3.1 Kompakt laminatın delinmesinde delaminasyon oluşumu

Tabakalı kompakt kompozit laminat malzemelerin ya da ağaç ürünlerinden geliştirilmiş kompozit malzemelerin delinmesinde en çok karşılaşılan kalite problemlerinden birisi de delik giriş ve çıkışında oluşan delaminasyondur [7],[8],[10],[14],[15]. Bu delaminasyon oluşumu uygun kesici takım, delme parametreleri ve operasyonların seçimi ile önlenilmekte ya da azaltılabilmektedir [4]. Kesici takım aşınmasından da aşınma kriterlerini geçmemiş olması gerekir. KLK malzemenin aşınmış ve aşınmamış düz parmak freze takımları ile delinmesinde delaminasyon faktörünün araştırıldığı bu çalışmada delik girişinde deliğin kalitesini bozacak delaminasyon gözlenmemiştir. İş parçasına $\varnothing 8$ mm çapında ön delik delinmesinden sonra $\varnothing 12.7$ mm çapındaki parmak freze takımının her kesme kenarı için 2.35 mm talaş payı kalmaktadır. Matkap itme kuvvetiyle kaplama malzemesi deforme olmadığından kalan talaş payı delaminasyon oluşmadan kaldırılmaktadır. Yapılan ön deneylerde delik çıkışında her kesme şartlarında delaminasyon oluşumu gözlemlendiğinden delaminasyonun azaltılması için uygun delme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır [4].

Yapılan deneylerde delik çıkışlarında oluşan delaminasyon görüntüleri Şekil 5'te sunulmuştur. Şekil 5a ve b'den görüleceği üzere tüm kesme şartlarında T_1 takım ile yapılan delmelerde oluşan delaminasyon T_2 takım ile oluşan delaminasyondan daha azdır. Buradan takım aşınması kriterinin delaminasyon üzerinde oldukça etkili olduğu anlaşılmaktadır. KLK malzemenin kullanıldığı yerler baz alındığında aşınmış takımlar kullanılarak yapılan delme işlemlerinde oluşan yüksek orandaki delaminasyon oluşumu en üst katmanın altındaki tabakalı bölgenin kısa sürede deformasyonuna sebep olmuştur. Görüntü ve montaj problemleri de oluşacak diğer sorunlar arasındadır.

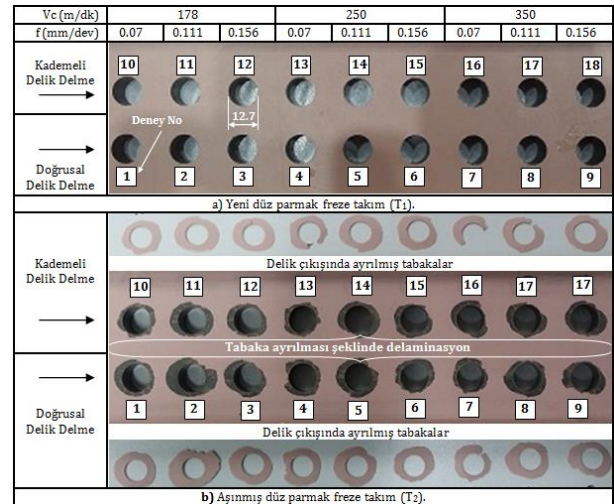
3.2 İstatistiksel analiz

KLK'nin T_1 takımlarla delinmesinde elde edilmiş delaminasyon faktörü sonuçları (Df_1) ve T_2 takımlarla delinmesinde elde edilmiş delaminasyon faktörü sonuçlarının (Df_2) aritmetik ortalaması Tablo 3'te sunulmuştur. KLK malzemenin Df ölçümlerinin aritmetik ortalamaları Minitab 16.1 paket programında çözümlenmiş, grafiklerin çiziminde ve kontrol faktörleri etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Tablo 3'ten aşınmamış takımların aşınmış takımlara göre daha yüksek delaminasyona sebep olduğu görülmektedir.

KLK malzemelere $D=12.7$ mm çapındaki T_1 takım ile doğrusal delik delinmesinde delik çıkış yüzeyinde kaplama katmanının soyulması şeklinde, 12.817-13.663 mm aralığında maksimum deforme olmuş çap (D_{max}) elde edilmiş iken aynı takımlarla

kademeli delik delme yapıldığında ise 12.668-13.823 mm aralığında D_{max} elde edilmiştir. T_1 takımlarla doğrusal delik delme yöntemiyle delik delinirken delaminasyon faktörü ortalama $Df_1=1.041$, kademeli delik delme yöntemiyle delik delinirken delaminasyon faktörü ortalama $Df_1=1.030$ olarak hesaplanmıştır. Buradan; kademeli delik delme işleminde delaminasyon faktörünün daha düşük olduğu görülmektedir. T_1 takımlarla ortalama $Df_1=1.036$ delaminasyon faktörü (S/N oranı -0.30 dB) elde edilmiş iken T_2 takımlarla ortalama $Df_2=1.473$ delaminasyon faktörü (S/N oranı -3.34 dB) elde edilmiştir. Buradan KLK malzemenin T_1 takımlarla delinmesinde maksimum deforme olmamış çap %42 oranında daha düşük çıkmıştır. Yani, T_2 takım kullanmak delaminasyon oluşumu üzerinde daha etkili olmuştur. Bu durum KLK malzemenin keskin ve aşınmamış kesme kenarlarına sahip T_1 takım ile delinirken "tabaka ayrılması" şeklinde delaminasyonun oluşmamasına atfedilmiştir.

