

KOMPAKT LAMİNATIN DELİNMESİNDE BOYUTSAL TAMLIK İÇİN DELME PARAMETRELERİNİN GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ İLE OPTİMİZASYONU

Tuncay Bilge*, Ali Rıza Motorcu, Aleksandar Ivanov
Geliş Tarihi/ Received: 20.03.2017, Kabul tarihi/Accepted: 17.07.2017

Özet

Delik delme prosesi kompakt laminat kompozitten üretilmiş parçaların montajı için kritik öneme sahiptir. Uygun seçilmeyen delme parametreleri deliklerin boyutsal tamlığını etkilemektedir. Bu deneysel çalışmada, bir kompakt laminat kompozit plaka üzerine, üç farklı kesme hızında (V_c :178, 250 ve 350 m/dak), üç farklı ilerleme miktarında (f :0.07, 0.111 ve 0.156 mm/dev) ve iki farklı delme tipinde (Dt :Doğrusal delme ve gagalama ile delme), 12 mm çapında yüksek hız çeliği matkap uçları kullanılarak, kuru delme işlemi ile boydan boya delikler delinmiştir. Taguchi L18 ortogonal dizi kompakt laminat kompozit plakların delinmesini gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Proses parametrelerinin çoklu performans optimizasyonu gri ilişkisel analizi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve regresyon analizi ile tahminsel denklemler geliştirilmiştir. İki proses performans parametresi; yeni matkap ucu ile delinmiş delik çaplarının boyutsal tamlığı (Da_1) ve aşınmış matkap ucu ile delinmiş delik çaplarının boyutsal tamlığı (Da_2) optimize edilmiştir. Bu araştırmanın sonucu kesme hızı ve ilerleme miktarının deliğin boyutsal doğruluğu üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Kompakt laminat kompozitin delinmesinde delme parametrelerinin optimal seviyeleri; V_c :178 m/dak, f :0.156 mm/dev ve Dt :Gagalama ile delme olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompakt laminat kompozit, Boyutsal tamlık, HSS matkap, Taguchi metodu, Gri ilişkisel analiz.

OPTIMIZATION OF DRILLING PARAMETERS FOR DIMENSIONAL ACCURACY IN DRILLING OF COMPACT LAMINATE COMPOSITE USING GRAY RELATIONAL ANALYSIS

Abstract

The hole drilling process is critical for the assembly of parts manufactured from compact laminate composite. Unsuitable selected drilling parameters affect the dimensional accuracy of the holes. In this experimental study, through holes were drilled with three different cutting speed (V_c :178, 250 and 350 m/min), three different feed rate (f :0.07, 0.111 and 0.156 mm/rev) and two different drilling type (Dt : Linear drilling and peck drilling) in dry drilling process of a compact laminate composite plate using high speed steel drill bits with a diameter of 12 mm. The Taguchi L18 orthogonal array was used to perform drilling of compact laminate composite plates. Multiple performance optimization of the process parameters was performed using Gray Relational Analysis and predictive equations were developed via regression analysis. Two process performance parameters namely dimensional accuracy of hole diameter drilled with new drill bit (Da_1) and dimensional accuracy of hole diameter drilled worn drill bit (Da_2) were optimized. The results of this research revealed that the cutting speed and the feed rate have the most significant effect on the dimensional accuracy of the hole. Optimal levels of

* Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Malzeme ve Malzeme İşleme Teknolojileri Bölümü, Terzioğlu Kampüsü, 17020, Çanakkale, TÜRKİYE
E-posta: tuncaybilge@comu.edu.tr

drilling parameters are defined as; V_c :178 m/min, f :0.156 mm/rev and D_t :Peck drilling, in the drilling of compact laminate composites.

Key Words: Compact laminate composite, Dimensional accuracy, HSS drill, Taguchi method, Gray relational analysis.

1. Giriş

Son yıllarda kompakt laminat kompozit (KLL) malzemelerin kullanımı kimya, radyoloji, botanik, fizik, elektronik, kozmetik, grafik, eğitim ve fotoğraf laboratuvarları, diş hekimliği ameliyat odaları, hastaneler, cerrahi odaları, eczaneler, gıda endüstrisi, profesyonel mutfaklar, derin dondurucu odaları gibi birçok alanda giderek artmaktadır. KLL malzemeler, kraft kâğıtlarının fenolik reçine ile yüksek ısı ve basınçta preslenmesi sonucu oluşturulan çok tabakalı kompozit panellerdir. Bu malzemeler yüksek dayanım, sağlamlık ve rijitlik gibi üstün özelliklerinden dolayı tercih edilmektedirler. KLL panellerin işlenmesinde farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu malzemelerin işlenmesinde delik delme işlemi yoğun olarak kullanılan bir yöntemdir. Özellikle panellerin planlanan tasarımlara göre kesildikten sonra montajları için çok sayıda deliklere ihtiyaç bulunmaktadır. Delme işlemi en önemli talaş kaldırma işlemlerinden biridir ve talaş kaldırma işlemlerinin yaklaşık % 33'ünü oluşturmaktadır. Gerek sökülebilir birleştirmeler için gerekse sökülemeyen geçme şeklindeki birleştirmelerde veya pimlerin çalışmasında, hassas deliklerde toleransların doğruluğu/boyutsal tamlığı önem arz etmektedir [Krar vd., 1998; Tonshoff vd., 1990]. Delik delme işlemlerinde talaşın boşaltılması oldukça önemlidir, çünkü talaşın atılabilirliğinin zorlaşması delik kalitesini ve boyutlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu yüzden gagalama yöntemiyle delik delme (kademeli delik delme) uygulamaları/çevrimleri Bilgisayar Destekli Üretim programlarına (CAM) eklenmiş durumdadır. Deliğin boyutsal tamlığı; deliğin tasarımda verilen değerlere göre istenen çap ve tolerans değerlerinde delinmesi ve çapının ölçüldükten sonra da aynı değeri vermesidir. İstenilen boyutsal tamlıktaki çap değerleri montaj esnasında birleştirilecek olan malzemelerin kolaylıkla toplanabilmesine imkan tanımaktadır. Literatürde laminat ve diğer kompozit malzemelerin işlenebilirliği ile ilgili çalışmalar hala önemini korumaktadır. Valarmathi vd. [2013], farklı çaplara sahip yüksek hız çeliği (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. Ali vd. [2013] tarafından yapılan çalışmada ağaç lamine GFRP malzemelere delik açılması sırasındaki delme ve frezeleme parametrelerinin etkileri istatistiksel bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçları, yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme miktarında frezeleme işleminin delme işleminden daha uygun olduğunu göstermiştir. Shahrajabian vd. [2012] tarafından yapılan çalışmada karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin (CFRP) delinmesinde ilerleme miktarı itme kuvveti, delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre olmuştur. Marilena vd. [2011], tabakalı karbon elyaf malzemenin delinmesinde delme kuvveti, delaminasyon oluşumu ve yüzey özelliklerini araştırmışlar ve özellikle delaminasyon oluşumunun azaltılması için delme parametrelerinin kontrol altında tutulması gerektiğini belirtmişlerdir. Mervin vd. [2013] tarafından iki yönlü karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit (BCFREC) laminat kompozitlerin HSS matkaplarla delinmesi üzerine yapılan çalışmada itme kuvveti delaminasyonun temel sebebi olarak görülmüştür. Krishnaraj vd. [2012] tarafından yapılan çalışmada, karbon elyaf takviyeli plastik laminant (CFRP)/alüminyum panelin düz karbür matkap ile delinmesinde itme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerleme miktarı ve matkap çapı en etkili parametre olmuştur. Ramesh vd. [2013], kaplamalı tungsten karbür kesici takım kullanarak kalın laminat olmayan cam elyaf takviyeli plastik kompozit (GFPR) çubukların delinmesinde deliklerin ovalliği (delik çapı hatası) üzerine delme parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Çalışmada laminat olmayan

kompozitlerin delinmesinde delme parametrelerinin delik kalitesindeki etkisinin laminat kompozitlerden farklı olduğu belirtilmiştir. Madhavan vd. [2011], cam elyaf-epoksi/sert (rijit) poliüretan köpük levha hibrid kompozitin HSS matkaplarla delinmesinde delaminasyona sebep olan iki parametrenin itme kuvveti ve tork olduğunu tespit etmişlerdir. Babu ve Sunny [2013] tarafından yapılan çalışmada GFRP kompozit malzemelerin delinmesinde ilerleme miktarı delaminasyonu etkileyen en etkili parametre olarak tespit edilmiştir. Durão vd. [2010] kompozit laminatların farklı matkap uç geometrisi ve ilerleme miktarı ile delinmesi üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonunda matkap ucu geometrisi ve ilerleme miktarı parametrelerinin uygun bir şekilde kombinasyonu ile delaminasyonun azaltılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Khashaba vd. [2010] tarafından yapılan çalışmada dokuma cam elyaf takviyeli epoksi (GFRE) kompozitlerin işlenmesinde işleme parametrelerinden ilerleme miktarı, devir sayısı ve matkap çapının itme kuvveti, delaminasyon, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Araştırmanın sonuçları, GFRE kompozitlerinin delinmesinde incelenen kesme parametreleri aralığında delaminasyonun gözlenmediğini göstermiştir. Xu vd. [2013] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yeni geliştirilen yüksek mukavemetli T800S/250F CFRP laminatın CVD kaplı helisel matkap ve CVD kaplı kama tip matkaplarla işlenebilirliği, delme kuvvetleri, çapak kusurları, delik duvar yüzeyi morfolojisi ve delaminasyon hasarı açısından değerlendirilmiştir. Kama tipi matkaplar, helisel matkaplardan çok daha iyi delme performansı sergilemiş ve T800S/250F CFRP laminatın delinmesi için daha uygun bulunmuştur. Krishnaraj vd. [2012] ince CFRP laminatların K20 karbür matkaplarla delinmesinde optimum kesme koşullarını belirlemek için tam faktöriyel deneysel tasarım tekniğini kullanmışlardır. Araştırmada analiz edilen delik kalitesi parametreleri, delik çapı, dairesellik, soyulma delaminasyonu ve dışarı doğru itme delaminasyonudur. İlerleme miktarı delik çapı üzerinde en etkili parametre olarak tespit edilmiş olup daha yüksek ilerleme miktarlarında nominal çapa daha yakın değerler elde edilmiştir. Karbon elyaf takviyeli epoksi (CFRE) kompozit malzemelerin WC karbür, yüksek hız çeliği (HSS) ve TiN kaplı karbür matkaplarla kuru delinmesinde çıkış delaminasyon faktörü ve silindiriklik hatasının azaltılması için delme parametrelerinin optimizasyonu Ameer vd. [2017] tarafından optimize edilmiştir. Araştırmada özellikle devir sayısının deliklerin silindiriklik hatalarını etkilediği belirtilmiştir. Wang vd. [2015] tarafından yapılan çalışmada, T800/X850CFRP ve 7075-T651 Al'dan oluşan yığın malzemelerinin çift uç açılı ve elmas kaplı matkaplarla delinmesi üzerine delme parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, CFRP katmanında ölçülen delik çapı, Al katmanında ölçülen delik çapından daha fazla çıkmıştır. Daha yüksek devir sayısının kullanılmasıyla, CFRP ve Al arasında daha küçük bir çap farkının oluşabileceği tespit edilmiştir. Bajpai vd. [2017] doğal kompozit laminatların delinme davranışını delme kuvvetleri ve delme ile indüklenen hasar açısından değerlendirilmiştir. Araştırmada üç delme parametresi; kesme hızı, ilerleme miktarı ve matkap geometrisinin bu kompozitlerin delinme davranışını etkilediği sonucuna varılmıştır. Feito vd. [2016] tarafından yapılan çalışmada, dokuma CFRP'lerin hem yeni hem de aşınmış takımlarla delinmesinde yönelik bir sonlu elemanlar modeli sunulmuştur. Farklı ilerleme miktarı ve kesme hızı değerleri için modelin itme kuvveti ve delaminasyonu tahmin etme kabiliyeti oldukça yüksek tespit edilmiş ve takım geometrisinin etkisi belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Sektörden KLK malzemenin işlenmesindeki sıkıntıların bildirilmesi üzerine yapılan literatür araştırmalarında da bu malzemenin işlenebilirliği ile ilgili çalışmaların yok denecek kadar az olduğu görülmüştür. Bu yüzden bu malzemenin farklı yöntemlerle işlenebilirliğini belirlemek için öncelikle en sık kullanılan yöntemler olan delik delme ve cep işleme öncelikli olarak ele alınarak deneysel çalışmalar yapılmaya karar verilmiştir.

