



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Laminat Kompozitin Cep Frezelenmesinde Yüzey Pürüzlülüğü Ve Boyutsal Tamlığın Değerlendirilmesi

Ali Rıza MOTORCU<sup>a,\*</sup>, Tuncay BİLGE<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Malzeme ve Malzeme İşleme Teknolojileri Bölümü, Çanakkale Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: armotorcu@comu.edu.tr

### ÖZET

Bu çalışmada, laminat kompozitler üzerine cep işlemede kontrol faktörlerinin (takım yolu stratejisi, takım tipi ve malzemesi, kesme hızı, ilerleme miktarı, kesici takımın yana kayma mesafesi) yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal tamlık üzerindeki ana etkileri, % katkıları ve optimum değerleri Taguchi Metodu, ana etki grafikleri, Varyans analizi ve Gri İlişkisel Analiz yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametreler sırasıyla kesici takım geometri ve malzemesi (% 70.90), kesme hızı (%9.40) ve yana kayma mesafesi (%8.20) olmuştur. Aynı şekilde, boyutsal tamlık üzerinde de kesici takım tipi ve malzemesinin (%99.35) anlamlı bir etkisi gözlemlenmiş iken diğer parametrelerin toplam etkisi % 1'in altında kalmıştır. Hem minimum yüzey pürüzlülüğü ve hem de nominal ölçülere daha yakın boyutsal tamlıkta cepler elde etmek için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri; TPS<sub>2</sub>:Doğrusal cep işleme, Ct<sub>3</sub>:Yuvarlak uçlu helisel HSS parmak freze, Vc<sub>3</sub>:350 m/dak, f<sub>2</sub>:0.011 mm/dev ve SO<sub>1</sub>:3 mm olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan, kompozit laminatlar üzerine cep işlemede yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal tamlık üzerinde karbür takımların performansı zayıf bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Laminat kompozit, Cep frezeleme, Boyutsal tamlık, Yüzey pürüzlülüğü, Taguchi metodu, Gri İlişkisel Analiz

## Evaluation of Surface Roughness and Dimensional Accuracy in the Pocket Milling of Laminated Composite

### ABSTRACT

In this study, the main effects, % additions and optimum values of control factors (tool path strategy, tool type and material, cutting speed, feed rate, step over) on surface roughness and dimensional accuracy were determined by using Taguchi Method, main effect graphs, Variance analysis and Gray Relational Analysis method in pocket machining on laminate composites. According to the study results, the most effective parameters on the surface roughness were cutting tool type and material (70.90%), cutting speed (9.40%) and

step over (8.20%), respectively. Likewise, a significant effect of cutting tool type and material (99.35%) was observed on the dimensional accuracy, while the total effect of other parameters remained below 1%. Optimum levels of control factors to achieve both minimum surface roughness and dimensional accuracy closer to the nominal size were determined as  $TPS_2$ :Linear pocket machining,  $Ct_3$ :Rounded edge helical HSS end mill,  $Vc_3$ :350 m/min,  $f_2$ :0.011 mm/rev and  $SO_1$ :3 mm. On the other hand, the performance of the solide carbide tools on the surface roughness and dimensional accuracy in pocket milling on the laminated composite was found to be poor.

**Keywords:** *Laminated composite, Pocket milling, Dimensional accuracy, Surface roughness, Taguchi method, Gray Relation Analysis*

