

KOMPAKT LAMİNAT PANELLERİN DELİNMESİNDE DELİK GİRİŞİ VE ÇIKIŞI DELAMİNASYON FAKTÖRÜ İÇİN DELME PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Ali Riza MOTORCU¹ Tuncay BİLGE²

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü,
17100, Çanakkale, TÜRKİYE

² Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale Teknik Bilimler M.Y.O., Malzeme ve
Malzeme İşleme Teknolojileri Bölümü, 17020, Çanakkale, TÜRKİYE
armotorcu@comu.edu.tr, tuncaybilge@comu.edu.tr

Özet-Kompakt laminat paneller, çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar ve yapısal bileşenlerde ağırlıklı olarak tercih edilmektedirler. Delme, kompakt laminat panellerin montajı için önemli işleme operasyonlardan biridir. Ancak, laminat panellerin delinmesi sırasında deliğin çevresindeki malzemenin mekanik özelliklerini ciddi şekilde tehlikeye sokan, istenmeyen bir hasar türü olan delaminasyon oluşur ve delaminasyon faktörü oluşan bu delaminasyonun derecesini belirlemek için kullanılır. Bu çalışmanın amacı, kompakt laminat panellerin HSS helisel matkaplarla boydan boya delinmesinde delik giriş ve çıkışındaki delaminasyonu minimize etmek için delme parametrelerinin optimal seviyelerini belirlemektir. Bu amaçla, Taguchi L18 ortogonal dizi deney tasarımı referans alınarak, kompakt laminat panel üzerinde farklı kesme hızları, ilerleme miktarları ve delme tiplerinde delme deneyleri yapılmıştır. Delik girişi delaminasyon faktörü (Dfg) ve delik çıkışı delaminasyon faktörünün (Dfç) minimizasyonu için delme parametrelerinin çoklu performans optimizasyonu Gri İlişkisel Analizi (GİA) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Kompakt laminat panellerin HSS helisel matkaplarla delinmesinde, minimum delik giriş ve çıkış delaminasyon faktörü için delme parametrelerinin optimal seviyeleri; 178 m/dak kesme hızı, 0.156 mm/dev ilerleme miktarı ve kademeli delik delme işlemi olarak belirlenmiştir. Delik giriş ve çıkışındaki delaminasyonlar üzerinde en etkili delme parametreleri delme tipi ve kesme hızı olmuştur.

Anahtar Kelimeler- Kompakt laminat panel, Delik delme, HSS matkap, Delaminasyon faktörü, Gri İlişkisel Analiz

OPTIMIZATION OF DRILLING PARAMETERS FOR HOLE INPUT AND EXIT DELAMINATION FACTOR IN THE DRILLING OF COMPACT LAMINATE PANELS

Abstract- Compact laminate panels are widely used in various applications and they more preferred in structural components. Drilling is one of the important machining operations for assemble of compact laminate panels. However, delamination, which is an undesirable type of damage that seriously jeopardizes the mechanical properties of the material around the hole during drilling of the laminate panels, occurs and, the delamination factor is used to determine the degree of this delamination. The aim of this study was to determine the optimal levels of drilling parameters to minimize the delamination of the input and exit of the hole when drilling compact laminate panels with high speed steel (HSS) helical drills. For this purpose, drilling experiments on the compact laminate panel were carried out with reference to the Taguchi L18 orthogonal array experimental design at the different cutting speeds, feed rates and drilling types. The multiple performance optimization of the drilling parameters for the minimization of hole input delamination factor and the hole exit delamination factor was performed by the Gray Relation Analysis (GIA) method. The optimal levels of drilling parameters for the minimum hole input (Dfg) and hole exit (Dfç) delamination factor in the drilling of compact laminate panels with HSS helical drills were determined as 178 m/min cutting speed, 0.156 mm/rev feed rate and step hole drilling operation. The most effective drilling parameters on the hole input and hole exit delaminations were the drilling type and the cutting speed.

Key Words- Compact laminate panel, Drilling, HSS drill, Delamination factor, Grey Relation Analysis

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozit laminatlar, çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır ve yapısal bileşenlerde ağırlıklı olarak tercih edilmektedir. Delme, kompozit bileşenlerin imalatında önemli operasyonlardan biridir, montaj sırasında genellikle son işlemdir. Deleminasyon kompozit laminatların delinmesi sırasında oluşmaması istenen bir hasar türü olup deliğin çevresindeki malzemenin mekanik özelliklerini ciddi şekilde tehlikeye sokmaktadır. Matkap kompozit malzemeye girdiğinde ve kompozit malzemedden çıkarken malzemeye zarar vermektedir. Kompozit laminatların delinmesinde çapak ve delaminasyon gibi hatalar daima ciddi problemlerdir ve oluşmaması istenir. Delaminasyonun başlıca nedeni matkap ucunun uyguladığı itme kuvvetidir. Laminat kompozitlerin delme işleminde, itme kuvveti eşik değerini aştığında, özellikle matkap ucunun kritik giriş ve çıkış konumlarında delaminasyon oluşur. Delik etrafında oluşan delaminasyonu belirlemek için delaminasyon faktörü kullanılır. Delaminasyon faktörü; (Df) delme sırasında hasar bölgesinde oluşan maksimum hasar çapının (D_{max}) matkap çapına oranıdır. Delaminasyon faktörü, delik delme işlemlerinde oluşan hasarın derecesini belirleyen ve işleme kalitesini yansıtan önemli parametrelerden birisidir. Tabakalı tipteki lamine edilmiş kompozitlerin özellikle de kompakt laminatların kullanım alanları ve oranları arttıkça delme operasyonlarında oluşan hasarların azaltılması ve önlenmesi için yapılan bilimsel araştırmalar önemini koruyacaktır. Capello iş parçasının altına yerleştirilen bir destek ile delik açma veya delik açma mekanizmalarının farklılıklarını analiz etmiştir. Delaminasyon