Taguchi Metodu (TM) az sayıda deney ile kontrol faktörlerinin etkilerinin ve en uygun seviyelerinin belirlendiği sistematik istatistiksel bir yaklaşımdır. Bu özellikleri nedeniyle deneysel ve bilimsel çalışmalarda çok tercih edilen etkin ve verimli bir yöntemdir. TM, sadece tek yanıtli optimizasyon problemleri ile ilgilenmektedir. Dolayısıyla geleneksel TM çok amaçlı optimizasyon problemini optimize edememektedir. Çok amaçlı problemleri optimize etmek için TM Gri İlişkisel Analiz (GİA) ile birleştirilmektedir [Mervin vd., 2013; Babu ve Sunny, 2013].

KLK panellerin delinmesinde delik çapı boyut tamlığı önemli bir çıkış parametresidir. KLK donatılarının CNC tezgahlarında işlemleri fabrikalarda seri imalat şeklinde gerçekleştirilmekte olup montajları kullanılacakları yerde yapılmaktadır. KLK malzemenin CNC dik işlem merkezlerinde işlenmesi/delinmesi genellikle ağaç işleri ve makine imalat endüstrisinde kullanılan parmak freze, matkap ve özel geometrili delme takımlarıyla yapılmakta olup ve işleme parametrelerinin seçimi de CNC operatörlerinin mesleki deneyimlerine, kesici takım firmalarının önerilerine kalmıştır. Bu yüzden bu kompozitlerin işlenebilmesi için uygun kesici tipi, takım geometrisi ve kesme parametrelerine ihtiyaç vardır. Uygulamada farklı kesici takım malzemesi ve değişik takım geometrilerinde üretilmiş takımlar çoğunlukla takım ömürlerini tamamlasalar dahi yüksek aşınma oranlarına rağmen işlemeye devam ettirilmektedirler. Bu gibi istenmeyen durumlar tasarlanan iş parçalarının kalitesine olumsuz yönde yansımaktadır. Delik giriş ve çıkışındaki hasarlar, yetersiz yüzey kalitesi ve nominal ölçülerde gerçekleşmeyen üretimlerin yaratacağı problemler ötelenerek montaj işleminde çözülmeye veya üstü kapatılmaya çalışılmaktadır. Aşınmış takımla delik delmenin delikler üzerindeki olumsuz etkilerine dikkat çekmek üzere bu çalışmada, KLK malzemenin yeni (T_1) ve aşınmış (T_2) HSS matkaplar ile delinmesinde delme parametrelerinin delik çapı boyutsal tamlığı üzerindeki etkileri TM ve Varyans analizi (ANOVA) teknikleri ile belirlenmiştir. İki proses performans parametresi olarak belirlenen; yeni matkap ucu ile delinmiş delik çaplarının boyutsal tamlığı (Da_1) ve aşınmış matkap ucu ile delinmiş delik çaplarının boyutsal tamlığı (Da_2) çok amaçlı optimizasyonu ise GİA kullanılarak optimize edilmiştir. Ayrıca, Da_1 ve Da_2 boyutsal tamlıklarını tahmin etmek için regresyon tekniği kullanılarak birinci dereceden tahminsel denklemler geliştirilmiştir. Bu çalışma sonunda elde edilmiş verilerin ve optimize değerlerin sektördeki uygulayıcılara, kesici takım üreticilerine, malzeme geliştiricilerine ve akademik çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

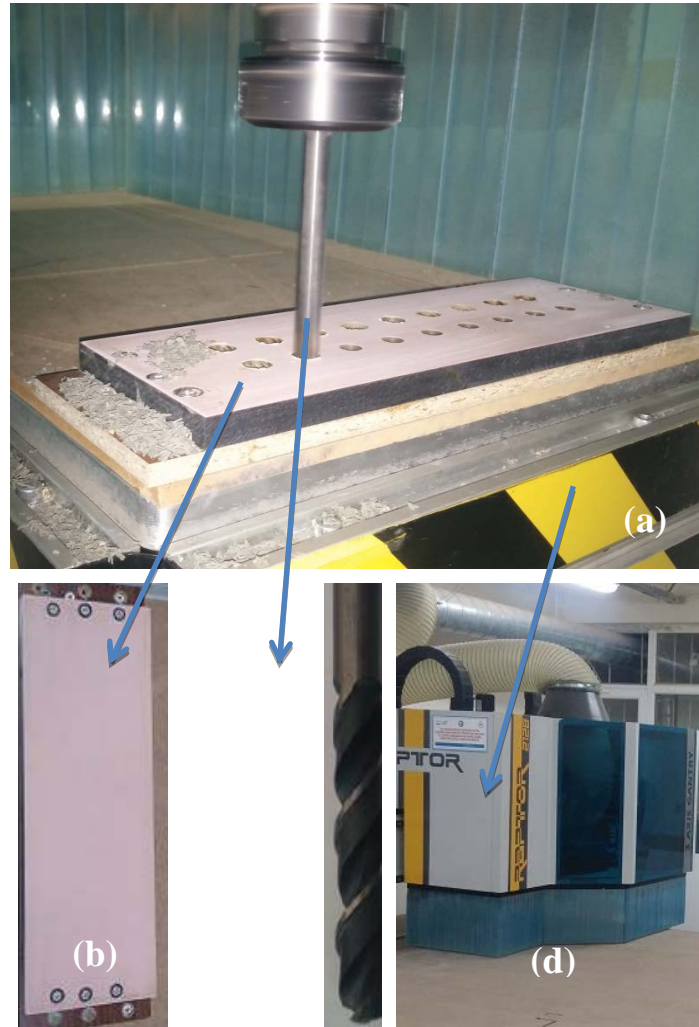
2. MATERYAL ve METOT

2.1. İş Parçası, Kesici Takım ve Takım Tezgahı

İşlenebilirlik deneylerinde (Şekil 1.a), tabaka halindeki levhalardan 300x100x12 mm boyutlarında kesilmiş, EN 438-2 standardı, CGS sınıfı, eğilme modülü 9000 Mpa, eğilme dayanımı min 80 MPa çekme dayanımı 60 MPa olan standart kompakt laminat kompozit numuneler iş parçası olarak kullanılmıştır [Puhan vd., 2013; AsdLaminat, 2015] (Şekil 1.b). KLK malzeme fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde okullar, spor salonları, hastaneler, hava alanları, alışveriş merkezlerinin duvar kaplamalarında, tuvalet kabinlerinde, soyunma dolaplarında ve mobilya ve dekorasyon alanlarında geniş uygulama alanı bulmaktadır. İş parçasını vakumla sıkma yapan CNC tezgahının tablasına bağlamak ve takımların boydan boya delik delmesi için iş parçası malzemeleri bir başka malzemeye bağlanarak delinmiştir. Delik delme deneylerinde, çapı 12 mm, TS ISO 235, HSS, N, uç açısı 118°, sağ kesme yönlü yeni (T_1) ve aşınmış (T_2) helisel matkaplar kullanılmıştır (Şekil 1.c). Bu kesici takımlar düşük

alaşımli 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. Optik mikroskoplarla yapılan takım aşınması incelemelerinde üzerlerinde, uç, köşe ve sınır aşınması ve sıvanma oluşmamış, serbest/yan kenar aşınması $V_b:0.3-0.5$ mm aralığında olan HSS helisel matkaplar aşınmış T_2 takımlar olarak kullanılmıştır.

Deneylerde tabla ölçüleri 2100x2800 mm, motor gücü 9 kW, maksimum devir sayısı 24000 dev/dak olan 3 eksenli AES RAPTOR 2128 CNC dik işleme merkezi kullanılmıştır (Şekil 1.d).