Tüm kontrol faktör seviyelerinin ortalama S/N oranı değerleri Tablo 4'te, ortalama yanıt değerleri ise Tablo 5'te sunulmuştur. Sinyal değeri sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri temsil ederken, gürültü faktörü ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil etmektedir [18],[19]. S/N oranı analizi, seçilen şartlar altında KLK malzemenin yeni T_1 ve T_2 matkaplarla delinmesi işleminin doğası hakkında önemli bilgiler vermiştir [18]. Kontrol faktörlerinin her birinin farklı seviyelerinde hesaplanan en yüksek ve en düşük S/N oranı değerleri arasındaki farkların daha yüksek ya da az olması Df_1 ve Df_2 üzerindeki etkili faktörlerin belirlenmesinde kullanılmıştır [18],[19]. Df_1 için en etkili parametreler 0.2634 dB, 0.0997 dB ve 0.0986 dB olmak üzere kesme hızı, ilerleme miktarı ve delme tipi olarak belirlenmiştir (Tablo 4). Parametrelerin etki sırası Koboovic ve diğ. ile Herbert ve diğ. tarafından yapılan çalışmanın sonuçları ile benzerlik göstermektedir [7],[10]. Benzer şekilde, Df_2 üzerinde en etkili parametreler, seviyeleri arasında 1.123 dB, 0.517 dB ve 0.288 dB farkları olduğu için sırasıyla ilerleme miktarı, delme tipi ve kesme hızı olmuştur (Tablo 4). HSS helisel takımlarla MDF malzemenin delinmesinde de delaminasyon üzerinde en etkili parametreleri sırasıyla ilerleme miktarı ve matkap çapı olmuştur [8]. Tablo 5'te "*" ile belirtildiği üzere, T_1 takım ile delmede Df_1 ve T_2 takım ile delmede Df_2 için optimum değerler aynı olacak şekilde $Dt_2Vc_1f_1$ (kademeli delik delme, 178 m/dk, 0.07 mm/dev) olarak belirlenmiştir.



Şekil 5: Deliklerin çıkış yüzeyinde oluşan delaminasyonlar.

Tablo 3: L₁₈ (2¹×3²) ortogonal dizisine göre deney tasarımı, deneysel sonuçlarının tahminsel sonuçlarla kıyaslanması.