mekanizmasına karşı koyan yeni bir cihaz tasarlanmış, prototipi üretilmiş ve etkinliği doğrulanmıştır [1]. Xu vd. T800S/250F CFRP laminatın CVD kaplı helisel matkap ve CVD kaplı kama tip matkaplarla işlenebilirliğini delme kuvvetleri, çapak kusurları, delik duvar yüzeyi morfolojisi ve delaminasyon hasarı açısından değerlendirilmişlerdir. Delme kusurlarını en aza indirmek için yüksek kesme hızında delmenin önemine vurgu yapılmıştır [2]. Shyha vd. tarafından yapılan çalışmada karbon elyaf takviyeli plastik (CFRP) laminatın tungsten karbür (WC) kademeli matkaplarla delinmesinde, malzeme ve delme parametrelerinin delik sayısı, itme kuvveti, tork, giriş ve çıkış delaminasyonu ve delik çapı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Delik giriş ve çıkışında ölçülen delaminasyon faktörü sırasıyla, yaklaşık olarak 1.2-1.8 ve 1.0-2.1 arasında değişmiştir [3]. Stone ve Krishnamurthy tarafından yapılan çalışmada grafit-epoksi laminatın delinmesinde ortaya çıkan delaminasyonu en aza indirmek için bir itme kuvveti denetleyicisi geliştirilmiştir. İtme kuvvetinin denetlenmesi yaklaşımının geçerliliğini ve tasarımın sağlamlığını doğrulayan deneysel sonuçlar çalışmada sunulmuştur [4]. Rubio vd. tarafından yapılan çalışmada, cam elyaf takviyeli plastikler (GFRP) için yüksek hızlarda işleme (HSM) yapılmıştır. Hasar seviyesinin belirlenmesi için delaminasyon değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar GFRP'nin az hasarlarla delinmesi için HSM'nin uygun olduğunu göstermiştir [5]. Chen, CFRP kompozit laminatların delinmesinde delik işleme yöntemlerinin, takım geometrisinin ve delme parametrelerinin doğru seçilmesiyle delaminasyonsuz deliklerin elde edilebileceğine vurgu yapmıştır [6]. Hocheng ve Tsao tarafından yapılan deneysel araştırma, delaminasyon başlangıcındaki kritik itme kuvvetinin teorik tahminlerini içermekte ve farklı matkap ucu değerlerinin etkilerini karşılaştırmaktadır. Çalışmada kullanılan özel matkapların avantajı matematiksel ve deneysel olarak gösterilmiş ve delaminasyona neden olmadan izin verilen ilerleme miktarı da artırılmıştır [7]. Aynı araştırmacılar tarafından yapılan ve birbirini tamamlayan iki farklı çalışmada, CFRP laminatın helisel matkap, şamdan (mum çubuk) matkabı ve testere matkabı ile delinmesinde delaminasyon faktörü tahmin edilmiş ve değerlendirilmiştir. Delaminasyon başlangıcındaki kritik itme kuvveti tahmin edilmiş ve helisel matkap ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır İlerleme miktarının ve matkap çapının genel performansa en fazla katkıda bulunduğu bu çalışmalarda tespit edilmiştir [8, 9]. Li vd. laminat kompozit malzemelerin delinmesinde, delik giriş bölgesi, orta bölgeler, karşıt bölgeler ve çıkış bölgesi için optimizasyon deneyleri gerçekleştirmişler ve her bir bölge için optimum parametreler elde etmişlerdir. Çalışmada önerilen yöntem kullanılarak yapılan karşılaştırmalı deneyler, matkap sapması (bükülme, eğilme), mikro delik çapı hatası ve çapak yüksekliğinin sıradan delme işlemlerine kıyasla azaltılabileceğini ve böylece işleme hassasiyetlerinin iyileştirilebileceğini göstermiştir [10]. Ho-Cheng ve Dharan delme sırasında oluşan delaminasyonu analiz etmişlerdir. Analiz, delinmiş delik derinliğinin bir fonksiyonu olarak optimal bir itme kuvvetini öngörmektedir. Cam elyaf-epoksi ve hibrid kompozitler gibi diğer malzemeler için de çeşitli delaminasyon derecelerinin tahmin edebilmesi bu modelin avantajlı olduğu belirtilmiştir [11]. Jain ve Yang delaminasyon çatlağının yayılmaya başladığı kritik itme kuvvetini ve kritik ilerleme miktarını tahmin etmek için bir analitik model oluşturmuşlardır. Delaminasyonu engellemek için takım geometrisini değiştirme ihtiyacı çalışmada vurgulanmıştır. Uç ağız genişliği, itme kuvvetine ve dolayısıyla delaminasyona katkıda bulunan önemli bir faktör olarak tanımlanmıştır [12]. Tek yönlü laminatlar için elde edilen kritik itme kuvveti ve ilerleme miktarlarının çok yönlü laminatlar için de kullanılabileceği Jain ve Yang tarafından yapılan çalışmada belirtilmiştir. Bir elmas emdirilmiş boru biçimli matkap ucu tasarlanmış ve test edilmiştir. Bu takım, standart helisel matkaplara kıyasla çok daha küçük itme kuvveti ve çok daha iyi delik kalitesi sağlamıştır [13]. Durão vd. tarafından yapılan çalışma, kompozit laminatların farklı matkap uç geometrileri ve ilerleme miktarı ile delinmesi sırasında itme kuvvetinin görüntülenmesi, yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyonun değerlendirmesi ile ilgilidir. Çalışmada, matkap ucu geometrisi veya ilerleme miktarının uygun kombinasyonunun seçilmesiyle delaminasyon hasarının azaltacağı belirtilmiştir [14]. Davim vd. dijital analiz kullanarak delaminasyon faktörünü ölçmek için yeni bir teknik sunmuşlardır. Deneysel sonuçlar, dijital analizin, CFRP'lerin delinmesinden sonra oluşan hasarları tahmin etmek için uygun olduğunu göstermiştir [15]. Singh ve Bratnagar tarafından yapılan çalışma, delme sonucu