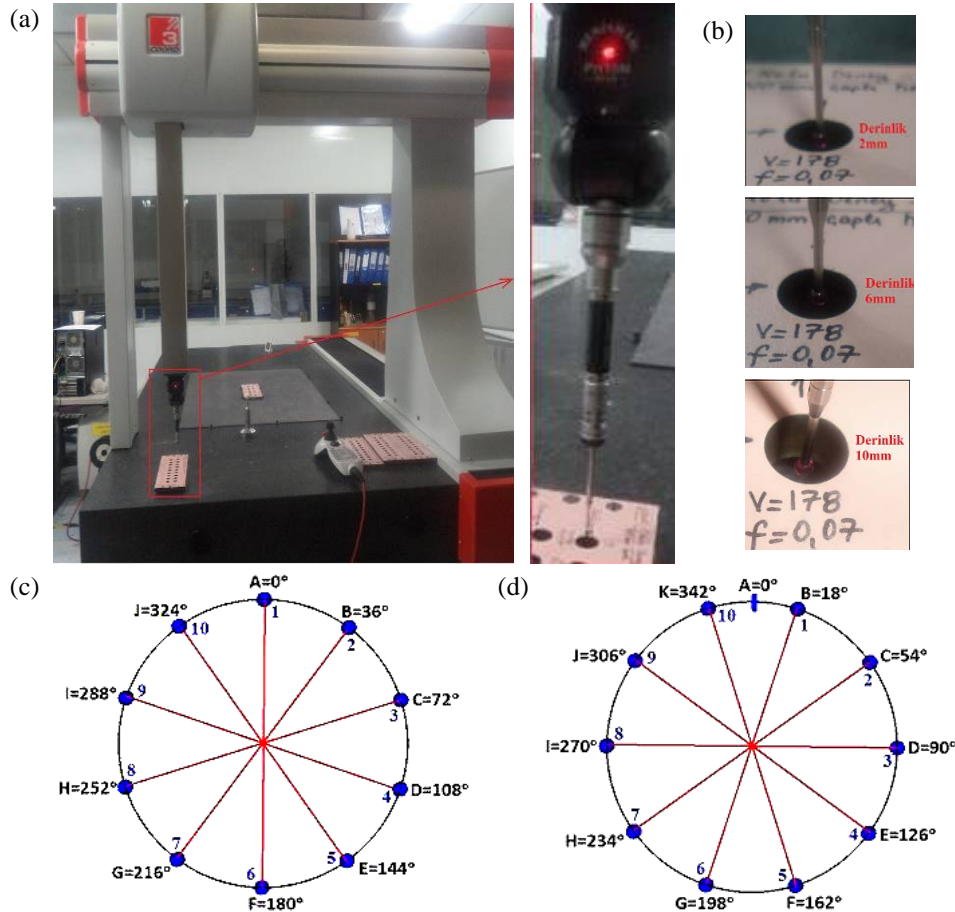
Şekil 1. (a) İşlenebilirlik deneyleri. (b) İş parçası malzemesi, (c) HSS matkap, (d) Takım tezgahı.

2.2. Delme Deneyleri ve Boyutsal Tamlık Ölçümleri

Deliklerin kontrol faktörlerinin farklı seviyelerinde delinmesi için uygun bir CNC program yazılmıştır. Yazılan CNC programa isteğe bağlı durdurma (optional stop) satırı eklenerek her

delik delme sonrasında yeni takım takılarak takım boyu istenilen mesafeye ayarlanmıştır. Her deneye yeni (daha önceki deneylerde kullanılmamış) bir kesici takım ile başlanmış ve deneyler kuru kesme şartları altında yapılmıştır. Bu çalışmada boyutsal tamlık (Da) delinmiş deliklerde nominal çap 12.0 mm'den daha küçük ya da daha büyük delik çaplarının ölçümleri COORD3 marka üç boyutlu koordinat ölçüm (CMM) tezgahında Şekil 2.a-d'de görüldüğü gibi yapılmıştır.

Delinen deliklerin boyutsal tamlığının (Da) hassas bir şekilde belirlenmesi için parçanın üst yüzeyi referans olarak alınarak bu yüzeyden 2 mm, 6 mm ve 10 mm'de Da ölçümleri yapılmıştır. 1. delik için ilk önce prob 2 mm yükseklikte, başlangıç açısı $A:0^\circ$ 'de delik yüzeyinde bir noktaya dokundurulmuş ve 36° açılı aralıklarla 10 adet noktaya dokundurularak Da ölçümleri tamamlanmıştır (Şekil 2.c). Daha sonra aynı delik için, başlangıç açısı $A:18^\circ$ 'de delik yüzeyinde bir noktaya dokundurulmuş ve 36° açılı aralıklarla 10 adet noktaya dokundurularak Da ölçümleri yapılmıştır (Şekil 2.d). Deliklerin üst yüzeyinden itibaren 2 mm, 6 mm ve 10 mm yüksekliklerde olmak üzere 18 adet delik üzerinden ikişer ölçüm alınarak toplam 108 (18 delik x 3 farklı yükseklik x 2 farklı açıda ölçüm=108 ölçüm) alınmıştır. 18 adet delik için alınan Da ölçümleri gözden geçirilerek birbirine en yakın üç ölçüm sonucu değerlendirmeye alınmıştır.



Şekil 2. (a) CMM Tezgahı, (b) Probla üç farklı derinlikte Da ölçümleri (c) Başlangıç açısı $A:0^\circ$ ile yapılan ölçüm (d) Başlangıç açısı $A:18^\circ$ ile yapılan ölçüm.

2.3. Kontrol Faktörleri ve Taguchi Metodu ile Deneysel Tasarım

KLK malzemenin yeni ve aşınmış olmak üzere iki tip kesici takım ile delinmesinde delik çapı üzerinde delme parametrelerinin etkilerini belirlemek amacıyla Taguchi Metodu (TM) kullanılmıştır. Mevcut Bilgisayar Destekli Üretim CAM programlarında doğrusal delik delme ve kademeli delik delme olmak üzere iki tip delik delme çevrimi bulunduğu için bu iki farklı delme tipi delme parametresi olarak seçilmiştir. Delme tipinin serbestlik derecesi (delme tipinin seviyesi-1=2-1=1) 1'dir. Kesme hızı ve ilerleme miktarının delik çapı boyutsal tamlığı üzerindeki etkisini tespit etmek için bu parametrelerin üç seviyeli olması yeterli görülmüştür. Kesme hızı ve ilerleme miktarının serbestlik dereceleri toplamı 4'tür (kesme hızının seviyesi-1=3-1=2, ilerleme miktarının seviyesi-1=3-1=2). Bir kontrol faktörü 2 seviyeli ve iki kontrol faktörü 3 seviyeli olan karma deneysel tasarımlar için L_{18} ortogonal diziler kullanılmakta olup bu dizinin toplam serbestlik derecesi 17'dir. Dolayısıyla, kontrol faktör grubunun toplam serbestlik derecesi de göz önünde bulundurularak en uygun ortogonal dizi olarak $L_{18} (2^1 \times 2^3)$ seçilmiştir [Montgomery, 2013; Roy, 1990]. TM daha az sayıda deney ile süreç ve ürün kalitesinin artırılması için etkili bir yöntemdir. Bu yöntem sayesinde en iyi parametre değerleri belirlenirken performans özellikleri de optimize edilebilmektedir [Montgomery, 2013; Roy, 1990].

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

Tablo 1. Kontrol faktörleri ve seviyeleri

Kontrol Faktörleri	Sembol	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Delme Tipi	Dt	-	delme	gagalama	-
Kesme Hızı	Vc	(m/dak)	178	250	350
İlerleme Miktarı	f	(mm/dev)	0.07	0.111	0.156

KLK'nin delinmesinde Da değerlerinin nominal delik çapı 12 mm'ye eşit ya da ona yakın en küçük değerlerde olması gerekmektedir. Nominal delik çapı 12 mm'den oldukça büyük değerlerde elde edilen delik çapları KLK kompozitin kullanıldığı yerlerde montaj ve sızıntı problemi yaratmaktadır. Özellikle büyük delik çaplarında oluşan kimyasalların sızıntısını önlemek için ise ekstra boşluk doldurma işlemi yapılmaktadır. Nominal çaptan daha küçük çaplarda elde edilen delikler için delik büyütme işlemi yapılmakta olup delik çaplarının nominal çaptan küçük olması sorun yaratmamaktadır. KLK malzeme üzerinde HSS matkaplarla yapılan delik delme ön deneylerin tamamında delik çapları nominal delik çapından oldukça büyük çıkmıştır. Bu nedenle, bağımlı değişkenin kalite karakteristiği sinyal/gürültü (S/N) oranları dB cinsinden "Daha küçük daha iyi" yaklaşımına göre hesaplanmıştır [Puhan vd., 2013; Montgomery, 2013; Roy, 1990]. Ayrıca, kontrol faktörlerinin ana etkileri % 95 güven seviyesinde gerçekleştirilen Varyans Analizi (ANOVA) ile belirlenmiştir. TM'nin son adım olan doğrulama deneyleri ile kalite özellikleri incelenmiştir [Montgomery, 2013; Roy, 1990]. ANOVA analizlerinden anlamlı etkileri tespit edilen kontrol faktörlerinin optimal seviyeleri ile tahminsel optimal kalite karakteristikleri (Tahminsel optimal boyutsal tamlıklar; Da_{1_opt} ve Da_{2_opt}) belirlenmiştir. Daha sonra, KLK'nın T_1 takım ve T_2 takım ile delinmesinde tahminsel optimal kalite karakteristikleri Da_{1_opt} ve Da_{2_opt} için sırasıyla CI_{Da_1} ve CI_{Da_2} güven aralıkları hesaplanmıştır

[Montgomery, 2013; Roy, 1990]. TM ile elde edilen tahminsel değerlerle kıyaslamak ve TM'nin tahmin yeteneğini belirlemek amacıyla lineer regresyon analizi ile birinci dereceden tahminsel denklemler geliştirilmiştir.

2.4. Gri İlişkisel Analiz ile Optimizasyon

Kontrol faktörlerinin optimizasyonu TM ile Gri İlişkisel Analizin (GİA) birlikte kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. GİA gri bir sistemdeki her bir faktör ile kıyas yapılan faktör (referans serisi) serisi arasındaki ilişki derecesini belirlemeye yarayan bir yöntemdir. Her bir faktör bir dizi (sıra veya sütun) olarak tanımlanır [Kuram ve Ozcelik, 2013; Yılmaz ve Güngör, 2010; Ramesh vd., 2016; Taşkesen ve Kütükde, 2013].

Geleneksel TM çok amaçlı optimizasyon problemini optimize edememektedir. Bunun için, TM çok amaçlı sorunları optimize etmek için GİA ile birleştirilmektedir. Bu çalışmada yeni ve aşınmış HSS matkaplarla delik delmede nominal çaplarda delikler elde etmek için delme parametrelerinin optimizasyonu için aşağıdaki adımlar sırasıyla uygulanmıştır:

- T_1 takımla ve T_2 takımla elde edilen boyutsal tamlik ölçüm sonuçlarının normalize edilmesi (veri-ön işleme),
- Gri ilişkisel katsayısının hesaplanması,
- Gri ilişkisel katsayı ortalamaları ile gri ilişkisel derecesinin hesaplanması,
- Gri ilişkisel derecesinin sıralanması,
- Gri ilişkisel derece varyans analiz kullanılarak deneysel sonuçların analizi,
- Kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinin seçilmesi.