## I. GİRİŞ

**K**ompozit malzemelerin kullanımı düşük ağırlık, yüksek dayanım, düşük termal genleşme katsayısı ve korozyona karşı yüksek direnç gibi üstün malzeme özelliklerinden dolayı giderek artmaktadır. Delik delme, kenar/yüzey frezeleme, kanal açma ve cep frezeleme gibi talaş kaldırma işlemleri, kompozit malzemelere son şeklini vermek için hâlâ gereklidir. Delme ve frezeleme işlemleri, laminat kompozitlerin (LK) montaj işlemleri sırasında geçmeler, perçinli ve vidalı birleştirmeler için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bağlantıların verimliliği deliklerin ve ceplerin kalitesine kritik olarak bağlıdır. İşlemenin kalitesi, işlenmiş yüzeylerin bütünlüğü, boyutsal tamlığı ile ölçülür ve bu hususlar kompozitlerin talaşlı imalatında en önemli unsurlar olarak kabul edilir. İşlenmiş yüzeylerin kalitesini ve boyutsal tamlığını sağlamak için işleme sırasında uygun ve optimum işleme parametrelerinin kullanımı oldukça önemlidir. LK'lerin frezelenmesi, heterojenlik, yüzey delaminasyonu ve malzemenin karakteristikleriyle bağlantılı lif çekilmesi gibi birçok problemler nedeniyle oldukça zordur. Cep frezeleme parmak freze takımları kullanılarak farklı çevrimler/takım yollarıyla gerçekleştirilebilir. Teknisyenler ve tezgah operatörleri, takım yolunun son şeklini belirleyen Bilgisayar Destekli İmalat (CAM) sistemlerinin sunduğu seçeneklerden bazılarını seçmek için deneyimlerini ve sezgilerini kullanırlar. Dolayısıyla üretilen takım yolu büyük oranda bireysel tecrübelerle bağlıdır ve böylelikle, minimum kesme kuvveti, maksimum dinamik stabilite ve minimum takım aşınması elde edilmeye çalışılır. CNC işleme merkezlerinde parçalar üzerine cep işlerken cep döngüleri kullanıldığında çeşitli faktörler ceplerin doğruluğunu ve kalitesini etkiler. İşlenen cebin doğruluğu ve hassasiyeti; iş parçası malzemesi, devir sayısı, ilerleme miktarı, eksenel ve radyal kesme derinliği, cep işleme stratejisi gibi kesme koşullarına büyük ölçüde bağlıdır ve bu faktörlerin değerleri ve değişimleri takım aşınması ve kesme kuvvetini de etkiler. Kesici takım ve malzeme üreticilerinin önerileri dışında çok fazla veri olmadığından dolayı LK malzemelerin işlenmesinde proses parametrelerine bağlı işleme kalitesinin değerlendirilmesine yönelik araştırmaların yapılması bilimsel alana ve sektördeki uygulayıcılara katkı sağlayacaktır.

LK'lerin işlenmesi ile ilgili çalışmaların çoğunluğu delme üzerinedir. Kompozitin türü ve malzemesi olarak bakıldığında ise LK'lerin frezelenmesi ile ilgili araştırmaların sayısı oldukça sınırlı olup çalışmalar daha çok karbon elyaf takviyeli plastik (CFRP) [1-10] ve cam elyaf takviyeli plastik (GFRP) [11-15] LK'lerin frezelenmesi üzerinedir. Valarmathi vd, orta yoğunlukta lif levha ahşap kompozit panellerin yüksek hız çeliği (HSS) takımlarla işlenmesinde minimum yüzey pürüzlülüklerinin elde edilmesi için düşük ilerleme miktarı ve yüksek kesme hızının seçilmesi gerektiğini bildirmişlerdir [1]. Karpaz vd. tarafından yapılan çalışmada, iki farklı çok kristalli elmas