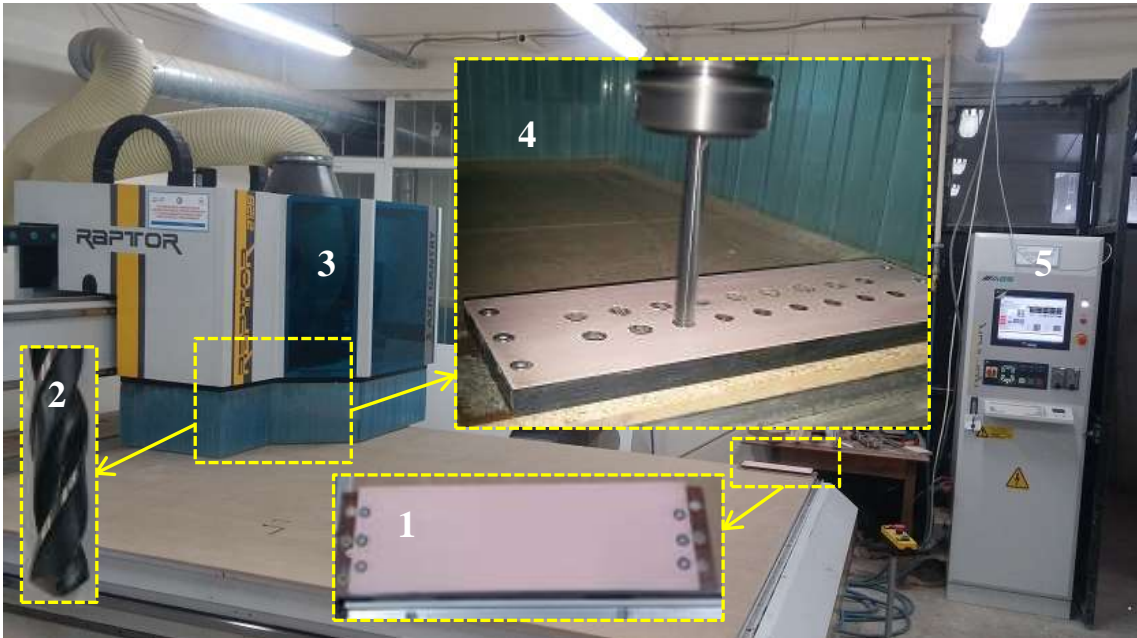
oluşan hasar ile delme parametreleri arasında ilişkiyi araştırma üzerinedir. Hasarı etkileyen önemli değişkenler olarak ilerleme miktarı ve kesme hızı tespit edilmiştir [16]. Jung vd. tarafından yapılan çalışmada bir antisimetrik açılı tabaka laminatın delinmesinde itme kuvveti için yeni bir formülasyon geliştirilerek itme kuvveti analitik olarak delme bölgesinin kıvrılma, bükme ve orta düzlemde uzatılması dikkate alınarak türetilmiştir [17]. Marquez vd. delme sırasındaki itme kuvveti ve delaminasyonu değerlendirmek üzere üç ticari ve bir özel kademeli matkap (prototip) olmak üzere dört farklı matkabı karşılaştırmışlardır. Prototip matkap maksimum itme kuvveti ve delaminasyonun azalması açısından mükemmel sonuçlar vermiştir [18]. Hocheng ve Tsao, kompozit malzemenin delaminasyonsuz nasıl delinebileceğini araştırılmıştır. Analitik yaklaşımlar, özel matkap uçlarının kullanımı, pilot deliği, yedek plaka kullanımı ve geleneksel olmayan işleme yöntemlerinin kompozit malzemelerin delinmesinde kullanılması gibi temel hususlar araştırmacılar tarafından değerlendirilmiştir [19]. Tsao ve Hocheng tarafından yapılan diğer bir çalışmada, kompozit malzemelerin testere matkabı ve karot matkabı (delik genişletme matkabı) kullanılarak delinmesinde yedekleme plakasının delaminasyona olan etkisi araştırılmıştır. Yedekleme plakası kullanılarak delaminasyon başlangıcındaki eşik itme kuvvetinin artmasıyla delaminasyonun daha az indükleneyeceği belirtilmiştir [20]. Tsao vd. tarafından yapılan çalışmanın amacı, bir delik genişletme (karot)-testere tipi matkap kullanarak delme ile oluşan delaminasyonun karakterize edilmesi ve eşdeğer delaminasyon faktörünü yeni bir yaklaşımla sunmaktır. Deneysel sonuçlar, CFRP'nin delinmesinde delik çıkışındaki delaminasyonun karakterize edilmesi için eşdeğer delaminasyon faktörünün uygun olduğunu göstermiştir [21]. Tsao tarafından yapılan çalışmada, kompozit laminatların delinmesinde delaminasyon başlangıcı pozisyonunun belirlenmesi için doğrusal elastik kırılma mekaniğine dayalı analitik bir yaklaşım sunulmuştur. Çalışmada geliştirilen analitik yöntemin, kompozit laminatların delaminasyonsuz bir şekilde delinmesine sağlayacağı belirtilmiştir [22]. Tsao ve Hocheng tarafından yapılan çalışmada, CFRP malzemelerin helisel matkap ile delinmesinde matkap aşınmasının neden olduğu delaminasyonun kapsamlı bir analizi sunulmuştur. Artan aşınma oranı ile kritik itme kuvvetinin daha da arttığı, itme kuvvetinin daha büyük oranda artmasından dolayı delaminasyonun daha zor hale geldiği araştırmanın sonuçlarında belirtilmektedir [23]. Bilge vd. kompakt laminat kompozit malzemeyi yeni ve aşınmamış tungsten karbür matkaplarla delerek delme parametrelerinin delik çıkış bölgesindeki delaminasyona etkilerini incelemiştir. KLK malzemeyi aşınmış takımlarla delmede delaminasyon daha büyük çıkmıştır [24]. Bilge vd. bu araştırmanın devamı olarak bir diğer çalışmalarında ise aynı malzemenin yeni ve aşınmış HSS matkaplarla delinmesinde delme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonunda yüzey pürüzlülüğü açısından yeni takımlar aşınmış takımlara göre %75 daha iyi performans sergilemiştir. Çalışmada ayrıca, yüzey pürüzlülüğünün tahmini için tahminsel denklemler geliştirilmiştir [25]. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde özellikle CFRP [2, 3, 6-9, 15] ve GFRP [5,11] kompozitlerin delinebilirliği üzerine yoğunlaşıldığı görülmektedir. Yapılan çalışmalarda işlenebilirlik ve delik kalitesi karakteristikleri olarak; delme/itme kuvveti [2-4, 11-14, 17, 18], çapak yüksekliği/oluşumu [2, 10], yüzey morfolojisi/pürüzlülüğü [2, 14, 25], delaminasyon/delaminasyon faktörü [2-7, 11-18, 20-24], tork [3] ve delik çapı hatası/ölçüsü [3-10] seçilmiştir. Kompakt laminat kompozitlerin delinebilirliğinin değerlendirilmesi üzerine yapılan çalışmalar oldukça az sayıdadır [23, 24]. Yine, yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda deneysel tasarım (özellikle Taguchi metodu) ve modelleme ile optimizasyon yöntemlerinin tercih edildiği görülmüştür.

Bu çalışmada, Taguchi Metodu ve Gri İlişkisel Analiz Yöntemi birlikte kullanılarak kompakt laminat kompozit panallerin HSS matkaplarla delinmesinde hem delik girişi ve hem de delik çıkışındaki delaminasyon oluşumlarının minimizasyonu için delme parametreleri optimize edilmiştir. Bu deneysel çalışma sonucunda elde edilen bulguların ve sonuçların ilgili malzeme ve kesici takım veri tabanına, endüstriyel uygulayıcılara ve bilimsel çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. YÖNTEM (METHOD)

2.1. İş Parçası, Kesici Takım ve Takım Tezgahı (Workpiece, Cutting Tool and, Machine Tool)

Delme deneylerinde, iş parçası malzemesi olarak bir tabakadan 300x100x12 mm boyutlarında kesilmiş, EN 438-2 standardı, CGS sınıfı, eğilme dayanımı min 80 Mpa, eğilme modülü 9000 Mpa, çekme dayanımı 60 MPa olan standart kompakt laminat kompozit numuneler kullanılmıştır. Bu malzeme üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri sebebiyle, inşaat yapı donatı, mobilya ve dekorasyon alanlarında geniş uygulama alanı bulmaktadır [24, 25]. Delme deneylerinde, çapı 12 mm, TS ISO 235, uç açısı 118°, sağ kesme yönlü, HSS helisel matkaplar kullanılmıştır. Bu kesici takımlar düşük alaşımlı çelikler, alüminyum ve alüminyum alaşımları ile laminat, kaplamalı ağaç ve ağaç kompozit malzemelerin işlenmesinde üst ve alt yüzeylerin bitirme kalitesinin kritik olduğu işlemlerde tercih edilmektedir [24, 25]. İşlenebilirlik deneyleri motor gücü 9 kW, maksimum devir sayısı 24000 dev/dak olan 3 eksenli AES RAPTOR 2128 CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Delme deneyleri: 1-iş parçası, 2-kesici takım, 3-CNC dik işleme merkezi, 4-delik delme, 5-tezgah kontrol ünitesi. (Drilling experiments: 1-workpiece, 2-cutting tool, 3-CNC vertical machine, 4-drilling, 5-control unit of machine tool).