3. Deneysel Bulgular ve Tartışma

3.1. Taguchi Çözümlemeleri

KLK'nin T_1 matkaplarla delinmesiyle elde edilmiş deliklerin boyutsal tamlik ölçüm sonuçları (Da_1) ve T_2 matkaplarla delinmesiyle elde edilmiş deliklerin boyutsal tamlik ölçüm sonuçlarının (Da_2) aritmetik ortalaması Tablo 2'de sunulmuştur. Ölçümlerinin aritmetik ortalamaları Minitab 16.1 paket programında çözümlenmiş, grafiklerin çiziminde ve kontrol faktörleri etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Tablo 2'de görüleceği üzere T_1 kodlu HSS matkaplarla yapılan 18 delme işleminde de nominal ölçüden 0.1083-0.7187 mm aralığında daha büyük delik çapları elde edilmiştir. 18 adet deliğin çaplarının ortalaması alındığında nominal ölçüden 0.26 mm daha büyük değerlerde delik çapları elde edilmiştir. T_2 kodlu aşınmış HSS matkaplarla delme işleminde de tüm delik çapları nominal ölçü 12 mm'den 0.0124-0.1539 mm (ortalama 0.09 mm) aralığında daha büyük çıkmıştır. T_1 takımla delik çaplarının T_2 takıma göre daha büyük çıkmasının sebebi takımın aşınmamış ve takım geometrisinin bozulmamış olmasıdır. Aşınmış takımlarda oluşan dış köşe aşınması ve küçük değerlerde de olsa marjin (sınır) aşınması sebebiyle matkap çapı daha küçüleceğinden daha düşük çaplı değerler elde edilmiştir [Kim vd., 2015]. Da_1 ve Da_2 için tüm kontrol faktör seviyelerinin ortalama S/N oranı değerleri Tablo 3'te, ortalama yanıt değerleri ise Tablo 4'te sunulmuştur. Sinyal değeri sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri temsil ederken, gürültü faktörü ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil etmektedir [Kuram ve Ozcelik, 2013; Yılmaz ve Güngör, 2010; Ramesh vd., 2016; Taşkesen ve Kütükde, 2013]. S/N oranı analizi, seçilen şartlar altında KLK malzemenin T_1 ve T_2 matkaplarla delinmesi işleminin doğası hakkında önemli bilgiler vermiştir. Kontrol faktörlerinin her

Tablo 2. Kontrol faktörleri ve seviyeleri.

Yeni HSS matkap (T ₁)									
Deney No	Kontrol Faktörleri			Deneysel sonuçlar	S/N Oranı	Taguchi tahmin sonuçları		Doğrusal regresyon denklemleri tahmin sonuçları	
	Dt -	Vc (m/dak)	f (mm/dev)	Ortalama Da ₁	Da ₁ _S/N, (dB)	Da ₁ (mm)	Hata (%)	Da ₁ (mm)	Hata (%)
1	Delme	178	0.07	12.1608	42.90	12.2673	0.88	12.2600	0.82
2	Delme	178	0.111	12.1350	41.99	12.2135	0.65	12.1990	0.53
3	Delme	178	0.156	12.1083	42.93	12.1453	0.31	12.1380	0.25
4	Delme	250	0.07	12.3976	42.53	12.3769	0.17	12.3986	0.01
5	Delme	250	0.111	12.3592	45.16	12.3230	0.29	12.3376	0.18
6	Delme	250	0.156	12.2414	37.99	12.2548	0.11	12.2766	0.29
7	Delme	350	0.07	12.7187	39.58	12.5445	1.37	12.5372	1.43
8	Delme	350	0.111	12.5643	41.15	12.4906	0.59	12.4762	0.70
9	Delme	350	0.156	12.3530	37.95	12.4225	0.56	12.4152	0.50
10	Gagalama	178	0.07	12.1422	39.61	12.1180	0.20	12.1107	0.26
11	Gagalama	178	0.111	12.1362	39.62	12.0641	0.59	12.0497	0.71
12	Gagalama	178	0.156	12.1217	40.01	11.9960	1.04	11.9887	1.10
13	Gagalama	250	0.07	12.1718	41.28	12.2275	0.46	12.2493	0.64
14	Gagalama	250	0.111	12.1607	42.33	12.1736	0.11	12.1883	0.23
15	Gagalama	250	0.156	12.1307	46.13	12.1055	0.21	12.1272	0.03
16	Gagalama	350	0.07	12.3383	34.91	12.3951	0.46	12.3878	0.40
17	Gagalama	350	0.111	12.2506	35.97	12.3413	0.74	12.3268	0.62
18	Gagalama	350	0.156	12.2422	35.66	12.2731	0.25	12.2658	0.19
Ortalamalar				12.2629			0.50		0.49
Aşınmış HSS matkap (T ₂)									
Deney No	Dt -	Vc (m/dak)	f (mm/dev)	Ortalama Da ₂	Da ₂ _S/N, (dB)	Da ₂ (mm)	Hata (%)	Da ₂ (mm)	Hata (%)
1	Delme	178	0.07	12.0426	47.04	12.0477	0.04	12.0546	0.10
2	Delme	178	0.111	12.0174	49.05	12.0263	0.07	12.0387	0.18
3	Delme	178	0.156	12.0124	50.16	12.0160	0.03	12.0228	0.09
4	Delme	250	0.07	12.1268	42.35	12.1138	0.11	12.0945	0.27
5	Delme	250	0.111	12.0990	44.34	12.0923	0.06	12.0787	0.17
6	Delme	250	0.156	12.0719	45.53	12.0821	0.08	12.0628	0.08
7	Delme	350	0.07	12.1293	44.30	12.1277	0.01	12.1345	0.04
8	Delme	350	0.111	12.1056	47.39	12.1062	0.00	12.1186	0.11
9	Delme	350	0.156	12.1028	47.75	12.0959	0.06	12.1028	0.00
10	Gagalama	178	0.07	12.0758	43.98	12.0764	0.00	12.0832	0.06
11	Gagalama	178	0.111	12.0625	43.81	12.0549	0.06	12.0673	0.04
12	Gagalama	178	0.156	12.0553	44.27	12.0447	0.09	12.0515	0.03
13	Gagalama	250	0.07	12.1358	40.41	12.1424	0.05	12.1231	0.10
14	Gagalama	250	0.111	12.1206	39.85	12.1209	0.00	12.1073	0.11
15	Gagalama	250	0.156	12.1079	40.18	12.1107	0.02	12.0914	0.14
16	Gagalama	350	0.07	12.1539	38.64	12.1563	0.02	12.1631	0.08
17	Gagalama	350	0.111	12.1303	41.16	12.1348	0.04	12.1472	0.14
18	Gagalama	350	0.156	12.1236	41.42	12.1246	0.01	12.1314	0.06
Ortalamalar				12.0930			0.04		0.10

birinin farklı seviyelerinde hesaplanan en yüksek ve en düşük S/N oranı değerleri arasındaki farkların daha yüksek ya da az olması Da_1 ve Da_2 üzerindeki etkili faktörlerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Da_1 için en etkili parametreler 5.03 dB, 1.85 dB ve 0.93 dB S/N oranlarıyla sırasıyla kesme hızı, delme tipi ve ilerleme miktarı olmuş iken Da_2 için sırasıyla 4.91 dB, 4.27 dB ve 2.10 dB oranlarıyla, aynı şekilde, kesme hızı, delme tipi ve ilerleme miktarı olmuştur. (Tablo 3, Tablo 4). Tablo 4'te görüleceği üzere T_1 ile delmede Da_1 için optimum değerler Dt2Vc1f3 olarak, T_2 ile delmede Da_2 için optimum değerler Dt1Vc1f3 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Da_1 ve Da_2 'ye ait S/N oranları için yanıt tablosu.

Seviye	T_1 için S/N oranı			Seviye	T_2 için S/N oranı		
	Dt	Vc	f		Dt	Vc	f
1	41.35	41.18	40.14	1	46.44	46.39	42.79
2	39.50	42.57	41.04	2	41.52	42.11	44.27
3		37.54	40.11	3		43.45	44.89
Fark	1.85	5.03	0.93	Fark	4.91	4.27	2.10
Sıralama	2	1	3	Sıralama	1	2	3

Tablo 4. Da_1 ve Da_2 boyutsal tamlıkları için yanıt tablosu.

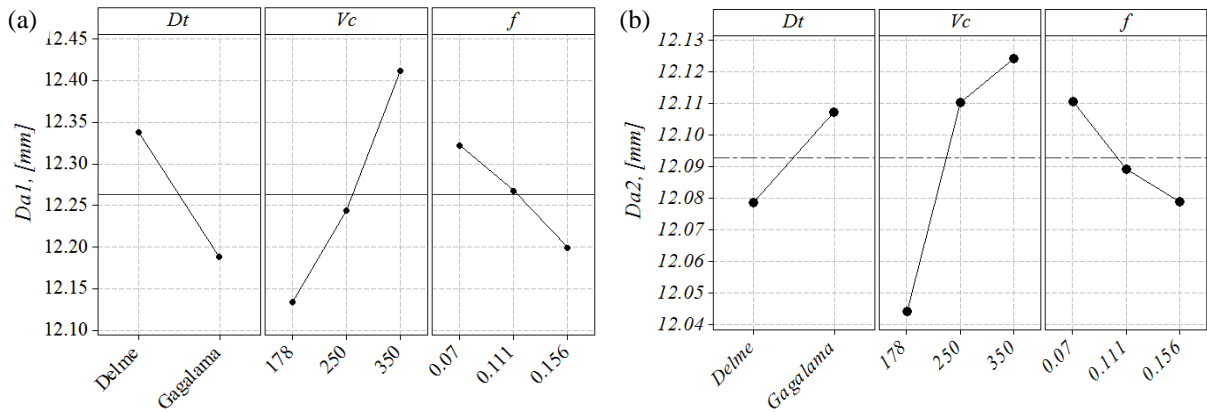
Seviye	T_1 için Da_1			Seviye	T_2 için Da_2		
	Dt	Vc	f		Dt	Vc	f
1	12.34	12.13*	12.32	1	12.08*	12.04*	12.11
2	12.19*	12.24	12.27	2	12.11	12.11	12.09
3		12.41	12.20*	3		12.12	12.08*
Fark	0.15	0.28	0.12	Fark	0.03	0.08	0.03
Sıralama	2	1	3	Sıralama	2	1	3