(PCD) kesici ile tek yönlü CFRP laminatların kanal frezelemesi için kesme kuvveti modeli önerilmiştir. Önerilen bu modelin, tek yönlü CFRP laminatların frezelenmesi sırasında kesme kuvvetlerini tahmin yeteneğine sahip olduğu görülmüştür. [2]. Karpat vd. tarafından yapılan benzer bir çalışmada, yine PCD takım kullanılarak çok yönlü CFRP laminatların kanal frezelemesi için mekanik kesme kuvveti modeli önerilmiştir. Bu modelin de kapasitesi, çok yönlü CFRP laminatların frezelenmesi sırasında oluşan kesme kuvvetlerini tahmin edebilme yeteneği açısından yeterli bulunmuştur [3]. Hosokawa vd. tarafından yapılan çalışmada, CFRP'nin DLC (Elmas Benzeri Karbon) kaplı tungsten karbür (WC) uçlu parmak freze takımlarla frezelenmesinde yüzey bütünlüğü, işlenmiş yüzeyin üç boyutlu profilleri, karbon lifinin kabarıklığı, delaminasyonu ve çekilmesi ile değerlendirilmiştir. CFRP'nin yüksek helis açılı takımlarla frezelenmesi önerilmiş ve önerilen bu yaklaşımın takım aşınmasını azaltacağı ve yüzey bütünlüğünü iyileştireceği belirtilmiştir [4]. Hintze vd. PCD kesicilerle dokuma kumaşlı CFRP'ye kanal frezeleme işlemi uygularken dokuma kaynaklı lif yamulması ve delaminasyon arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Çalışmada takım geometrisinin delaminasyona etkisi anlamlı bulunmamıştır [5]. Han vd. CFRP kompozitlerinin kaplamalı WC parmak frezelerle frezelenmesinde takım malzemesi ve geometrisinin aşınmaya etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada kesme kuvvetleri de ölçülmüştür. Elmas kaplı çok ağızlı frezeler en düşük kesme kuvveti ve en az aşınma derecesi ile en iyi performansı göstermiştir. Kaplamalı takımların başlıca aşınma mekanizmaları, kaplamanın aşılması, kaplamanın pullanması ve alt katmanların abrasiv aşınması olarak tespit edilmiştir [6]. Hintze ve Hartmann tarafından yapılan çalışmada mevcut elyaf çıkıntıları için, hasar gören bölgenin minimum derinliği ile işlenmiş kenardaki elyaf yönlenmesi ve elyaf özellikleri arasındaki ilişki temel büküm modelleri kullanılarak türetilmiştir [7]. Pecat vd. tek yönlü CFRP'nin çevresel frezelenmesini araştırmışlardır. Çalışmada, hasar mekanizması ve alt yüzey hasarları derinlikleri CFRP'nin elyaf yönüne bağlı bulunmuştur. Ayrıca, daha yüksek kesme hızlarının frezelenmiş yüzeylerin alt yüzey bölgelerinde elyaf bükülmesine neden olduğu da tespit edilmiştir [8]. El-Hofy vd. tarafından yapılan çalışmada farklı kesme parametrelerinin, takım malzemesinin ve kesme ortamının yüzey pürüzlülüğü ve işlenmiş CFRP laminatlarının bütünlüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kaplamalı WC takıma kıyasla PCD takımının kullanımı, 200 m/dak kesme hızında ve 0.03mm/diş ilerleme miktarında 3.6 µm'luk iş parçası yüzey pürüzlülüğü ile önemli ölçüde artan üretkenlik sağlamıştır [9]. Nurhaniza vd. tarafından yapılan araştırmanın amacı CFRP'nin PCD takım ile frezelenmesinde yüzey kalitesi üzerinde işleme parametrelerinin etkisini analiz etmektir. Daha iyi yüzey kalitesi için optimal kesme parametrelerinin kombinasyonunun yüksek kesme hızı, düşük ilerleme miktarı ve düşük kesme derinliği olduğu tespit edilmiştir [10]. Ali vd. tarafından yapılan çalışmanın amacı ise dokuma GFRP LK'nin delme ve frezeleme işlemlerinde işleme parametrelerinin etkisini değerlendirilmiştir. Araştırmada yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme hızında frezeleme işleminin delme işleminden daha uygun olduğu tespit edilmiştir [11]. Azmi vd. tarafından yapılan çalışmada, GFRP'nin kaplamalı WC takımlarla parmak frezelenmesinde kompozitlerinin işlenebilirliği takım aşınması, takım ömrü, parça işleme kalitesi ve işleme kuvvetleri açısından değerlendirilmiştir. Kesici takımın efektif ömrü Taylor denklemleri tarafından iyi bir şekilde tanımlanmıştır. Kesme hızı, ilerleme miktarı ve elyaf yönü takım ömrünü etkileyen kilit parametreler olarak belirlenmiştir [12]. Iliescu vd. GFRP kompozitlerin frezelenmesinde işleme parametrelerine yüzey pürüzlülüğünün bağımlılığı ile ilgili olarak iki matematiksel ilişki elde etmişlerdir [13]. Naresh vd. tarafından yapılan çalışmada, karbür uçlu parmak freze takımlarla GFRP kompozitlerin işlenmesinde kesme parametreleri ile yanıt değişkenleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Lif yönlendirme açısı, takım helis açısı, devir sayısı ve ilerleme miktarı parametreleri yüzey pürüzlülüğü, işleme kuvveti ve delaminasyon faktörünü en aza indirmek amacıyla optimize edilmiştir. Çalışmada çok değişkenli doğrusal regresyon denklemleri elde edilerek tüm işleme parametrelerinin yanıtlar üzerindeki etkileri belirlenmiştir [14]. Raj ve Perumal tarafından yapılan çalışmanın amacı parçacıklı GFRP laminatların Ti-Namite WC parmak freze, WC parmak freze ve dökme uçlu WC parmak freze