2.2. Delme Parametreleri, İşleme Deneyleri ve Delaminasyon Ölçümü (Drilling Parameters, Machining Experiments and, Measurement of Delamination)

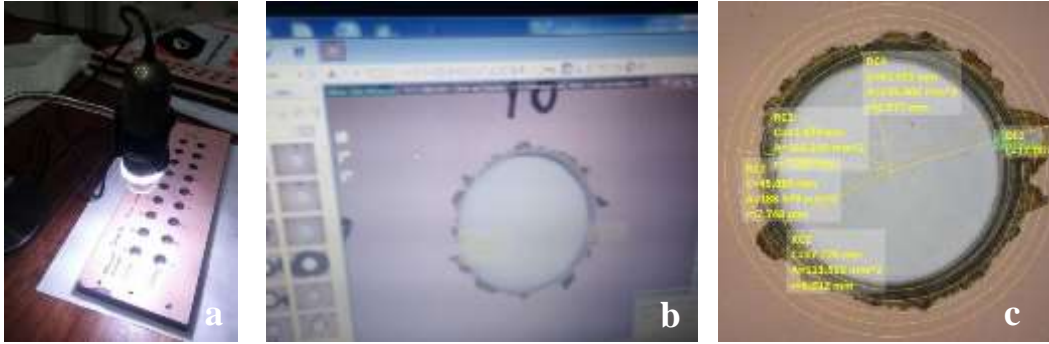
İş parçası üzerinde yapılan ön deneyler, kesici takım firmasının önerileri, kesici takım-takım tezgâhının performansları ve delik delme prosesleri göz önünde bulundurularak delme parametrelerinin Tablo 1'de verilen seviyeleri belirlenmiştir.

Tablo 1. Delme parametreleri ve seviyeleri.

Delme parametreleri	Birimi	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Delme Tipi, (Dt)	-	Doğrusal delik delme	Kademeli delik delme	-
Kesme Hızı, (Vc)	m/dak	178	250	350
İlerleme Miktarı, (f)	mm/dev	0.07	0.111	0.156

Deliklerin kontrol faktörlerinin farklı seviyelerinde delinmesi/işlenmesi için uygun bir CNC program yazılmıştır. Her deneye yeni (daha önceki deneylerde kullanılmamış) bir kesici takım ile başlanmış ve deneyler kuru kesme şartları altında yapılmıştır. Delme tipi (sürekli/doğrusal delme, kademeli delik delme/gagalama) delme parametrelerinden biri olarak seçilmiştir. Kademeli delik delme operasyonlarında takım dönerken bir miktar deler ve biriken talaşı atmak için emniyet mesafesine çıkar ve tekrar delmeye devam eder, böylelikle takım delik içerisindeki talaşı dışarı atar. Sürekli delmede ise takım iş parçası üst yüzeyinden güvenli bir mesafeden delik delmeye başlamış ve iş parçasının alt yüzeyinden 8 mm dışarıya çıkıncaya kadar delmeye devam edilerek delikler elde edilmiştir.

Delme operasyonları tamamlandıktan sonra delik giriş ve çıkışı delaminasyon ölçümleri bilgisayar bağlantılı Dino Lite Pro AM4000 1.3 Mgp. optik mikroskop ve Dino Capture 2.0 programı birlikte kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2a). Her deliğin giriş ve çıkış bölgesinden maksimum olduğu belirlenen 4 delaminasyon oluşum bölgesi belirlenerek ölçüm yapılmış ve delaminasyon faktörüne dönüştürülerek kaydedilmiştir. Delaminasyon faktörü ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak çözümlenelerde kullanılmıştır (Şekil 2.b ve c)



Şekil 2. Delaminasyon faktörünün hesaplanması için delaminasyon ölçümleri. a)Optik mikroskop, b)Görüntü işleme yazılımı ve c)Delaminasyon ölçümü (Delamination measurements for calculation of the delamination factor. a) Optical microscope, b) Image processing software, and c) Delamination measurement).

2.3.Taguchi Metodu İle Deneysel Tasarım-Gri İlişkisel Analiz İle Optimizasyon (Experimental Design via Taguchi Method-Optimization via Grey Relational Analysis)

Deneysel çalışma maliyetlerini azalttığından dolayı ve sistematik bir yaklaşım sunması nedeniyle KLL'nın delinmesinde delaminasyon faktörü üzerinde delme parametrelerinin etkilerini belirlemek amacıyla Taguchi Metodu kullanılmış ve ortogonal dizi olarak $L_{18} (2^1 \times 3^2)$ seçilmiştir [24]. KLL'nın delinmesinde delik girişi delaminasyon faktörü (Dfg) ve delik çıkışı delaminasyon faktörü (Dfç) değerlerinin en düşük olması istendiğinden bağımlı değişkenin kalite karakteristiği sinyal/gürültü (S/N) oranları dB cinsinden “Daha düşük daha iyi” yaklaşımına göre hesaplanmıştır [24, 26].

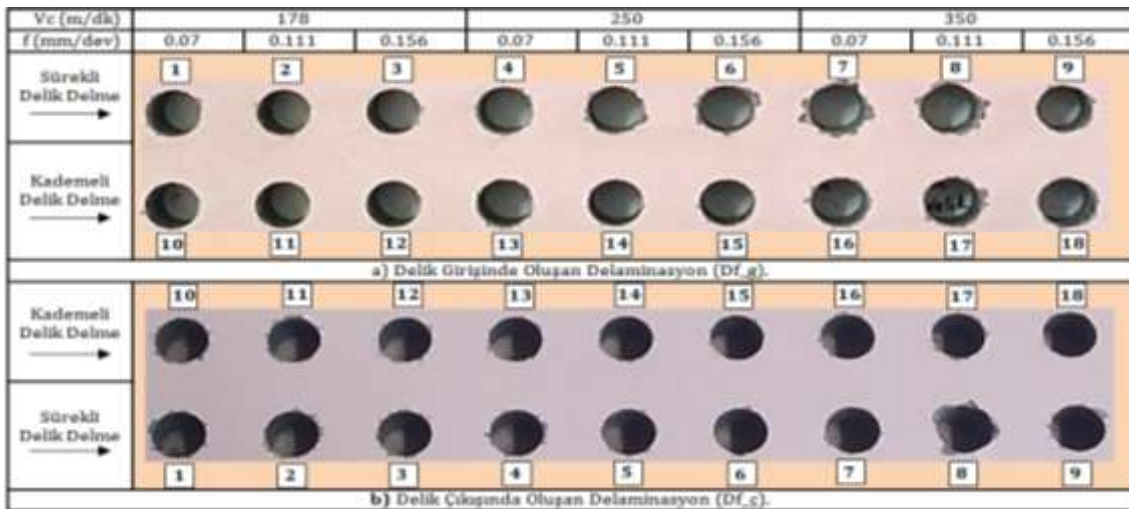
Gri İlişkisel Analiz (GİA) çok kriterli karar verme tekniklerinden biri olup, belirsizliğin söz konusu olduğu durumlarda farklı kriterleri dikkate alarak kararların sağlıklı bir şekilde verilmesinde kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemlerin aksine GİA'da daha az veri ile bir sistemin faktörleri arasındaki temel ilişkiler belirlenebilmektedir. GİA gri bir sistemdeki her bir faktör ile kıyas yapılan faktör serisi arasındaki ilişki derecesini belirlemeye yarayan bir yöntemdir. Faktörler arası etki derecesi “gri ilişkisel derece” olarak adlandırılır [27]. KLL'nın