* Optimum seviye

Kontrol faktörlerinin Da_1 ve Da_2 üzerindeki etkilerini belirten ana etki grafikleri sırasıyla Şekil 3.a ve b'de verilmiştir. Bu grafiklerden görüleceği üzere, T_1 takımla gagalama yöntemiyle delik delme işlemi uygulandığında nominal çap 12 mm'ye daha yakın + yönde daha az sapma gösteren çap değerleri elde edilmiştir (Şekil 3.a). T_2 kodlu aşınmış takımlarla delme yönteminde ise normal delme yöntemiyle nominal ölçüye yakın çap değerleri elde edilmiştir (Şekil 3.b). Gagalama yöntemiyle yapılan delik delme işlemlerinde kesme sırasında oluşan sıcaklık düşmektedir [Bagci ve Özçelik, 2006; Kentli, 2011; Kim vd., 2009]. Bu bağlamda, boyutsal tamlık üzerinde delik delme yönteminin etkisi değerlendirildiğinde; gagalama yöntemiyle delik delmede oluşan sıcaklık daha düşük olacağından ve T_1 kodlu yeni takımlar aşınmamış durumda olduğundan dolayı matkap çapına/nominal çapa yakın değerler elde edilmiştir. Kesme kenar formu deforme olmuş, aşınmış T_2 takımlarla delik delmede delik kalitesi daima kötü çıkmaktadır. Gagalama yöntemiyle delik delme yönteminde matkap delinmiş delik içerisinde birden fazla +Z ve -Z yönünde hareket edeceği için aşınmış T_2 takımlarla delik delme işleminde bu olumsuzluklar normal doğrusal delik delme işlemine göre daha fazla olacak ve nominal çaptan daha büyük delik çap değerleri elde edilecektir (Şekil 3.b). Gagalama yönteminde kesme bölgesinde daha düşük sıcaklıklar oluşmasına rağmen T_2 takımlarla nominal çap değerinden daha büyük değerlerde delik çaplarının elde edilmesinin sebebi yan kenar aşınması ve dış köşe aşınmasına sahip takımın delik eksenini boyunca kademeli ve tekrarlı hareketleriyle delik boyutunun değişmesine atfedilebilir [Kim vd., 2015]. T_2 kodlu takımlarla normal (doğrusal, sürekli delme) delik delme işleminde delik çapı daha az

etkilenecektir. Çünkü, kesici takımın iş parçasına sadece bir giriş ve de bir çıkış hareketi olacaktır.

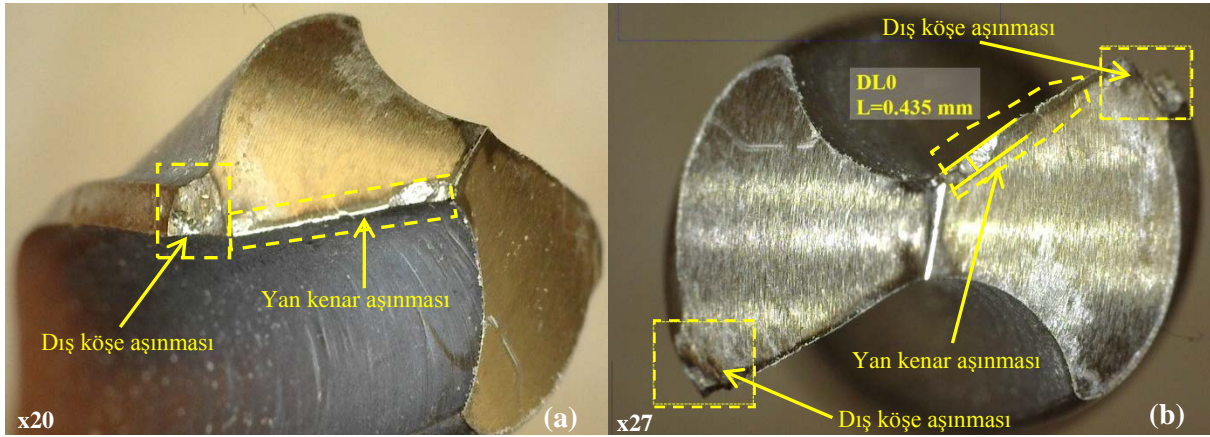
Her iki takımla, en düşük kesme hızında V_c :178 m/dak ve en yüksek ilerleme miktarlarında (f :0.156 mm/dev) delme işlemlerinde nominal çaptan + yöndeki sapma azalarak 12 mm matkap çapına daha yakın değerler elde edilmiştir (Şekil 3.a ve b). Yüksek kesme hızlarında (oluşan matkap aşınmaları ile birlikte) matkap yüksek devirde dönerek kesme yaparken düşük değerlerde ilerleme miktarı ile delmeye devam edilmesi (işlenebilirliği ve talaş transferi iyi olduğu tespit edilen) KLK'nın delinmesi sırasında matkap kesme kenarlarının delik yüzeylerine daha fazla teması sebebiyle delik çaplarının nominal çaptan büyük çıkmasına sebep olmuştur (Şekil 3.a ve b). Yüksek devir sayısı ve düşük ilerleme miktarlarında, sürtünme ısısı nedeniyle kesme sıcaklığı yükselmekte ve bu da daha yüksek değerlerde delik çaplarının oluşmasına neden olmaktadır [Krishnaraj vd., 2012]. Yine, Şekil 3.a ve b'de görüleceği üzere; ilerleme miktarı artışına bağlı olarak nominal çap değerine yakın delik çapları elde edilmiştir. Bunun diğer bir sebebi de delme sırasında oluşan titreşimdir. İlerleme miktarı arttıkça kendiliğinden indüklenen titreşim azalmakta ve delik çapları nominal çapa daha yakın çıkmaktadır [Krishnaraj vd., 2012].



Şekil 3. (a) T₁ ile Da₁ için ana etki grafiği ve (b) T₂ ile Da₂ için ana etki grafiği.

Diğer taraftan, genel olarak yeni ve aşınmış takımlarla nominal çaptan daha büyük delikler elde edilmesinin nedeni KLK'nın malzeme içerik ve özelliklerine de atfedilebilir. KLK paneller reçine esaslı malzemelerdir. Bu paneller birçok tabakadan oluşan sodyum kraft kağıtlarının fenolik reçine ile emprenye edilmesiyle elde edilen, melamin reçinesi emdirilmiş dekoratif kağıtlarla da üst tabakaları oluşturulan, çok tabakalı yapıya sahip malzemelerdir. Bu çoklu tabakalar, 150 °C sıcaklıkta ve 100 kg/cm² basınç altında preslemeyle elde edilirler [AsdLaminat, 2015]. Dolayısıyla, delme işlemi sırasında delme parametrelerinin etkisiyle oluşan itme kuvveti ve sürtünme kaynaklı sıcaklık matkap ucuna temas halindeki tüm malzemenin ve delik duvarlarındaki malzeme bağ yapısının bozulmasına (matris malzemesi reçinenin erimesi ve termoset özellik göstermesi vd.) neden olacaktır. Bu durumda da hem T₁ takım hem de T₂ takım tarafından kaldırılan talaşın alanı nominal delik çapı/matkap çapı alanından daha büyük olacaktır. Yapılan ön takım ömrü-aşınma deneylerinde, özellikle yüksek kesme hızlarında yapılan deneylerde HSS takımların hızlı aşındığı ve özellikle yan kenar aşınması [Kim vd., 2015] ve dış köşe aşınması aşınmaları nedeniyle delik çapı ve kalitesinin de bozulduğu görülmüştür (Şekil 4 a ve b). T₂ takımlarla nominal çapa daha yakın,

daha küçük delik çaplarının elde edilmesinin sebebi takımların aşınmış olmasıdır [Kim vd., 2015].



Şekil 4. T₂ takımında görülen aşınma tipleri. (a) Matkap aşınmalarının açılı görüntüsü, (b) Matkap aşınmalarının üstten görünümü.

Seçilen performans/kalite karakteristiklerine kontrol faktörlerinin etkilerini belirlemek için L₁₈ ortogonal dizideki her bir deney için % 95 güven aralığında varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Da_1 ve Da_2 için yapılan ANOVA sonuçları Tablo 5'te sunulmuştur. Tablo 5.a'da görüleceği üzere Da_1 üzerinde en etkili faktör %48.9 katkı oranıyla kesme hızı olmuştur. Kesme hızını %20.1 ve %9.4 katkı oranları ile sırasıyla; delme tipi ve ilerleme miktarı takip etmiştir. Benzer şekilde, Da_2 üzerinde en etkili faktör %74.3 katkı oranıyla kesme hızı olmuştur. Kesme hızını %12.5 ve %10.7 katkı oranları ile sırasıyla delme tipi ve ilerleme miktarı takip etmiştir (Tablo 5.b). Tablo 5'te verilen ANOVA sonuçları, Tablo 3, Tablo 4 ve Şekil 3'ü desteklemektedir. Da_1 ve Da_2 için optimal tahminsel boyutsal tamlık Da_{1_opt} ve Da_{2_opt} Tablo 5.a ve b'de verilen varyans analizlerinde etkili faktörlerin belirlenmesi ($P < 0.05$) ve yine Tablo 4'ten Da_1 ve Da_2 için kontrol faktörlerinin optimum kombinasyonları $Dt_2Vc_1f_3$ ve $Dt_1Vc_1f_3$ dikkate alınarak sırasıyla Da_{1_opt} :12.0571 mm ve Da_{2_opt} :12.014 mm olarak hesaplanmıştır [Montgomery, 2013; Roy, 1990].

Tablo 5. Da_1 ve Da_2 için varyans analizleri.

(a) Da_1 için varyans analizi						
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	% Katkı
Dt	1	0.10036	0.100362	12.13	0.005	20.1*
Vc	2	0.23378	0.116892	14.13	0.001	48.9*
f	2	0.04487	0.022434	2.71	0.107	9.4
Hata	12	0.09929	0.008274			20.8
Toplam	17	0.47830				100
$R^2 = \%79.2$, *Anlamlı etkisi olan delme parametresi						
(b) Da_2 için varyans analizi						
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	% Katkı

Dt	1	0.003690	0.003690	60.20	0.000	12.5*
Vc	2	0.021874	0.010937	178.43	0.000	74.3*
f	2	0.003144	0.001572	25.65	0.000	10.7*
Hata	12	0.000736	0.000061			2.5
Toplam	17	0.029444				100
$R^2 = \%97.5$ *Anlamlı etkisi olan delme parametresi						

Doğrulama deneyleri Da_1 ve Da_2 kalite karakteristiklerini belirlemek için güven aralıkları sırasıyla CI_{Da_1} :0.12 mm ve CI_{Da_2} :0.011 mm olarak hesaplanmıştır. % 95 güven seviyesinde T_1 ile delmede Da_1 boyutsal tamlık için doğrulama deneylerinin 12.0571 ± 0.12 mm ya da 11.9371-12.1771 mm aralığında olması beklenmiştir. Kontrol faktörlerinin $Dt_2Vc_1f_3$ şeklinde belirlenen optimum seviyelerinin Tablo 2'deki 12 nolu deneyin parametre seviyeleri ile aynı olduğu görülmektedir. 12 nolu deneyin yapılmasıyla elde edilmiş boyutsal tamlık Da_1 :12.1217 mm'dir. Taguchi metodu ile bu Da_1 :12.0571 mm olarak hesaplanmıştır. Kontrol faktörlerinin optimum seviyesinde elde edilmiş bu değer güven aralığının hesaba katılmasıyla elde edilen üst sınır ve alt sınır boyutsal tamlık değerleri içerisinde kalmaktadır. Bu nedenle, % 95 güven seviyesinde TM kullanılarak Da_1 için sistem optimizasyonu sağlanmıştır. KLK malzemenin seçilen kesme şartları aralığında T_1 takımla delinmesinde genel olarak ortalama 12.2629 mm boyutsal tamlıkta çap değeri elde edilebilmiştir. Ancak, bu çalışmada tespit edilen optimal kontrol faktörü seviyeleri ile T_1 takımla delmede Da_1 :12.0571 mm çap değerleri elde edilerek boyutsal tamlık değerleri iyileştirilmiştir.