takımlarla frezelenmesinde kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliği ile yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon arasındaki ilişkiyi araştırmaktır. Araştırmanın sonuçları kesme derinliğinin kesme hızı ve ilerleme miktarına kıyasla genel performansa en fazla katkıda bulunduğunu göstermiştir [15]. Goli vd. tarafından yapılan çalışmada, farklı tane yönelimleri olan Douglas göknarının aynı yönlü ve zıt frezeleme teknikleriyle, farklı kesim derinliklerinde çevresel frezelenmesinde kesme kuvvetleri ölçülmüş, kesme kuvvetlerinin kesim geometrisine göre değişimi analiz edilmiş ve tartışılmıştır [16]. Sofuoğlu, sarıçamdan yapılmış, masif ahşap panellerin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü üzerine işleme parametresinin etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada, minimum yüzey pürüzlülüğü için optimum kesme şartları, 16.000 dev/dak devir sayısı, 1000 mm/dak ilerleme miktarı ve 4 mm derinlikli bir takım temizleme stratejisi olarak tespit edilmiştir [17]. Petrovic vd. tarafından yapılan çalışmada sunulan kesme parametrelerinin simülasyonu ve bunların takım yolu boyunca değişimi, ahşap işlemede verilen kontur için minimum kesme kuvveti ve kesme kuvvetinin değişimi, minimum takım aşınması dikkate alınarak en uygun takım yolunu seçme yöntemin geliştirilmesi için temeller olarak kullanılabilir [18]. Yonga levhaların elmas uçlu, yeni bilenmiş parmak freze çakılarıyla frezelemesi sırasında talaş çıkartma sisteminin verimliliği Pałubicki ve Rogoziński tarafından yapılan çalışmada sunulmuştur. Araştırma sonucunda talaş çıkartma sisteminin verimliliği frezeleme moduna bağlı bulunmuştur. Cep frezelemede talaşların yaklaşık % 100'ü başarılı bir şekilde çıkarılırken, boydan boya frezeleme işlemi için sadece % 87'si başarılı bir şekilde çıkarılmıştır [19]. Doğal elyaf takviyeli plastik (NFRP) kompozitlerin WC parmak freze takımlarla frezelenmesinde kesme parametrelerinin delaminasyon faktörü ve yüzey pürüzlülüğü altındaki liflere etkisi Babu vd. tarafından araştırılmış ve bu frezeleme sonuçları GFRP kompozitlerin frezeleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Araştırma sonucunda delaminasyon faktörü ve yüzey pürüzlülüğü için kesme hızı ve ilerleme miktarı ile bağlantılı modeller sunulmuştur [20]. Kompakt laminat kompozitlerin (KLL) işlenebilirliği ile ilgili çalışmalar yok denecek kadar azdır. Bilge vd. KLL'nin yeni ve aşınmış tungsten karbür matkaplarla delinmesinde delme parametrelerinin delik çıkış bölgesindeki delaminasyona etkilerini araştırmışlardır. KLL'nin aşınmış takımlarla delinmesinde delaminasyon daha büyük çıkmıştır [21]. Bir başka çalışmalarında Bilge vd. KLL'nin yeni ve aşınmış HSS matkaplarla delinmesinde kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada yüzey pürüzlülüğü açısından yeni takımların aşınmış takımlara göre %75 daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, yüzey pürüzlülüğünün tahmini için tahminsel denklemler geliştirilmiştir [22].

Bu çalışmada, KLL'lerin cep frezelenmesinde takım yolu stratejisi, kesici takım tipi ve malzemesi, kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesici takımın yana kayma mesafesi kontrol faktörlerinin işlenen cebin yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal tamlığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Taguchi Metodu ile deneysel çalışma ve istatistiksel çözümleme aşamaları gerçekleştirilmiş ve Varyans analizi ile her bir parametrenin çıkış değişkenlerine yüzde katkısı belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca Gri İlişkisel Analiz (GRA) yöntemi kullanılarak hem minimum yüzey pürüzlülüğü hem de nominal boyutsal tamlık değerlerini veren kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri çok amaçlı optimizasyon yapılarak belirlenmiştir. Bu deneysel çalışma ile elde edilen bulguların KLL'nin işlenebilirlik veri tabanına, sektördeki endüstriyel uygulamalara ve yapılan bilimsel çalışmalara katkı sağlaması beklenmektedir.