HSS matkaplarla delinmesinde Dfg ve Dfç'nin minimize edilmesi için GİA'nın aşağıdaki adımları sırasıyla uygulanmıştır [26, 27]:

1. Deney sonuçlarına bağlı olarak sinyal/gürültü (S/N) oranları hesaplanmıştır. S/N oranının analizinde performans özellikleri; “daha düşük daha iyi”, “daha yüksek daha iyi” ve “nominal daha iyi” olmak üzere üç kategoriye ayrılır [26, 27]. Dfg ve Dfç'nin en düşük olması istendiğinden S/N oranları “daha düşük daha iyi” yaklaşımına göre hesaplanmıştır.
2. Aynı ölçü birimine sahip olan Dfg ve Dfç'nin arasında karşılaştırma yapabilmek için veriler ($0 \leq Z_i \leq 1$) daha küçük bir aralığa alınarak normalize edilmiştir.
3. Normalize edilen sonuçlar referans serisinden çıkarılarak katsayı matrisi için gerekli olan uzaklık matrisi elde edilmiştir [27]. Katsayı ξ ile gösterilir ve $0 < \xi < 1$ aralığında tanımlanır. Katsayı matrisi hesabı için $\xi = 0.5$ alınmıştır.
4. Katsayı matrisleri hesaplandıktan sonra son adım olarak Gri İlişkisel Derece (GİD) belirlenmiştir.
5. Gri ilişkisel derece sıralanmıştır. En yüksek GİD değerinin yer aldığı satır no/deney no en düşük Dfg ve Dfç değerlerinin elde edileceği/edildiği optimum delme parametreleri olarak tespit edilmiştir.
6. Gri ilişkisel derece varyans analiz kullanılarak deneysel sonuçlarının analizi yapılmıştır.
7. Kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri seçilmiştir.

3. BULGULAR (FINDINGS)

Tabakalı KLK malzemelerin ya da ağaç ürünleri içerikli kompozit malzemelerin delinmesinde en çok karşılaşılan delik hasarlarından birisi de delik giriş ve çıkışında oluşan delaminasyonlardır [15, 25]. Bu delaminasyonlar uygun kesici takım, uygun delme operasyonu ve delme parametreleri seçimi ile önlenebilir ya da azaltılabilir. KLK malzemenin farklı kesici takımlarla işlenebilirliği üzerine yapılan deneysel çalışmada, hem delik girişinde hem de delik çıkışında her kesme şartlarında delaminasyon oluşumu gözlemlendiğinden delaminasyonun azaltılması için optimum delme parametrelerinin belirlenmesi bu çalışmada amaçlanmıştır [6, 14, 25]. Yapılan deneylerde delik giriş ve çıkışlarında oluşan delaminasyonun görüntüleri Şekil 3'te sunulmuştur. Şekil 3'te; delme tipi farketmeksizin artan kesme hızı ile birlikte delaminasyon oluşumun da arttığı görülmektedir [2, 5]. KLK malzemelerin kullanıldığı yerler dikkate alındığında, bu deformasyonlar malzemenin bozunumu, deformasyonu, sızıntı, görüntü ve montaj problemleri gibi olumsuzlukları yaratacaktır [25].



Şekil 2. Delik girişleri ve çıkışlarında oluşan delaminasyonlar. (Delaminations formed in hole inputs and hole exits.)

KLK'nin HSS matkaplarla delinmesinde delik girişi ve çıkışında ölçülmüş maksimum delik çapı değerleri (Dmax) (4 ölçüm) ve Dfg ve Dfç değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. KLK malzemenin delinmesinde elde edilen Df değerleri Minitab 16.1 ve Excell 10.0' da çözümlenmiş, grafiklerin çiziminde ve delme parametreleri etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Tablo 2'den delik girişinde oluşan delaminasyonların daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. KLK malzemelere D=12.0 mm çapındaki matkap ile delik delmede delik girişi yüzeyinde kaplama katmanının soyulması şeklinde, 12.382-18.644 mm aralığında Dmax elde edilmiş iken delik çıkışı yüzeyinde aynı tipte 12.668-17.182 mm aralığında Dmax elde edilmiştir. Ortalama Dfg=1.14 (S/N oranı -1.13 dB) elde edilmiş iken ortalama Dfç=1.10 delaminasyon faktörü (S/N oranı -0.84 dB) elde edilmiştir. KLK malzemenin delinmesinde delik çıkışındaki delaminasyon oluşumu yaklaşık %4 oranında daha düşük çıkmıştır. Bu oran %5'ten düşük olduğu için KLK'nın delinmesinde hem delik girişinde hem de delik çıkışında yaklaşık aynı çaplarda ve aynı tipte (tabaka ayrılması şeklinde) delaminasyonun oluştuğunu söylemek mümkündür.

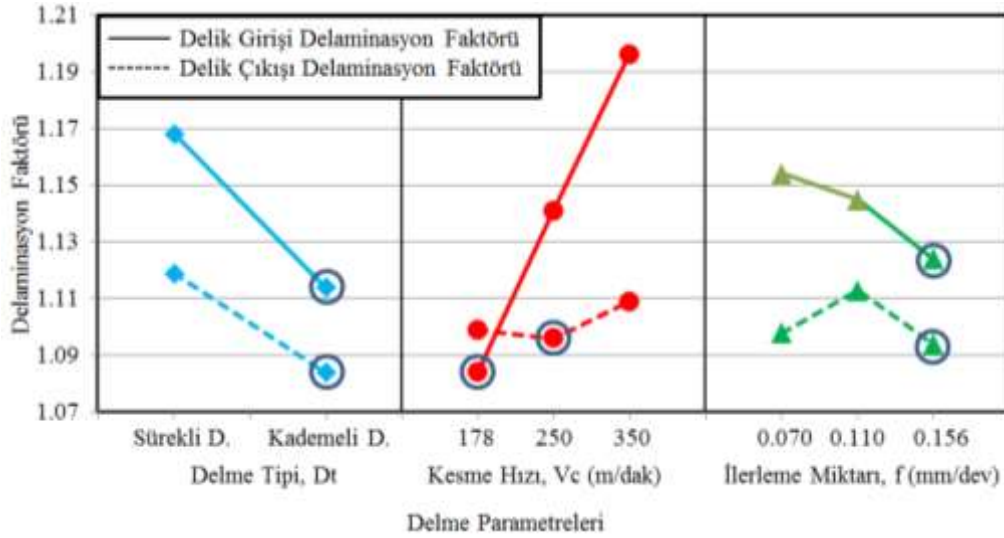
Tablo 2. L₁₈ ortogonal diziyeye göre deney tasarımı ve delaminasyon ölçüm sonuçları (Experimental design according to L₁₈ orthogonal array and delamination measurement results).