Aynı şekilde, % 95 güven seviyesinde T_2 ile delmede Da_2 boyutsal tamlık için doğrulama deneylerinin 12.014 ± 0.011 mm ya da 12.003-12.025 mm aralığında olması beklenmiştir. Kontrol faktörlerinin $Dt_1Vc_1f_3$ şeklinde belirlenen optimum seviyelerinin Tablo 2'deki 3 nolu deneyin parametre seviyeleri ile aynı olduğu görülmektedir. 3 nolu deneyin yapılmasıyla elde edilmiş boyutsal tamlık değeri; Da_2 :12.1083 mm'dir. TM ile bu boyutsal tamlık değeri Da_2 :12.014 mm olarak hesaplanmıştır. Kontrol faktörlerinin optimum seviyesinde elde edilmiş bu değer güven aralığının hesaba katılmasıyla elde edilen üst sınır ve alt sınır boyutsal tamlık değerleri içerisinde ($12.003 \text{ mm} < 12.014 \text{ mm} < 12.025 \text{ mm}$) kalmaktadır. KLK malzemenin seçilen tüm kesme şartları aralığında T_2 takımla delinmesinde ortalama 12.0930 mm boyutsal tamlıkta çap değerleri elde edilebilmektedir. Ancak, bu çalışmada tespit edilen optimal kontrol faktörü seviyeleri T_2 takımla delmede Da_2 :12.014 mm çap değerleri elde edilerek boyutsal tamlık iyileştirilmiştir.

3.2. Gri İlişkisel Analiz Kullanarak Çok Amaçlı Optimizasyon

Bu çalışmanın diğer bir amacı da KLK'nın T_1 hem de T_2 matkaplarla delinmesinde boyutsal tamlığın aynı anda sağlanabilmesi için delme parametrelerinin optimum kombinasyonlarını belirlemektir. Bu amaca ulaşmak için Gri İlişkisel Analiz (GİA) yöntemi kullanılmış ve bu yöntemin adımları takip edilmiştir.

3.2.1. Verilerin normalize edilmesi

Gri ilişkisel analizinin ilk adımı performans yanıtı türüne göre deneysel verileri (0 ve 1 arasında aralığında) normalize etmektir. L18 ortogonal dizi kullanılarak yapılan deneylerin sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Dolayısıyla, Tablo 2'de verilen Da_1 ve Da_2 boyutsal tamlık

deneysel sonuçlarının 0-1 aralığında normalize edilmesi gerekmektedir. Delme parametrelerinin farklı seviyelerinde gerçekleştirilen ön deneyler dahil KLK malzemenin T_1 ve T_2 takımlarla delinmesinde nominal değerden yüksek değerlerde çap değerleri elde edilmiştir. Bu nedenle, delik delme işleminde nominal çaptan büyük çap değerleri yerine nominal çaplarda ya da yakın delik çapı değerleri elde etmek için optimizasyon işlemi "daha küçük daha iyi" yaklaşımına göre gerçekleştirilmiştir. Delik çaplarının boyutsal tamlığı için normalizasyon Denklem 1 yardımıyla gerçekleştirilmiştir [Kuram ve Ozcelik, 2013; Yılmaz ve Güngör, 2010; Ramesh vd., 2016; Taşkesen ve Kütükde, 2013].

$$x_i(k) = \frac{\max |x_i^0(k)| - |x_i^0(k)|}{\max |x_i^0(k)| - \min |x_i^0(k)|} \quad (1)$$

$x_i^0(k)$, i serisi k . sıradaki orijinal değer $x_i^0(k)$ normalizasyon sonrası i . seri k . sıradaki değer, $\min x_i^0(k)$ i serideki minimum değer, $\max x_i^0(k)$ i serideki maksimum değerdir [Yılmaz ve Güngör, 2010]. Normalizasyon işleminden sonra işlenen veriler Tablo 6'da sunulmuştur. Daha büyük normalize sonuçlar daha iyi performans anlamına gelmektedir [Kuram ve Ozcelik, 2013; Yılmaz ve Güngör, 2010; Ramesh vd., 2016; Taşkesen ve Kütükde, 2013].

3.2.2. Gri ilişkisel katsayısının hesaplanması

İdeal ve gerçek deneysel sonuçlar arasındaki ilişkiyi ifade etmek için gri ilişkisel katsayısı (ε) Denklem 2 yardımıyla hesaplanmıştır [Kuram ve Ozcelik, 2013; Yılmaz ve Güngör, 2010; Ramesh vd., 2016; Taşkesen ve Kütükde, 2013]:

$$\varepsilon(k) = \frac{\min_j \min_k |x_0(k) - x_j(k)| + \xi \max_j \max_k |x_0(k) - x_j(k)|}{|x_0(k) - x_j(k)| + \xi \max_j \max_k |x_0(k) - x_j(k)|} \quad (2)$$

Yukarıdaki denklemde $\varepsilon(k)$, k . noktadaki gri ilişkisel katsayı, x_0 referans serisi, $j:1, 2, \dots, n$; $k:1, 2, \dots, m$ olmak üzere n deneysel veri sayısı, m gözlenen performans karakteristiği sayısını göstermektedir. Ayırt edici katsayı ξ ile gösterilir, $0 < \xi < 1$ aralığında tanımlanır ve genellikle 0.5 alınır [Taşkesen ve Kütükde, 2013]. Bu çalışmada $\xi:0.5$ alınmış ve Denklem 2 kullanılarak hesaplanan gri ilişkisel katsayılar Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Taguchi L18 ortogonal dizi, normalize değerler, gri ilişkisel katsayıları ve gri ilişkisel dereceleri.

Deney No	Kontrol faktörü seviyeleri			Deneysel Sonuçlar		Normalizasyon		Gri ilişkisel derece katsayı		Gri ilişkisel derece	GİA'ya göre en iyi sıralama
	Dt	Vc	f	Da_1 (mm)	Da_2 (mm)	Da_1	Da_2	Da_1	Da_2		
1	Delme	178	0.07	12.1608	12.0426	0.914	0.787	0.853	0.701	0.777	4
2	Delme	178	0.111	12.1350	12.0174	0.956	0.965	0.920	0.934	0.927	2
3	Delme	178	0.156	12.1083	12.0124	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1
4	Delme	250	0.07	12.3976	12.1268	0.526	0.192	0.513	0.382	0.448	16
5	Delme	250	0.111	12.3592	12.099	0.589	0.388	0.549	0.450	0.499	13
6	Delme	250	0.156	12.2414	12.0719	0.782	0.580	0.696	0.543	0.620	9
7	Delme	350	0.07	12.7187	12.1293	0.000	0.174	0.333	0.377	0.355	18

8	Delme	350	0.111	12.5643	12.1056	0.253	0.341	0.401	0.432	0.416	17
9	Delme	350	0.156	12.353	12.1028	0.599	0.361	0.555	0.439	0.497	14
10	Gagalama	178	0.07	12.1422	12.0758	0.944	0.552	0.900	0.527	0.714	6
11	Gagalama	178	0.111	12.1362	12.0625	0.954	0.646	0.916	0.585	0.751	5
12	Gagalama	178	0.156	12.1217	12.0553	0.978	0.697	0.958	0.623	0.790	3
13	Gagalama	250	0.07	12.1718	12.1358	0.896	0.128	0.828	0.364	0.596	10
14	Gagalama	250	0.111	12.1607	12.1206	0.914	0.235	0.853	0.395	0.624	8
15	Gagalama	250	0.156	12.1307	12.1079	0.963	0.325	0.932	0.426	0.679	7
16	Gagalama	350	0.07	12.3383	12.1539	0.623	0.000	0.570	0.333	0.452	15
17	Gagalama	350	0.111	12.2506	12.1303	0.767	0.167	0.682	0.375	0.529	12
18	Gagalama	350	0.156	12.2422	12.1236	0.781	0.214	0.695	0.389	0.542	11

3.2.3. Gri ilişkisel derecenin hesaplanması

Gri ilişkisel derece $\gamma(x_0, x_i)$ gri bir sistemdeki x_i serisi ile x_0 referans serisi arasındaki geometrik benzerliğin bir ölçüsü olup seriler arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Gri ilişkisel derece değeri büyük ise x_i ile x_0 arasında kuvvetli bir ilişki var demektir. Gri ilişkisel derece gri ilişki katsayısı ile kriterin önem derecesine ilişkin ağırlık değeri çarpılarak hesaplanır (Denklem 3).

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon(x_0(k), x_i(k) \cdot W_i(k)) \quad (3)$$

Eğer karşılaştırılan iki seri birbirinin aynı ise gri ilişkisel derece değeri 1 olarak bulunur [Kuram ve Ozelik, 2013; Yılmaz ve Güngör, 2010; Ramesh vd., 2016; Taşkesen ve Kütükde, 2013]. Tablo 6'da görüleceği üzere 3 nolu deneyde T_1 takım ile elde edilen Da_1 ve T_2 takım ile elde edilen Da_2 değerleri arasında kuvvetli bir ilişki tespit edilmiştir.

3.2.4. Gri ilişkisel derece sıralama

En yüksek gri ilişkisel derece 1. sıra olarak atanır. Gri ilişkisel derece Denklem 3 ile hesaplanmış ve gri ilişkisel sıralama Tablo 6'da sunulmuştur. 3 nolu deneyde en yüksek gri ilişkisel derecenin hesaplanmıştır. Tablo 6'da görüleceği üzere, 3 nolu deneyin delme şartlarında; $Dt_1 Vc_1 f_3$ (Dt :Delme, Vc :178 m/dak, f :0.156 mm/dev) hem yeni (T_1) hem de aşınmış (T_2) HSS matkaplarla nominal delik çapı 12 mm'ye en yakın çap değerleri elde edilmiştir.