Deney No	Dt	Vc (m/dk)	f (mm/dev)	Yeni düz parmak freze, T ₁								Aşınmış düz parmak freze, T ₂											
				Maksimum Hasar Çapı			Delaminasyon Faktörü		Taguchi çözümlenmeleri tahminsel sonuçları			Doğrusal regresyon denklemi tahminsel sonuçları		Maksimum Hasar Çapı			Delaminasyon Faktörü		Taguchi çözümlenmeleri tahminsel sonuçları			Doğrusal regresyon denklemi tahminsel sonuçları	
				D _{max1} (mm)	D _{max2} (mm)	D _{max3} (mm)	Df ₁ (mm)	S/N Oranı, (dB)	Df ₁ Tag. (mm)	Hata (%)	Df ₁ Reg. (mm)	Hata (%)	D _{max1} (mm)	D _{max2} (mm)	D _{max3} (mm)	Df ₂ (mm)	S/N Oranı, (dB)	Df ₂ Tag. (mm)	Hata (%)	Df ₂ Reg. (mm)	Hata (%)		
1	Doğrusal Delik D.	178	0.07	13.151	13.023	12.817	1.023	-0.20	1.023	0.04	1.029	0.63	17.082	18.438	16.853	1.375	-2.76	1.402	2.00	1.398	1.68		
2	Doğrusal Delik D.	178	0.111	13.436	13.201	12.845	1.036	-0.31	1.029	0.67	1.036	0.01	19.099	18.407	19.053	1.484	-3.43	1.494	0.64	1.516	2.18		
3	Doğrusal Delik D.	178	0.156	13.641	13.175	12.965	1.044	-0.38	1.035	0.83	1.043	0.10	22.429	21.017	21.874	1.714	-4.68	1.594	7.01	1.644	4.08		
4	Doğrusal Delik D.	250	0.07	13.969	13.319	13.200	1.036	-0.31	1.029	0.70	1.029	0.67	19.212	18.569	17.515	1.451	-3.24	1.418	2.26	1.406	3.08		
5	Doğrusal Delik D.	250	0.111	13.132	13.100	13.299	1.038	-0.32	1.034	0.35	1.034	0.35	19.063	19.505	19.148	1.515	-3.61	1.509	0.38	1.509	0.38		
6	Doğrusal Delik D.	250	0.156	13.499	12.863	13.228	1.039	-0.33	1.041	0.16	1.040	0.13	20.199	19.455	19.047	1.541	-3.75	1.610	4.45	1.621	5.22		
7	Doğrusal Delik D.	350	0.07	13.608	13.004	13.325	1.048	-0.41	1.055	0.66	1.049	0.14	17.936	17.522	17.337	1.386	-2.83	1.448	4.48	1.429	3.07		
8	Doğrusal Delik D.	350	0.111	13.240	13.663	13.106	1.050	-0.42	1.061	1.00	1.054	0.35	20.703	19.710	19.974	1.585	-4.00	1.539	2.90	1.516	4.34		
9	Doğrusal Delik D.	350	0.156	13.505	13.492	13.335	1.059	-0.49	1.067	0.73	1.058	0.05	21.551	20.046	19.443	1.602	-4.09	1.639	2.33	1.613	0.69		
10	Kademeli Delik D.	178	0.07	12.668	12.716	12.887	1.004	-0.04	1.012	0.78	1.004	0.05	16.422	16.753	17.069	1.319	-2.40	1.314	0.40	1.287	2.39		
11	Kademeli Delik D.	178	0.111	12.933	12.894	12.845	1.015	-0.13	1.017	0.24	1.011	0.43	16.841	17.211	17.535	1.354	-2.63	1.405	3.75	1.382	2.06		
12	Kademeli Delik D.	178	0.156	12.999	12.972	12.797	1.018	-0.15	1.024	0.56	1.018	0.03	18.189	18.652	19.062	1.467	-3.33	1.505	2.60	1.486	1.27		
13	Kademeli Delik D.	250	0.07	12.724	12.935	13.015	1.015	-0.13	1.017	0.21	1.017	0.18	17.659	16.301	16.969	1.337	-2.52	1.329	0.56	1.341	0.33		
14	Kademeli Delik D.	250	0.111	13.034	12.853	12.962	1.020	-0.17	1.023	0.28	1.023	0.28	18.260	17.794	18.140	1.422	-3.06	1.421	0.10	1.421	0.10		
15	Kademeli Delik D.	250	0.156	13.000	12.906	13.149	1.025	-0.22	1.029	0.40	1.029	0.43	19.810	19.336	19.596	1.542	-3.76	1.521	1.37	1.509	2.14		
16	Kademeli Delik D.	350	0.07	13.318	13.088	13.665	1.052	-0.44	1.043	0.83	1.051	0.10	18.252	17.388	17.859	1.404	-2.95	1.359	3.18	1.410	0.40		
17	Kademeli Delik D.	350	0.111	13.401	13.213	13.566	1.055	-0.46	1.049	0.58	1.056	0.07	18.867	18.084	18.555	1.457	-3.27	1.450	0.45	1.473	1.12		
18	Kademeli Delik D.	350	0.156	13.718	13.823	13.083	1.066	-0.56	1.055	1.02	1.061	0.45	20.408	19.275	19.493	1.553	-3.82	1.551	0.15	1.546	0.43		
En Büyük=				13.823			1.066						22.429		1.714								
En Küçük=				12.668			1.004						16.301		1.319								
Ortalama=				13.154			1.036		-0.30		0.56		0.25		18.703			1.473		-3.34		2.17	

Tablo 4: Delaminasyon faktörlerinin sinyal-gürültü oranları için yanıt tablosu (Daha küçük daha iyi).

Seviye	T ₁ için S/N_Df ₁			T ₂ için S/N_Df ₂		
	Dt	Vc	f	Dt	Vc	f
1	-0.3531	-0.2008	-0.2546	-3.600	-3.207	-2.784
2	-0.2545	-0.2464	-0.3024	-3.083	-3.323	-3.333
3		-0.4642	-0.3543		-3.495	-3.908
Fark	0.0986	0.2634	0.0997	0.517	0.288	1.123
Sıralama	3	1	2	2	3	1

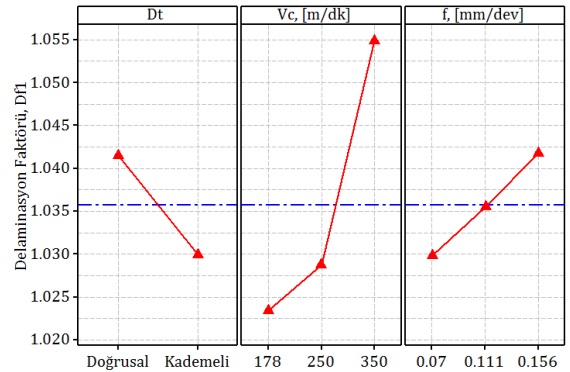
Tablo 5: Delaminasyon faktörleri için yanıt tablosu.