D.N.	Dt	Vc	f	Delik girişi yüzeyi						Delik çıkışı yüzeyi					
				Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Dfg	S/N	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Dfç	S/N
1	Sürekli D.	178	0.07	13.150	12.866	13.643	14.754	1.10	-0.84	12.526	13.087	13.576	14.562	1.09	-0.74
2	Sürekli D.	178	0.111	12.382	12.819	13.353	13.873	1.07	-0.59	12.567	12.999	13.991	14.680	1.10	-0.82
3	Sürekli D.	178	0.156	12.583	13.177	13.989	14.527	1.10	-0.86	12.598	13.934	13.468	14.480	1.11	-0.91
4	Sürekli D.	250	0.07	14.621	12.825	14.061	15.046	1.15	-1.24	13.150	13.782	14.434	15.006	1.15	-1.21
5	Sürekli D.	250	0.111	13.521	15.099	14.535	16.075	1.20	-1.58	12.547	12.969	13.487	14.133	1.08	-0.70
6	Sürekli D.	250	0.156	13.138	14.604	15.612	16.789	1.20	-1.61	12.620	13.058	13.566	14.028	1.09	-0.75
7	Sürekli D.	350	0.07	13.822	15.331	17.131	18.644	1.29	-2.18	12.892	13.228	13.627	14.218	1.10	-0.86
8	Sürekli D.	350	0.111	15.356	17.087	17.978	12.945	1.26	-2.01	12.954	14.391	16.363	17.182	1.21	-1.69
9	Sürekli D.	350	0.156	12.956	13.494	14.280	14.710	1.13	-1.07	12.803	13.527	14.346	15.471	1.13	-1.06
10	Kademeli D.	178	0.07	12.967	12.702	13.324	13.837	1.08	-0.70	12.691	13.142	13.723	14.814	1.10	-0.82
11	Kademeli D.	178	0.111	12.411	12.851	13.242	13.778	1.07	-0.58	12.642	14.043	13.588	14.467	1.12	-0.97
12	Kademeli D.	178	0.156	12.556	12.832	13.401	13.840	1.08	-0.65	12.936	12.590	13.344	14.147	1.08	-0.67
13	Kademeli D.	250	0.07	12.858	13.383	14.087	14.754	1.12	-0.98	12.435	12.905	13.203	13.661	1.07	-0.59
14	Kademeli D.	250	0.111	12.427	12.831	13.343	13.804	1.07	-0.61	12.510	13.103	13.574	14.054	1.09	-0.74
15	Kademeli D.	250	0.156	12.817	13.242	13.509	14.602	1.10	-0.82	12.645	13.116	13.726	14.220	1.10	-0.80
16	Kademeli D.	350	0.07	13.058	13.877	15.461	16.271	1.18	-1.42	12.493	12.882	13.290	14.771	1.07	-0.62
17	Kademeli D.	350	0.111	13.154	14.461	15.495	16.788	1.20	-1.57	12.510	12.815	13.328	14.139	1.07	-0.61
18	Kademeli D.	350	0.156	13.437	12.924	14.130	14.601	1.13	-1.02	12.473	12.663	12.892	13.727	1.06	-0.48
Maksimum				18.644				1.29	-2.18	17.182				1.21	-1.69
Minimum				12.382				1.07	-0.58	12.435				1.06	-0.48
Ortalama				14.081				1.14	-1.13	13.549				1.10	-0.84

3.1. Delme Parametrelerinin Delaminasyon Faktörü üzerine Etkileri (Effects of Drilling Parameters on Delamination Factor)

KLK'nın HSS matkap ile delinmesinde delme parametrelerinin delik girişi ve delik çıkışı delaminasyon faktörü üzerindeki etkileri Şekil 3'te gösterilmektedir. Şekil 3'ten; Dfg için parametrelerinin etki sırasının Vc>Dt>f şeklinde, Dfç için ise Dt>f>Vc şeklinde olduğu görülmektedir. Kesme hızının etki sırası bakımından elde edilen sonuçlar Bilge vd. tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir [25]. Kademeli delik delme ile daha düşük Dfg ve Dfç elde edilmiştir. Deliklerin delme derinliğinin bir fonksiyonu olarak itme kuvveti artmakta [11], daha yüksek itme kuvveti ise iş parçasında daha deniş bir delaminasyona

sebeptir [12, 18, 20, 23]. Bu çalışmada, kademeli delik delme yöntemiyle (Kademeli D.) 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 talaş atmak için emniyet mesafesine geri gelmiş ve tekrar $-z$ yönünde bu sefer $Q=5+5$ mm ilerleyerek ikinci talaş kaldırmış ve bir önceki işlemleri tekrar etmiştir. Her 5 mm'lik talaş kaldırma derinliği sonunda takım $+z$ yönünde hareket ettiğinden itme kuvveti sıfırlanmakta delik içerisindeki talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılması ve takım kesme kenarlarının da temizlenmesi sağlanmaktadır [25]. Dolayısıyla kademeli delik delmede delme derinliği daha az ve süreksiz olduğundan sürekli/doğrusal delmede oluşacak itme kuvvetlerine ulaşamayacak, takımın kesmesi kolaylaşacağından delik giriş 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 [25]. Kesme hızı artışına bağlı olarak delaminasyon artmış iken artan ilerleme miktarı ile delaminasyon azalmıştır. Artan kesme hızı kesme bölgesinde sıcaklık artışına sebep olduğu için takım aşınmasının artışına ya da ergiyen KLK malzeme içeriğinin (reçine matris) takım kesme kenarları ile etkileşime girmesine neden olabilecektir. Bu durumda da kesme kenarları reçineye sıvanan takım kesme kabiliyetini kaybettiğinden iş parçası kaplama katmanlarının ana malzemeden ayrılmasına neden olacaktır. Sertliği kesici takıma göre oldukça düşük olan KLK'nın düşük ilerleme miktarlarında delinmesi kesme bölgesinde kesme kenarlarının iş parçasına aşırı teması ısı artışına sebep olacaktır. Bu durumda da iş parçası malzemesi yine takım kesme kenarına sıvanarak takımın delme kabiliyetini zayıflatacaktır.



Şekil 3. Delme parametrelerinin D_{fg} ve $D_{fç}$ üzerine ana etkileri (Main effects of drilling parameters on D_{fg} and $D_{fç}$).

3.2. Delaminasyon Faktörü İçin Delme Parametrelerinin Optimizasyonu (Optimization of Drilling Parameters For Delamination Factor)

Bu deneysel çalışmanın diğer bir amacı da KLK'nın HSS matkaplarla delinmesinde delik girişi ve delik çıkışındaki delaminasyonun en aza indirilmesi için delme parametrelerinin optimum kombinasyonlarını belirlemektir. Bu amaca ulaşmak için Bölüm 2.3'te belirtilen GİA yönteminin tüm hesaplama ve analizleri yapılarak Tablo 3'te sunulmuştur. Tablo 3'te görüleceği üzere, 12 nolu deneyin delme şartlarında; $Dt_2Vc_1f_3$ (Dt :kademeli delik delme, Vc :178 m/dak, f :0.156 mm/dev) hem delik girişinde hem de delik çıkışında delaminasyon oluşumu daha az olan delikler elde edilecektir.