3.2.5. Gri ilişkisel derece için varyans analizi

Gri ilişkisel derece için varyans analizi sonuçları Tablo 7'de sunulmuştur. Gri ilişkisel derece üzerinde anlamlı etkisi olan faktörler ($P < 0.05$) "*" ile belirtilmiştir. Tablo 7'de gri ilişkisel derece üzerinde en etkili faktör %76.58 katkı oranıyla kesme hızı olmuştur. Kesme hızını %9.61 katkı oranları ile ilerleme miktarı takip etmiştir. Delme tipinin gri ilişkisel derece üzerinde anlamlı etkisi tespit edilmemiştir.

Tablo 7. Gri ilişkisel derece için varyans analizi

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	% Katkı
<i>Dt</i>	1	0.001045	0.001045	0.17	0.686	0.19
<i>Vc</i>	2	0.410214	0.205107	33.75	0.000	76.58*
<i>f</i>	2	0.051497	0.025748	4.24	0.041	9.61*
Hata	12	0.072931	0.006078			13.62
Toplam	17	0.535686				100

$R^2 = \%86.39$, *Anlamlı etkisi olan delme parametresi

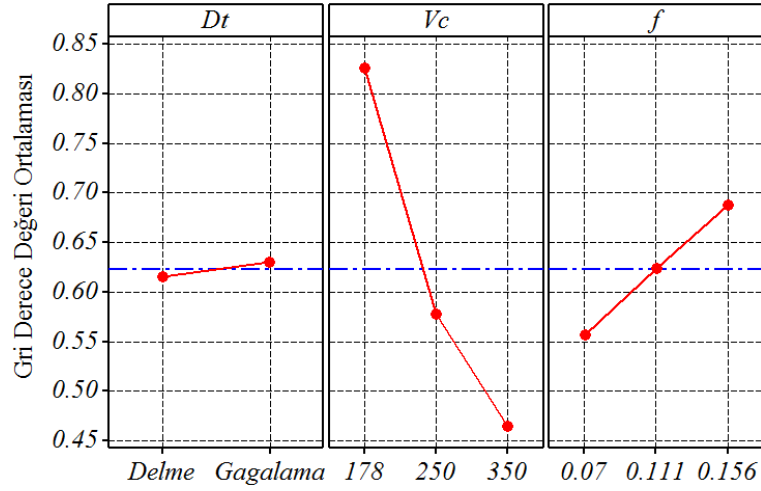
3.2.6. Kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinin seçilmesi

Gri ilişkisel derece için yanıt tablosu Tablo 8'de verilmiştir. Kontrol faktörünün her bir seviyesi için hesaplanmış daha yüksek gri ilişkisel derece değeri kontrol faktörlerinin optimal seviyesini göstermektedir. Buna göre kontrol faktörlerinin optimal seviyeleri; $Dt_2Vc_1f_3$ (Dt :Gagalama ile delme, Vc :178 m/dak ve f :0.156 mm/dev) ile hem yeni (T_1) ve hem de aşınmış (T_2) HSS matkap ile KKK malzemelerin delinmesinde nominal delik çapı 12 mm'ye daha yakın değerler elde edilmiştir. Kontrol faktörlerinin etki sıralaması incelendiğinde gri ilişkisel derece üzerinde en etkili parametreler Tablo 7'de verilen ANOVA sonuçlarını destekler şekilde kesme hızı, ilerleme miktarı ve delme tipi olmuştur. Tablo 8'de verilen gri ilişkisel derece yanıt tablosu sonuçları Şekil 5'te verilen gri ilişkisel derece ortalaması için ana etkiler grafiğini desteklemektedir. Gri ilişkisel derece üzerinde en etkili faktörler sırasıyla kesme hızı ve ilerleme miktarı olup delme tipinin belirgin etkisi gözlenmemiştir. En düşük kesme hızı ve en yüksek ilerleme miktarlarında gri ilişkisel derece değerleri artmıştır.

Tablo 8. Gri ilişkisel derece için yanıt tablosu

Kontrol faktörleri	Seviyeler			Fark	Sıralama
	1	2	3		
Delme tipi (<i>Dt</i>)	0.615	0.631	-	0.016	3
Kesme hızı (<i>Vc</i> , m/dak)	0.826	0.578	0.465	0.361	1
İlerleme miktarı (<i>f</i> , mm/dev)	0.557	0.624	0.688	0.131	2

Gri ilişkisel derece ortalaması=0.623
Koyu değerler optimal seviyeleri göstermektedir.



Şekil 5. Gri ilişkisel derece ortalaması için ana etkiler grafiği

3.3. Tahminsel Denklemler

KLK'yi T_1 takım ile delmede tahminsel Da_1 'i ve T_2 ile delmede tahminsel Da_2 'yi tahmin etmek için lineer regresyon analizi ile kontrol faktörlerinin ana etkilerini içeren denklemler sırasıyla 4 ve 5 nolu denklemlerde sunulmuştur. Denklemler her bir kontrol faktörünün seviyelerini gösteren kodlanmış değerlere (1, 2 ve 3) göre geliştirilmiştir. Kontrol faktörlerinin farklı seviyelerinde tahminsel Da_1 ve Da_2 değerlerini elde etmek için denklemlerde Dt , Vc ve f yerine kontrol faktörlerinin seviyelerini gösteren 1, 2 ya da 3 değerleri konulmalıdır.

$$Da_1 = 12.3 - 0.149Dt + 0.139Vc - 0.0610f \quad (4)$$

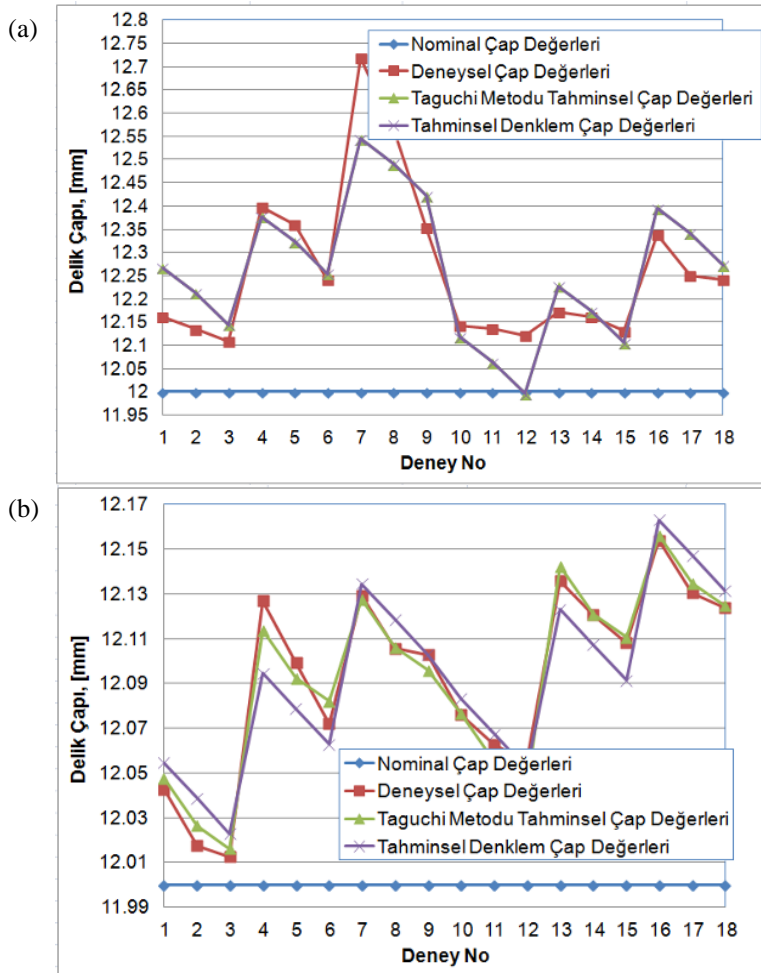
$$Da_2 = 12.0 - 0.0286Dt + 0.040Vc - 0.0159f \quad (5)$$

KLK'nın T_1 takımlar ile delinmesinde boyutsal tamlığı tahmin etmek için geliştirilen birinci dereceden denklemlerin korelasyon katsayısı; $R^2=0.785$ olarak hesaplanmıştır. T_2 takımlar ile delmede ise boyutsal tamlığı tahmin etmek için geliştirilen birinci dereceden tahminsel denkleminin korelasyon katsayısı ise; $R^2=0.878$ olarak hesaplanmıştır. Geliştirilen denklemlerin korelasyon katsayıların yüksek çıkması denklemlerin güvenilirliğini yansıtmaktadır [Roy, 1990].

3.4. Tahminsel Sonuçların Karşılaştırılması

KLK malzemenin T_1 takımlarla delinmesinde elde edilen deneysel Da_1 değerleri ile geliştirilen birinci dereceden denklemlerle elde edilen Da_1 tahminsel boyutsal tamlık değerlerinin karşılaştırılması Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo 2'den; deneysel boyutsal tamlık (Da_1) sonuçlarıyla TM tahminsel sonuçları arasında artıkların aynı olduğu ve hata oranının % 0.50 hesaplandığı görülmektedir. Diğer taraftan, deneysel boyutsal tamlık (Da_1) sonuçlarıyla tahminsel denklem sonuçları arasındaki farklar hata ortalaması olarak % 0.49 oranında

hesaplanmıştır. Geliştirilen denklemle elde edilen tahminsel sonuçların deneysel sonuçlara yakın çıkarak artıkların hata oranının % 1'den daha düşük hesaplanması geliştirilen denklemin tahmin yeteneğinin yüksek olduğunu ve boyutsal tamlığın % 95 güven seviyesinin üzerinde tahmin edilebildiğini göstermektedir [Roy, 1990]. Tablo 2'de T_1 ve T_2 takımla gerçekleştirilen 18'er adet deneyler için delik çaplarının ölçüm sonuçları, Taguchi metodu tahminsel sonuçları ve birinci dereceden denklemin tahminsel sonuçlarının 12 mm nominal delik ölçüsü referans alınarak karşılaştırılması Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6.a'dan TM ve tahminsel denklem sonuçlarının birbirine yakın olduğu ve hesaplanmış tahminsel değerlerin nominal ölçüye daha yakın seyrettiği görülmektedir. 7 nolu deneyde nominal çap değerinden + yönde olmak üzere maksimum sapma ile en büyük delik çapı ölçülmüştür. Diğer taraftan Tablo 2'de verilen sonuçları da destekler şekilde 12 nolu deneydeki delme parametreleri ile nominal ölçüye daha yakın tahminsel çap değerleri elde edilmiştir (Şekil 6.a). Şekil 6.b'de 4, 7, 13 ve 16 nolu deneylerde nominal çap değerlerinden uzaklaşıldığı, TM ve birinci dereceden denklem tahminsel çap değerlerinin deneysel çap değerlerine daha yakın olduğu görülmektedir. Yine, Şekil 6'dan yeni 12 mm çapındaki T_1 kodlu matkaplarla KLK malzemenin delinmesinde 12.10-12.72 mm çap aralığında, aynı çaptaki aşınmış T_2 kodlu matkaplarla ise 12.01-12.16 mm çap aralığında delik çaplarının elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6. Nominal çapa göre deneysel, Taguchi Metodu ve geliştirilen denklem tahminsel denklemlerle elde edilen boyutsal tamlık sonuçlarının karşılaştırılması. (a) T_1 takımlarla KLK malzemenin delinmesi, (b) T_2 takımlarla KLK malzemenin delinmesi.