Seviye	T ₁ için Df ₁			T ₂ için Df ₂		
	Dt	Vc	f	Dt	Vc	f
1	1.042	1.023*	1.030*	1.517	1.452*	1.379*
2	1.030*	1.029	1.036	1.428*	1.468	1.470
3		1.055	1.042		1.498	1.570
Fark	0.012	0.031	0.012	0.089	0.046	0.191
Sıralama	3	1	2	2	3	1

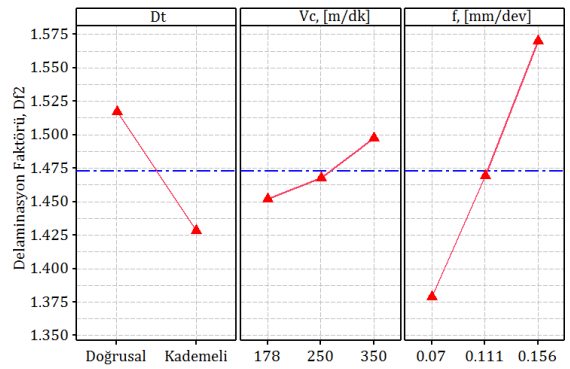
Kontrol faktörlerinin Df₁ üzerindeki etkilerini belirten ana etki grafikleri Şekil 6a'da, Df₂ için ana etki grafikleri ise Şekil 6b'de sunulmuştur.

Şekil 6a'da görüleceği üzere T₁ ile delmede delaminasyon Df₁ için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri sırasıyla Dt=Kademeli delik delme, Vc=178 m/dk, f=0.07 mm/dev şeklindedir. Benzer şekilde, Şekil 6b'de T₂ ile delmede Df₂ için optimum seviyelerin Dt=Kademeli delik delme, Vc=178 m/dk, f=0.07 mm/dev olduğu görülmektedir. Her iki kesici takımda da gerçekleştirilen kademeli delik delme operasyonlarında daha düşük delaminasyon faktörü elde edilmiş, kesme hızı ve

ilerleme miktarının artırılmasıyla delaminasyon faktörü değerleri artmıştır. Çünkü daha yüksek ilerleme miktarı ve kesme hızlarında artan itme kuvveti ve tork daha fazla delaminasyon oluşumuna da sebep olmaktadır [2],[3],[6]-[8], [10].



(a): Df₁ için ana etki grafiği.



(b): Df₂ için ana etki grafiği.

Şekil 6: T₁ ve T₂ ile delmede Df₁ ve Df₂ için ana etki grafikleri.

Elde edilen bu sonuçlar literatürde benzer malzemeler üzerinde yapılan çalışmaların sonuçlarıyla paralellik göstermektedir [4],[7],[10],[12],[14]. Kademeli delik delme operasyonunda takımın ilerleme hareketi ile belirli bir mesafe gittikten sonra ters yönde hareket ettirilmesi ile itme kuvveti ve tork sıfırlanarak, delik içerisindeki talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılması ve takım kesme kenarlarının da temizlenmesi sağlanmaktadır. Böylece takımın kesmesi kolaylaşacağından ve delik çıkış bölgesinde kesici takımın dış kaplama katmanına uygulamış olduğu itme kuvveti daha kısa ve kesikli bir sürede uygulanmış olacağından kaplama katmanının soyulması şeklinde oluşan delaminasyon daha az olacaktır [10],[14]. T₂ takımlarla doğrusal delik delmede ortalama Df₂=1.517, kademeli delik delmede delaminasyon faktörü Df₂=1.428 olarak elde edilmiştir. T₂ takımlarla kademeli delik delmede de delaminasyon faktörü daha düşük çıkmıştır.

Seçilen performans/kalite karakteristiklerine kontrol faktörlerinin etkilerini belirlemek için L₁₈ (2¹x3²) ortogonal dizideki her bir deney için %95 güven aralığında varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Df₁ ve Df₂ için yapılan ANOVA sonuçları Tablo 6'da sunulmuştur. Df₁ üzerinde en etkili faktör %65.3 katkı oranıyla kesme hızı olmuştur. Kesme hızını %11.63 ve %8.16 katkı oranları ile sırasıyla; delme tipi ve ilerleme miktarı takip etmiştir (Tablo 6a) [7],[10],[14]. T₁ takımlarla delme işleminde ilerleme miktarının delaminasyon üzerinde etkisinin delme tipi ve kesme hızına göre daha düşük çıkmasının sebebi takımın yeni ve aşınmamış olmasına atfedilebilir. Çünkü, keskin kesme kenarlarına sahip T₁ takımla kesme-talaş kaldırma işlemi daha da kolaylaştığından özellikle orta ve yüksek ilerleme miktarlarında itme kuvvetinin kaplama katmanı üzerindeki delaminasyon etkisi azalacaktır. Df₂ üzerinde %58.79 katkı oranı ile en etkili parametre ilerleme miktarı olmuştur. İlerleme miktarını etki bakımından %18.9 katkı oranı ile delme tipi takip etmiştir. %3.44 katkı oranıyla kesme hızının Df₂ üzerinde en düşük etkiye sahip olduğu görülmüştür (Tablo 6b).