Tablo 3. Taguchi L₁₈ ortogonal dizi, normalize değerler, gri ilişkisel katsayıları ve gri ilişkisel dereceleri (Taguchi L₁₈ orthogonal array, normalized values, gray relational coefficients and gray relational degree).

Deney No	Kontrol faktörü seviyeleri			Deneysel Sonuçlar		Normalizasyon		Gri ilişkisel derece katsayı		Gri ilişkisel derece	GİA'ya göre en iyi sıralama
	Dt	Vc	f	Df _g	Df _ç	Df _g	Df _ç	Df _g	Df _ç		
1	SD	178	0.070	1.10	1.09	0.850	0.799	0.769	0.713	0.741	8
2	SD	178	0.111	1.07	1.10	0.992	0.730	0.985	0.649	0.817	4
3	SD	178	0.156	1.10	1.11	0.838	0.656	0.756	0.592	0.674	10
4	SD	250	0.070	1.15	1.15	0.612	0.413	0.563	0.460	0.511	16
5	SD	250	0.111	1.20	1.08	0.400	0.831	0.455	0.747	0.601	13
6	SD	250	0.156	1.20	1.09	0.377	0.788	0.445	0.703	0.574	15
7	SD	350	0.070	1.29	1.10	0.000	0.698	0.333	0.624	0.479	17
8	SD	350	0.111	1.26	1.21	0.115	0.000	0.361	0.333	0.347	18
9	SD	350	0.156	1.13	1.13	0.712	0.534	0.634	0.518	0.576	14
10	KD	178	0.070	1.08	1.10	0.935	0.730	0.884	0.649	0.767	6
11	KD	178	0.111	1.07	1.12	1.000	0.608	1.000	0.561	0.780	5
12	KD	178	0.156	1.08	1.08	0.962	0.852	0.929	0.771	0.850	1
13	KD	250	0.070	1.12	1.07	0.765	0.910	0.681	0.848	0.764	7
14	KD	250	0.111	1.07	1.09	0.985	0.799	0.970	0.713	0.842	2
15	KD	250	0.156	1.10	1.10	0.862	0.746	0.783	0.663	0.723	9
16	KD	350	0.070	1.18	1.07	0.500	0.889	0.500	0.818	0.659	11
17	KD	350	0.111	1.20	1.07	0.408	0.894	0.458	0.825	0.642	12
18	KD	350	0.156	1.13	1.06	0.742	1.000	0.660	1.000	0.830	3

Gri ilişkisel derece için varyans analizi sonuçları Tablo 4'te sunulmuştur. Gri ilişkisel derece üzerinde anlamlı etkisi olan delme parametreleri (P<0.05) "*" ile belirtilmiştir. Tablo 4'te gri ilişkisel derece/ Dfg ve Dfç üzerinde en etkili delme parametreleri %39.01 katkı oranıyla delme tipi olmuştur. Delme tipini %29.90 katkı oranları ile kesme hızı takip etmiştir. İlerleme miktarının gri ilişkisel derece üzerinde anlamlı etkisi tespit edilmemişken sırasıyla kesme hızı*ilerleme miktarı ve delme tipi*kesme hızı delme parametreleri etkileşimlerinde %14.03 ve %9.15 katkı oranlarıyla gri ilişkisel derece üzerinde (optimal delme parametrelerinin belirlenmesinde) etkili olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4. Gri ilişkisel derece için varyans analizi (Analysis of variance for gray relational degree).

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri	% Katkı
Dt	1	0.131243	0.131243	30.24	0.005	39.01*
Vc	2	0.100585	0.050293	11.59	0.022	29.90*
f	2	0.008028	0.004014	0.92	0.468	2.39
Dt*Vc	2	0.030776	0.015388	3.55	0.130	9.15
Dt*f	2	0.001244	0.000622	0.14	0.871	0.37
Vc*f	4	0.047213	0.011803	2.72	0.178	14.03
Hata	4	0.017363	0.004341			5.16
Toplam	17	0.336452				100.00

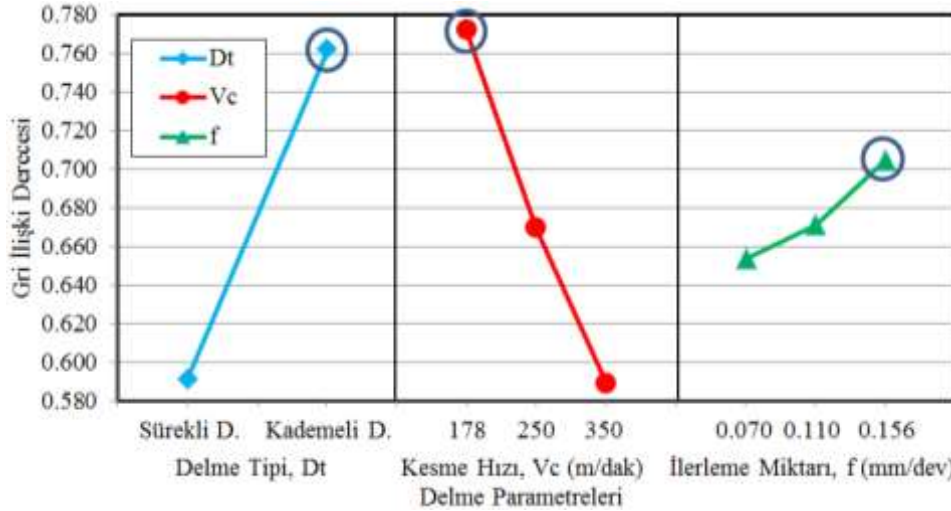
R² = %94.8, *Anlamlı etkisi olan delme parametresi

Gri ilişkisel derece için yanıt tablosu Tablo 5'e sunulmuştur. Yüksek gri ilişkisel derece değeri kontrol faktörlerinin optimal seviyesini göstermektedir. Buna göre, kontrol faktörlerinin optimal seviyeleri; $Dt_2Vc_1f_3$ (Dt:Kademeli delme, Vc:178 m/dak ve f:0.156 mm/dev) ile KLK HSS matkaplarla delindiğinde delik giriş ve çıkışındaki delaminasyon oluşumu en az gerçekleşecektir. Delme parametrelerinin etki sıralaması incelendiğinde gri ilişkisel derece üzerinde en etkili parametreler Tablo 4'te verilen ANOVA sonuçlarını destekler şekilde kesme hızı, delme tipi ve ilerleme miktarı olmuştur. Tablo 5'te verilen gri ilişkisel derece yanıt tablosu sonuçları Şekil 5'te verilen gri ilişkisel derece ortalaması için ana etkiler grafiğini desteklemektedir. En düşük kesme hızı ve en yüksek ilerleme miktarlarında gri ilişkisel derece değerleri artmıştır.

Tablo 5. Gri ilişkisel derece için yanıt tablosu (Response table for gray relational degree).