4. Sonuçlar

Kompakt laminat kompozit malzemenin yeni ve aşınmış HSS matkaplarla delinmesinde deliklerin boyutsal tamlığı üzerinde delme parametreleri olarak seçilen delme tipi (Dt), kesme hızı (Vc) ve ilerleme miktarı (f) etkilerinin araştırıldığı ve optimize edildiği bu deneysel çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Kompakt laminant malzemelerin yeni takımlarla delinmesinde ortalama 12.101 mm-12.719 mm aralığında Da boyutsal tamlık değeri elde edilmiş iken aşınmış takımlarla 12.012 mm-12.154 mm aralığında Da değerleri elde edilmiştir.
- Yeni takımlarla KLK'nın delinmesinde nominal delik çapına daha yakın (boyutsal tamlık) deliklerin elde edilmesinde en etkili parametreler sırasıyla; kesme hızı (%48.9), delme tipi (%20.1) ve ilerleme miktarıdır (%9.4). Aşınmış takım için ise bu etki sırası kesme hızı (%74.3), delme tipi (%12.5) ve ilerleme miktarı (%10.7) şeklindedir. Her iki takımla delmede de boyutsal tamlık üzerinde en etkili parametre kesme hızıdır.
- Her iki takımla, en düşük kesme hızında Vc :178 m/dak ve en yüksek ilerleme miktarlarında (f :0.156 mm/dev) delme işlemlerinde nominal çaptan + yöndeki sapma azalarak 12 mm matkap çapına daha yakın değerler elde edilmiştir.
- Yeni ve aşınmış HSS matkaplarla KLK'nın delinmesinde boyutsal tamlığı tahmin etmek için birinci dereceden tahminsel denklemler geliştirilmiş ve geliştirilen bu denklemlerin korelasyon katsayısı sırasıyla 0.785 ve 0.878 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu korelasyon katsayılarının yüksek çıkması geliştirilen denklemlerin güvenilirliğini yansıtmaktadır.
- Deneysel sonuçlar ile TM ve ikinci dereceden regresyon denklemleriyle elde edilen sonuçlar kıyaslandığında, TM ile deneysel değerler arasındaki farklar düşük olduğundan dolayı çalışmada kestirim gücü daha yüksek olan metot TM belirlenmiştir.
- KLK'nın HSS matkaplarla delinmesinde Da_1 ve Da_2 çoklu performans karakteristikleri Gri İlişkisel Analiz yaklaşımı kullanılarak oldukça iyi bir şekilde geliştirilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen veri tabanı ve bulgular endüstride özellikle yapı donatı ve mobilya ve dekorasyon işlemlerinde oldukça yoğun bir şekilde kullanılan kompakt laminat kompozitlerin işlenebilirliğinin tanımlanmasına katkı sağlamıştır. Böylelikle endüstriyel uygulamalarda ihtiyaç duyulan bilgiler sağlanarak literatürdeki eksiklik giderilmiştir. Endüstriyel uygulamalarda oldukça mükemmel sonuçlar elde edilmiştir. Bu deneysel çalışma kompakt laminat kompozit malzemeler üzerine yapılan kapsamlı bir işlenebilirlik çalışmasının sadece belirli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu çalışmanın yanı sıra kompakt laminat kompozitlerin işlenmesinde delaminasyon oluşumu, dairesellik hatası, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve takım ömrü çoklu performans karakteristikleri de araştırılmıştır. Bu çalışmanın devamında KLK malzemenin konvansiyonel ve geleneksel olmayan yöntemlerle işlenmesi de araştırılacaktır.

5. Kaynaklar

Ali, H.M., Iqbal, A., Liang L. (2013). A Comparative Study on the Use of Drilling and Milling Processes in Hole Making of GFRP Composite. Sadhana, 38, 4, 743–760.

- Ameur, M. F., Habak, M., Kenane, M., Aouici, H., Cheikh M. (2017). Machinability Analysis of Dry Drilling of Carbon/Epoxy Composites: Cases of Exit Delamination and Cylindricity Error. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 9, 2557-2571.
- AsdLaminat. "Compact Laminat Teknik Değerler".
<http://www.asdlaminat.com/dosya/tds/compact-laminat-teknik-degerler-tr.pdf> (01.012.2015).
- Babu, J., Sunny, T. (2013). Optimization of Process Parameters in Drilling of GFRP Composites Drilled by An End Mill. *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*, 1, 1, 16-23.
- Bağcı, E., Ozcelik, B. (2006). Investigation of the Effect of Drilling Conditions on The Twist Drill Temperature during Step-By-Step and Continuous Dry Drilling. *Materials and Design*, 27, 6, 446–454.
- Bajpai, P.K., Debnath, K., Singh, I. (2017). Hole Making in Natural Fiber-Reinforced Poly(lactic Acid) Laminates: An Experimental Investigation. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 30, 1, 30–46.
- Durão, L.M.P., Gonçalves, D.J.S., Tavares, J.M.R.S., Albuquerque, V.H.C. (2010). Drilling Tool Geometry Evaluation for Reinforced Composite Laminates. *Composite Structures*, 92, 1545-1550.
- Feito, N., Diaz-Álvarez, J., López-Puente, J., Miguelez, M.H. (2016). Numerical Analysis of the Influence of Tool Wear and Special Cutting Geometry when Drilling Woven CFRPs. *Composite Structures*, 138, 285–294.
- Kentli, A. (2011). Experimental Study on Peck Drilling of GFRP and Prediction of Drilling-Induced Damage using ANN. *Scientific Research and Essays*, 6, 7, 1546-1554.
- Khashaba, U.A., El-Sonbaty, I.A., Selmy, A.I., Megahed, A.A. (2010). Machinability Analysis in Drilling Woven GFR/Epoxy Composites: Part I–Effect of Machining Parameters. *Composites: Part A*, 41, 391–400.
- Kim, D., Beal, A., Kwon, P. (2015). Effect of Tool Wear on Hole Quality in Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic–Titanium Alloy Stacks Using Tungsten Carbide and Polycrystalline Diamond Tools. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138, 3, doi: 10.1115/1.4031052.
- Krar, F.S., Rapisarda, M., Check, F.A. (1998). *Machine Tool and Manufacturing Technology*. U.S.A. Delmar Publishers.
- Krishnaraj, V., Prabukarthi, A., Ramanathan, A., Elanghovan, N., Senthil Kumar, M., Zitoune, R., Davim, J.P. (2012). Optimization of Machining Parameters at High Speed Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Laminates. *Composites: Part B*, 43, 1791–1799.
- Krishnaraj, V., Zitoune, R., Collombet, F. (2012). Study of Drilling of Multi-Material (CFRP/Al) Using Taguchi and Statistical Techniques. *Usak University Journal of Material Sciences*, 2, 95-109.

- Kuram, E., Ozcelik, B. (2013). Multi-Objective Optimization Using Taguchi Based Grey Relational Analysis for Micro-Milling of Al 7075 Material with Ball Nose End Mill. *Measurement*, 46, 1849–1864.
- Madhavan, S., Narayanan, T. L., Anant, K. A. (2011). 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.
- Marilena, C.S., Dorel, A., Cristina, M., Daniel, S. (2011). Defects in Composite Material Caused by Drilling in Manufacturing Process. *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*, 11, 1-2, 27-29.
- Mervin, A.H., Divakara, S., Raviraj, S., Shivamur, B. (2013). 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.
- Montgomery, D.C. (2013). *Design and Analysis of Experiment*. New York. Wiley.
- Puhan, D., Mahapatra, S.S., Sahu, J., Das, L. (2013). A Hybrid Approach for Multi-Response Optimization of Non-Conventional Machining on AlSiCp MMC. *Measurement*, 46, 9, 3581-3592.
- Ramesh, B., Elayaperumal, A., Balaji, D.A., Rakesh N. (2013). 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.
- Ramesh, S., Viswanathan, R., Ambika, S. (2016). Measurement and Optimization of Surface Roughness and Tool Wear via Grey Relational Analysis, TOPSIS and RSA Techniques. *Measurement*, 78, 63–72.
- Roy, R.K. (1990). *A Primer on the Taguchi Method*. Competitive Manufacturing Series. New York. Van Nostrand Reinhold.
- Shahrajabian, H., Hadi, M., Farahnakian M. (2012). Experimental Investigation of Machining Parameters on Machinability of Carbon Fiber/Epoxy Composites. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 3, 3, 30-36.
- Taşkesen, A., Kütükde, K. (2013). Experimental Investigation and Multi-Objective Analysis on Drilling of Boron Carbide Reinforced Metal Matrix Composites Using Grey Relational Analysis. *Measurement*, 47, 321–330.
- Tonshoff, H.L., Spintig, W., Konig, W., Neises, A. (1994). Machining of Holes Developments in Drilling Technology. *Annals of the CIRP*, 43, 551-560.
- Valarmathi, T.N., Palanikumar, K., Sekar, S. (2013). Parametric Analysis on Delamination in Drilling of Wood Composite Panels. *Indian Journal of Science and Technology*, 6, 4, 4347-4356.

- Wang, C-Y., Chen, Y-H., Long, Q., Cai, X-J., Ming, W-W., Chen, M. (2015). Drilling Temperature and Hole Quality in Drilling of CFRP/Aluminum Stacks Using Diamond Coated Drill. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16, 8, 1689–1697.
- Xu, J., An, Q., Cai, X., 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.
- Yılmaz, E., Güngör, F. (2010). Gri İlişkisel Analiz Yöntemine Göre Farklı Sertliklerde Optimum Takım Tutucunun Belirlenmesi. II. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, 1-9, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.