Tablo 6: Df₁ ve Df₂ için varyans analizi.

(a): T₁ ile Df₁ için ANOVA

Kaynak	DoF	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F_oranı	P	% Katkı
Dt	1	0.0006053	0.0006053	9.37	0.010	11.63
Vc	2	0.0033968	0.0016984	26.29	0.000	65.3
f	2	0.0004245	0.0002122	3.29	0.073	8.16
Hata	12	0.0007751	0.0000646			14.9
Toplam	17	0.0052017				100

R² = %85.10.

(b): T₂ ile Df₂ için ANOVA

Kaynak	DoF	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F_oranı	P	% Katkı
Dt	1	0.035385	0.035385	12.05	0.005	18.9
Vc	2	0.006430	0.003215	1.09	0.366	3.44
f	2	0.109947	0.054974	18.72	0.000	58.79
Hata	12	0.035248	0.002937			18.85
Toplam	17	0.187011				100

R² = %81.15.

TM'nin son adım olan doğrulama deneyleri kalite özelliklerini incelemek için yapılmaktadır [18],[19]. Doğrulama deneylerinde kullanılan model kontrol faktörleri tarafından oluşturulan toplam etki ile tanımlanmaktadır. Bu model, her faktörün etkilerinin toplamına eşittir. Optimum seviyeler hata kayıpları göz önüne alınarak değerlendirilir [18],[19]. Df₁ ve Df₂ için optimal tahminsel delaminasyon faktörleri Df_{1,opt} ve Df_{2,opt} Tablo 6a ve b'de verilen varyans analizlerinde etkili faktörlerin belirlenmesi (P<0.05) ve yine Tablo 5'ten Df₁ ve Df₂ için kontrol faktörlerinin optimum kombinasyonları Dt₂Vc₁f₁ ve Dt₂Vc₂f₁ dikkate alınarak sırasıyla Denklem 6 ve Denklem 7'de verilen eşitlikle hesaplanmıştır.

$$Df_{1,opt} = (Dt - T_{Df1}) + (Vc - T_{Df1}) + T_{Df1} = 1.017 \quad (6)$$

$$Df_{2,opt} = (Dt - T_{Df2}) + (f - T_{Df2}) + T_{Df2} = 1.33 \quad (7)$$

Doğrulama deneyleri Df₁ ve Df₂ kalite karakteristiklerini belirlemek için güven aralıkları CI_Df₁ ve CI_Df₂ Denklem 3 ve Denklem 4 yardımı ile hesaplanmıştır. Denklem 3 ve Denklem 4'te sayısal değerler yerine konulduğunda CI_Df₁=0.012 ve CI_Df₂=0.083 olarak hesaplanmıştır. %95 güven seviyesinde T₁ ile delmede Df₁ delaminasyon faktörü için doğrulama deneylerinin 1.017±0.012 ya da 1.005-1.029 aralığında olması beklenmiştir. Kontrol faktörlerinin Dt₂Vc₁f₁ şeklinde belirlenen optimum seviyelerinin Tablo 3'teki 10'nolu deneyin parametre seviyeleri ile aynı olduğu görülmektedir. 10'nolu deneyin yapılmasıyla elde edilmiş delaminasyon faktörü Df₁=1.004 olup bu çalışmada yapılmış tüm deneyler içerisinde elde edilmiş en düşük Df₁ değeridir. TM ile bu minimum delaminasyon faktörü değeri Df₁=1.012 olarak hesaplanmıştır (Tablo 7). Kontrol faktörlerinin optimum seviyesinde elde edilmiş bu değer güven aralığının hesaba katılmasıyla elde edilen üst sınır ve alt sınır delaminasyon faktörü değerleri içerisinde kalmaktadır. Bu nedenle, %95 güven seviyesinde TM kullanılarak Df₁ için sistem optimizasyonu sağlanmıştır [18]. KLK malzemenin seçilen kesme şartları aralığında T₁ takımla delinmesinde genel olarak 1.036 mm ortalama değerinde delaminasyon faktörü değerleri elde edilebilmektedir. Ancak, bu çalışmada tespit edilen optimal kontrol faktörü seviyeleri T₁ takımla delmede Df₁=1.012 delaminasyon faktörü değerleri elde edilerek delaminasyon faktörü azaltılarak delaminasyon az da olsa (yaklaşık %2) iyileştirilmiştir.