Kontrol faktörleri	Seviyeler			Fark	Sıralama
	1	2	3		
Delme Tipi (Dt)	0.591	0.762*	-	0.171	2
Kesme hızı (Vc, m/dak)	0.772*	0.669	0.589	0.183	1
İlerleme miktarı (f, mm/dev)	0.654	0.671	0.705*	0.051	3

(*) Kontrol faktörünün optimal seviyesi



Şekil 4. Gri ilişkisel derece ortalaması için ana etkiler grafiği (Main effect graph for gray relational degree average).

4. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Kompakt laminat kompozit malzemenin Ø12 mm HSS matkaplarla delinmesinde delik girişi ve delik çıkışı delaminasyon faktörü üzerinde delme parametreleri olarak seçilen delme tipi (Dt), kesme hızı (Vc) ve ilerleme miktarı (f) etkilerinin araştırıldığı ve optimize edildiği bu deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar şunlardır:

1. Delik giriş ve delik çıkış yüzeylerinde kaplama katmanının soyulması şeklinde delaminasyonlar oluşmuştur.
2. Delik giriş yüzeyinde Ø12.382- Ø18.644 mm aralığında, delik çıkış yüzeyinde ise Ø12.668-Ø17.182 mm aralığında delaminasyon oluşumu gözlenmiş maksimum çaplar (Dmax) ölçülmüştür. Buradan, hem delik girişinde hem de delik çıkışındaki delaminasyonun aynı boyutlarda ve tiplerde oluştuğunu söylemek mümkündür.
3. Delme tipi farketmeksizin artan kesme hızı ile birlikte delaminasyon oluşumu artmıştır. Diğer taraftan, artan ilerleme miktarı ile delaminasyon oluşumu azalmıştır.

4. Kademeli delik delme yöntemi ile $V_c:178$ m/dak ve $f:0.156$ mm/dev kesme şartlarında delindiğinde hem delik girişinde hem de delik çıkışında delaminasyon oluşumu daha az olan delikler elde edilmiştir.
5. Delik girişi ve delik çıkışı delaminasyon faktörü üzerinde en etkili delme parametreleri sırasıyla; %39.01 ve %29.90 katkı oranıyla delme tipi ve kesme hızı olmuştur. İlerleme miktarının ana etkisi istatistiki olarak anlamsız kalmıştır.
6. Delik girişi ve çıkışında oluşan delaminasyonların minimizasyonu açısından delme parametrelerinin etkileri ve optimum değerleri Taguchi Metodu ve Gri İlişkisel Analiz yaklaşımının birlikte kullanılmasıyla %94.8 ile yüksek bir oranda belirlenmiştir.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. Capello, E., (2004). Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates, *Journal of Materials Processing Technology*, 148, 186–195.
- [2]. Xu, J., An, Q., Cai, X., and Chen, M., (2013). Drilling machinability evaluation on new developed high-strength T800S/250F CFRP laminates”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14 (10), 1687–1696.
- [3]. Shyha, I., Soo, S.L., Aspinwall, D., and Bradley, S., (2010). Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 1023–1034.
- [4]. Stone, R., and Krishnamurthy, K., (1996). Minimize delamination during drilling of graphiteepoxy laminates, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36 (9), 985-1003.
- [5]. Rubio, J.C., Abrao, A.M., Faria, P.E., Esteves Correia, A., and Davim, J.P., (2008). Effects of high speed in the drilling of glass fibre reinforced plastic: Evaluation of the delamination factor, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 715–720.
- [6]. Chen, W.C., (1997). Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37 (8), 1097-1108.
- [7]. Hocheng, H., and Tsao, C.C., (2006). Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 1403–1416.
- [8]. Tsao, C.C. and Hocheng, H., (2004). Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, 1085–1090.
- [9]. Hocheng, H. and Tsao, C.C., (2003). Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits, *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 335–339.
- [10]. Li, Z. J., Hong, M.S., Wang, L.J., Zhao, H. W., Su, H. and Wei, Y. L., (2003). “Machining accuracy analysis for step multi-element varying-parameter vibration drilling of laminated composite materials”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21, 760–768.
- [11]. Ho-Cheng, H., and Dharan, C. K. H., (1990). Delamination during drilling in composite laminates, *Journal of Engineering for Industry*, 112 (3), 236-239.
- [12]. Jain, S. and Yang, D.C.H., (1993). Effects of feedrate and chisel edge on delamination in composites drilling, *Journal of Engineering for Industry*, 115 (4), 398-405.
- [13]. Jain, S., and Yang, D.C.H., (1994). Delamination-free drilling of composite laminates, *Journal of Engineering for Industry*, 116 (4), 475-481.
- [14]. Durão, L.M.P., Gonçalves, D.J.S., Tavares, J.M.R.S., De Albuquerque, V.H.C., A. Vieira, A.A., and Marques, A.T., (2010). Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates, *Composite Structures*, 92, 1545–1550.

- [15].Davim, J.P., Rubio, J.C. and Abrao, A.M., (2007). A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates, *Composites Science and Technology*, 67, 1939–1945.
- [16].Singh, I. and Bhatnagar, N., (2006). Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastic (UD-GFRP) composite laminates, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27 (9), 870–876.
- [17].Jung, J.P., Kim, G.W. and Lee, K.Y., (2005). Critical thrust force at delamination propagation during drilling of angle-ply laminates, *Composite Structures*, 68 (4), 391–397.
- [18].Marques, A.T., Durão, L. M. Magalhães, A.G., Silva, J.F. and Tavares, J.M.R.S., (2009). Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: Evaluation of a special step drill, *Composites Science and Technology*, 69 (14), 2376–2382.
- [19].Hocheng, H. and Tsao, C.C., (2005). The path towards delamination-free drilling of composite materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 167 (2–3), 251–264.
- [20].Tsao, C.C. and Hocheng, H., (2005). Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, 1261–1270.
- [21].Tsao, C.C., Kuo, K.L., and Hsu, I.C., (2012). Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59 (5), 617–622.
- [22].Tsao, C.C., (1997). Prediction of the location of delamination in the drilling of composite laminates, *Journal of Materials Processing Technology*, 70 (1–3), 185-189.
- [23].Tsao, C.C. and Hocheng, H., (2007). Effect of tool wear on delamination in drilling composite materials, *International Journal of Mechanical Sciences*, 49 (8), 983–988.
- [24].Bilge, T., Motorcu, A.R., and Ivanov, A., (2017). Kompakt laminat kompozit malzemenin tungsten karbür takımlarla delinmesinde delaminasyon faktörünün değerlendirilmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, (Yayın Baskıda.), pp.1-10.
- [25].Bilge, T., Motorcu, A.R., and Ivanov, A., (2016). Kompakt Laminant Kompozitin Delinmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi”, *17. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi*, pp.1-16.
- [26].Roy R.K. (1990).A Primer on the Taguchi Method. Competitive Manufacturing Series, Van Nostrand Reinhold, New York, USA.
- [27].Yılmaz, E., Güngör, F., (2010). “Gri ilişkisel analiz yöntemine göre farklı sertliklerde optimum takım tutucusunun belirlenmesi”, *2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, pp.1-9.