Aynı şekilde, %95 güven seviyesinde T₂ ile delmede Df₂ delaminasyon faktörü için doğrulama deneylerinin 1.33±0.083 ya da 1.247-1.413 aralığında olması beklenmiştir. Kontrol faktörlerinin Dt₂Vc₁f₁ şeklinde belirlenen optimum seviyelerinin Tablo 3'teki 10'nolu deneyin parametre seviyeleri ile aynı olduğu görülmektedir. 10'nolu deneyin yapılmasıyla elde edilmiş delaminasyon faktörü Df₂=1.319 olup bu çalışmada yapılmış tüm deneyler içerisinde elde edilmiş en düşük Df₂ değeridir. TM ile bu minimum delaminasyon faktörü değeri Df₂=1.314 olarak hesaplanmıştır (Tablo 7). Kontrol faktörlerinin optimum seviyesinde elde edilmiş bu değer güven aralığının hesaba katılmasıyla elde edilen üst sınır ve alt sınır delaminasyon faktörü değerleri içerisinde (1.247<Df_{2,opt}<1.413) kalmaktadır. KLK malzemenin seçilen kesme şartları aralığında T₂ takımla delinmesinde genel olarak 1.33 ortalama değerinde delaminasyon faktörü değerleri elde edilebilmektedir. Ancak, bu çalışmada tespit edilen optimal kontrol faktörü seviyeleri T₁ takımla delmede Df₁=1.314 delaminasyon faktörü değerleri

elde edilerek delaminasyon faktörü azaltılarak delaminasyon az da olsa (yaklaşık %3) iyileştirilmiştir (Tablo 7).

Tablo 7: Df₁ ve Df₂ için doğrulama deneylerinin sonuçları.

Doğrulama Deneyi	Optimum Df ₁		
	Deneysel	Tahminsel	Fark
Seviye (10'nolu deney)	Dt ₂ Vc ₁ f ₁	Dt ₂ Vc ₁ f ₁	-
Df	1.004	1.012	0.008
Df için S/N oranı (dB)	-0.04	-0.10	0.06
Doğrulama Deneyi	Optimum Df ₂		
	Deneysel	Tahminsel	Fark
Seviye (10'nolu deney)	Dt ₂ Vc ₁ f ₁	Dt ₂ Vc ₁ f ₁	-
Df	1.319	1.314	0.005
Df için S/N oranı (dB)	-2.40	-2.39	0.01

3.3 Df₁ ve Df₂ için geliştirilmiş matematiksel modeller

KLK kompozitin T₁ takımlar ile delinmesinde Df₁'i ve T₂ takımlar ile delinmesinde Df₂'yi tahmin etmek için Linear Regresyon Analizi ile geliştirilen ve kontrol faktörlerinin ana etkilerini ve etkileşimlerinin etkilerini içeren denklemler sırasıyla 8 ve 9'nolu denklemlerde sunulmuştur. Denklemler her bir kontrol faktörünün seviyelerini gösteren kodlanmış değerlere (1, 2 ve 3) göre geliştirilmiştir. Kontrol faktörlerinin farklı seviyelerinde tahminsel Df₁ ve Df₂ değerleri elde etmek için denklemlerde Dt, Vc ve f yerine kontrol faktörlerinin seviyelerini gösteren 1, 2 ya da 3 değerleri konulmalıdır. Geliştirilen her iki denklemde de Dt'nin quadratik etkisi diğer değişkenlerle yüksek oranda ilişkili bulunduğundan denklemlerden kaldırılmıştır.

$$Df_1 = 1.08 - 0.0403Dt - 0.0442Vc + 0.00722f + 0.0137Dt * Vc - 0.00063Dt * f - 0.00111Vc * f + 0.0104Vc^2 + 0.00030f^2 \quad (8)$$

$$Df_2 = 1.41 - 0.133Dt - 0.044Vc + 0.144f + 0.0458Dt * Vc - 0.0238Dt * f - 0.0154Vc * f + 0.0071Vc^2 + 0.0046f^2 \quad (9)$$

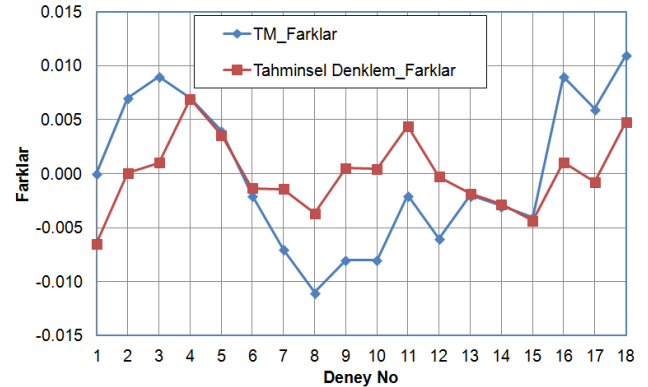
KLK malzemenin T₁ takımlar ile delinmesinde Df₁'i ve T₂ takımlar ile delinmesinde Df₂'yi tahmin etmek için geliştirilen denklemlerin korelasyon katsayısı sırasıyla; R²=0.962 ve R²=0.864 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler; %95 güven aralığında tüm tepki değerlerinin belirlenmesinde geliştirilen denklemlerin yeterli olabileceğini göstermektedir.

KLK malzemenin T₁ takımlarla delinmesinde deneysel Df₁ değerleri ile geliştirilen denklemlerle elde edilen Df₁ Reg değerlerinin karşılaştırılması Tablo 3'te sunulmuştur. Tablo 3'ten; T₁ takım için deneysel delaminasyon faktörü (Df₁) sonuçlarıyla TM tahminsel sonuçları arasında farkların az olduğu ve hata oranının %0.56 olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, deneysel delaminasyon faktörü (Df₁) sonuçlarıyla tahminsel denklem sonuçları arasındaki farklar hata ortalaması olarak %0.25 oranında hesaplanmıştır. Geliştirilen denklemle elde edilen tahminsel sonuçların deneysel sonuçlara yakın çıkarak hata oranının %1'den daha düşük hesaplanması geliştirilen denklemin tahmin yeteneğinin yüksek olduğunu ve delaminasyon faktörünün %95 güven seviyesinin üzerinde tahmin edilebildiğini göstermektedir. Tablo 3'teki her iki yöntem (Taguchi metodu ve tahminsel

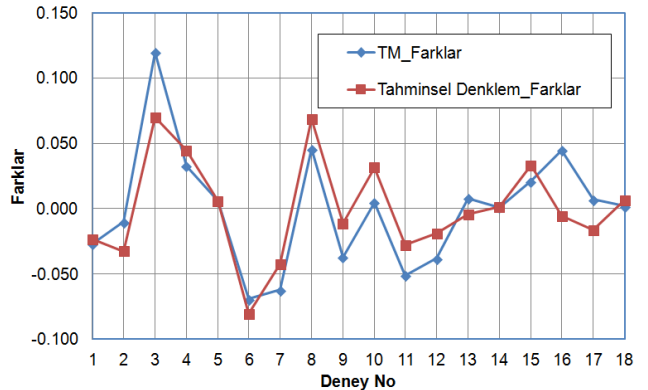
denklem) için hesaplanan farkların grafiksel olarak karşılaştırılması

Şekil 7'a da sunulmuştur. Bu şekilden de görüleceği üzere; her iki yöntemle elde edilen farklar (deneysel değerler-TM değerleri; deneysel değerler -tahminsel denklem değerleri) arasındaki yaklaşık -0.010 ile +0.010 arasında değişmektedir.

Yine aynı tabloda, T₂ takımla delinmiş deliklerde ölçülen deneysel yüzey pürüzlülüğü (Df₂) sonuçlarıyla TM tahminsel sonuçları arasında farkların fazla olduğu ve hata oranının %2.17 olduğu görülmektedir. Aynı şekilde, deneysel yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarıyla tahminsel denklem sonuçları arasındaki fark da hata oranı olarak %1.94 olarak hesaplanmıştır. T₂ takımlarla KLK malzemenin delinmesinde elde edilecek delaminasyon faktörünü tahmin etmek için geliştirilen tahminsel denklemlerin kullanılmasıyla %3'ün altında hata oranlarıyla daha hassas tahminsel sonuçların elde edilebileceği anlaşılmaktadır. T₂ takımla delme için Taguchi metodu ve tahminsel denklemle hesaplanan tahminsel yüzey pürüzlülük değerleri arasındaki farkların grafiksel olarak karşılaştırılması ise Şekil 7b'de gösterilmiştir. Bu şekilde de görüleceği her iki yöntemle elde edilen farklar yaklaşık -0.08 mm ile +0.125 arasında değişmektedir. Dolayısıyla, tahminsel denklemle elde edilen tahminsel delaminasyon faktörü değerlerinin deneysel delaminasyon faktörü değerlerine daha yakın olduğu ve sapmaların daha az olduğu söylenebilir.



(a): T₁ takımlarla KLK malzemenin delinmesi.



(b): T₂ takımlarla KLK malzemenin delinmesi.

Şekil 7: Deneysel delaminasyon faktörü sonuçları ile TM ve geliştirilen denklemlerin tahmin tahminsel sonuçları arasındaki farkların karşılaştırılması.

4 Sonuçlar

Helisel matkap ile ön delik delinmiş kompakt laminat kompozit malzemelerin T₁ ve T₂ tungsten karbür parmak freze

takımlarla delinmesinde delme parametrelerinin delaminasyon faktörü üzerinde etkilerinin araştırıldığı bu deneysel çalışmada şu sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Tungsten karbür takımlarla delmede delik girişlerinde işlemin kalitesini yansıtan soyulma şeklinde anlamlı delaminasyon oluşmazken delik çıkışında kaliteyi etkileyecek anlamlı delaminasyonlar oluşmaktadır,
2. T₁ takımlarla kademeli delik delme işleminde delik çıkış yüzeyindeki maksimum deforme olmuş çap (Ortalama D_{max}=13.080 mm) ve delaminasyon faktörü (Df=1.030) T₂ takımlardan daha düşük elde edilmiştir,
3. KLK malzemeyi T₂ takımlarla delmede maksimum deforme olmuş çap T₁ takımlarla göre %42 oranında daha büyük çıkmıştır. Aşınmış takım kullanmanın delaminasyon oluşumu üzerinde anlamlı etkisi tespit edilmiştir,
4. T₁ takımlarla delmede delaminasyon üzerinde en etkili parametreler sırasıyla kesme hızı, ilerleme miktarı ve delme tipi olarak belirlenmiş iken T₂ takımlarla delmede ilerleme miktarı, delme tipi ve kesme hızı şeklinde olmuştur,
5. Düz parmak frezeleme takımları ile delik büyütmede minimum değerlerde deforme olmuş delik çıkış yüzeyi elde etmek için kademeli delik delme operasyonu, düşük kesme hızı ve ilerleme miktarı tercih edilmelidir,
6. KLK malzemenin T₁ takımlarla ile delinmesinde Df₁'i ve T₂ takımlarla ile delinmesinde Df₂'yi tahmin etmek için geliştirilen tahminsel denklemlerin korelasyon katsayıları sırasıyla R²=0.962 ve R²=0.864 olarak hesaplanmıştır. Korelasyon katsayıların yüksek çıkması geliştirilen denklemlerin güvenilirliğini göstermektedir.

5 Kaynaklar

- [1] Şahin Y. *İmal Usulleri*. Ankara, Türkiye, Gazi Kitabevi, 2003.
- [2] Davim JP, Reis P. "Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave-experimental and statistical study". *Materials & Design*, 24(5), 315-324, 2003.
- [3] Kılıçkap E. "CETP Kompozitlerin delinmesinde oluşan deformasyona delme parametrelerinin etkisinin incelenmesi". 2. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir, Türkiye, 11-12 Kasım 2010.
- [4] Koboević N, Jurjević M, Koboević Ž, "Influence of cutting parameters on thrust force, drilling torque and delamination during drilling of carbon fibre reinforced composites". *Tehnicksi Vjesnik*, 19(2), 391-398, 2012.
- [5] Valarmathi TN, Palanikumar K, Sekar S. "Parametric analysis on delamination in drilling of wood composite panels". *Indian Journal of Science and Technology*, 6(4), 4347-4356, 2013.
- [6] Colt-Stoica M, Anania D, Mohora C, Stoica D. "Defects in composite material caused by drilling in manufacturing process". *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*, 11(1-2), 27-29, 2011.
- [7] Herbert MA, Shetty D, Shetty R, Shivamurthy B. "Effect of process parameters on delamination, thrust force and torque in drilling of carbon fiber epoxy composite". *Research Journal of Recent Sciences*, 2(8), 47-51, 2013.
- [8] Sardiñas RQ, Reis P, Davim JP. "Multi-Objective optimization of cutting parameters for drilling laminate composite materials by using genetic algorithms". *Composites Science and Technology*, 66(15), 3083-3088, 2006.
- [9] Jindal A, Singla VK. "Experimental investigation of process parameters in drilling operation using different software technique". *An International Journal of Engineering Sciences*, 1, 135-154, 2011.
- [10] Ramesh B, Elayaperumal A, Balaji DA, Rakesh N. "Optimization of ovality on drilling glass fiber reinforced plastic composites with coated tungsten carbide tool". *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(7), 2801-2809, 2013.
- [11] Madhavan S, Narayanan TL, Anant KA, Sathappan. "Influence of thrust, torque responsible for delamination in drilling of glass fabric-epoxy/rigid polyurethane foam sandwich hybrid composite". *AMAE International Journal on Manufacturing and Material Science*, 1(1), 16-20, 2011.
- [12] Bayraktar Ş, Turgut Y. "Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin delinmesi üzerine bir araştırma". 3. *Ulusal Talahş İmalat Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 04-05 Ekim 2012.
- [13] Durao LM, Magalhaes AG, Marque AT, Tavares JMRS. "Damage assessment of drilled hybrid composite laminates". *13th European Conference on Composite Materials*, Stockholm, Sweden, 2-5 June 2008.
- [14] Arul S, Vijayaraghavan L, Malhotra SK, Krishnamurthy R. "The effect of vibratory drilling on hole quality in polymeric composites". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(3-4), 252-259, 2006.
- [15] Davim JP, Reis P, António CC. "Drilling fiber reinforced plastics (FRPs) manufactured by hand lay-up: Influence of matrix (Viapal VUP 9731 and ATLAC 382- 05)". *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156, 1828-1833, 2004.
- [16] ASD Laminat. "Compact Laminat Teknik Değerler". <http://www.asdlaminat.com/dosya/tds/compact-laminat-teknik-degerler-tr.pdf> (01.06.2015).
- [17] Royce AYR. "Industrial Routing". <https://drive.google.com/a/comu.edu.tr/file/d/0B9ho0dpYVTFONG9hdzjYelVNNIE/view> (01.06.2015).
- [18] Montgomery DC. *Taguchi's Contributions to Experimental Design and Quality Engineering, Design and Analysis of Experiment*. 3rd ed. Canada, USA, John Wiley and Sons, 1991.
- [19] Roy RK. *A Primer on the Taguchi Method. Competitive Manufacturing Series*. 1st ed. New York, USA, Van Nostrand Reinhold, 1990.