## II. MALZEME VE METOT

### *A. İŞ PARÇASI, KESİCİ TAKIM VE TAKIM TEZGÂHI*

Cep frezeleme deneylerinde iş parçası malzeme olarak EN 438-2 standardında, CGS sınıfı, eğilme mukavemeti min. 80 Mpa, çekme mukavemeti min. 60 Mpa ve yoğunluğu  $\geq 1.35$  g/cm<sup>3</sup> olan standart

KLK plakalar kullanılmıştır [23]. Kesici takım olarak ise  $\varnothing 12.7$  mm, üç kanallı düz helisel HSS parmak freze, 3 kanallı kaplamasız düz helisel sinterlenmiş karbür parmak freze ve üç kanallı kenarları yuvarlatılmış helisel HSS parmak frezeler kullanılmıştır. Bu kesici takımlar, KLK, kaplamalı ağaç ve ağaç kompozit malzemelerin işlenmesinde üst ve alt yüzeylerin bitirme kalitesinin kritik olduğu delik delme ve büyütme, cep işleme, kanal açma gibi talaş kaldırma işlemlerinde tercih edilmektedir [24]. Deneylerde kullanılan kesici takımlar ve teknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Frezeleme deneyleri motor gücü 9 kW, maksimum devir sayısı 24000 dev/dak olan AES RAPTOR 2128 CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır.

**Tablo 1.** Deneylerde kullanılan kesici takımlar ve teknik özellikleri.

• Düz helisel HSS parmak freze	• Düz helisel kaplamasız sinterlenmiş karbür parmak freze	• Kenarları yuvarlatılmış helisel HSS parmak freze
Takım çapı, boyu: $\varnothing 12.7 \times 76.2$ mm Kesme kenarı sayısı: 3 Kesme boyu (helis boyu): 25.4 mm Kesme kenarı uzunluğu 5.842 mm Helis yönü: Sol helis Helis açısı: $30^\circ$	Takım çapı, boyu: $\varnothing 12.7 \times 76.2$ mm Kesme kenarı sayısı: 3 Kesme boyu (helis boyu): 25.4 mm Kesme kenarı uzunluğu 5.842 mm Helis yönü: Sol helis Helis açısı: $30^\circ$	Takım çapı, boyu: $\varnothing 12.7 \times 76.2$ mm Kesme kenarı sayısı: 3 Kesme boyu (helis boyu): 25.4 mm Kesme kenarı uzunluğu 5.842 mm Helis yönü: Sol helis Helis açısı: $30^\circ$
		
		

## B. KONTROL FAKTÖRLERİ, DENEYSEL TASARIM VE OPTİMİZASYON

KLK’nin üç farklı kesici takımla cep frezelemesinde yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve boyutsal tamlık (Da) üzerinde cep frezeleme parametrelerinin etkilerini belirlemek üzere süre ve maliyetin düşürülmesinde etkili olduğu ve sistematik bir yaklaşım sunduğu için Taguchi Metodu tercih edilmiş ve cep frezeleme parametrelerinin sayısı ve seviyesi göz önünde bulundurularak L18 ( $2^1 \times 3^4$ ) ortogonal dizi seçilmiştir. Deneysel iş parçası üzerinde yapılan ön deneyler, kesici takım firmasının önerileri ve kesici takımların performansları göz önünde bulundurularak cep frezeleme parametrelerinin uygun seviyeleri belirlenmiştir (Tablo 2).

**Tablo 2.** Cep frezeleme parametreleri ve seviyeleri.

Sembol	Parametreler	Birimi	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
TPS	Takım Yolu Stratejisi	-	Doğrusal Cep İşl. (Doğr. C.)	Kontur Cep İşl. (Kont.C.)	-
CT	Kesici Takım Tipi ve Malzemesi	-	Düz Helisel HSS Parmak Freze (HSS_D)	Düz Helisel Kaplamasız Karbür Parmak Freze (Karb_D)	Kenarları Yuvarlatılmış Helisel HSS Parmak Freze (HSS_Y)
Vc	Kesme Hızı	m/dak	178	250	350
f	İlerleme Miktarı	mm/dev	0.07	0.111	0.156
SO	Takımın Yana Kayma Mesafesi	mm	3	4.5	6
d	Talaş Derinliği	mm	5 mm sabit		

KLK üzerine cep frezeleme işleminde Ra değerlerinin en düşük olması istendiğinden sinyal/gürültü (S/N) oranları dB cinsinden “Daha küçük daha iyi”, Da değerlerinin ise nominal değerlerde olması istendiğinden “Nominal daha iyi” yaklaşımına göre hesaplanmıştır [25].

Ayrıca, kontrol faktörlerinin ana etkileri % 95 güven seviyesinde gerçekleştirilen Varyans Analizi (ANOVA) ile belirlenmiştir. ANOVA analizlerinden anlamlı etkileri tespit edilen kontrol faktörlerinin optimal seviyeleri ile tahminsel optimal kalite karakteristikleri (sırasıyla; tahminsel yüzey pürüzlülüğü-Ra<sub>opt</sub>, doğrusal alanlardaki tahminsel boyutsal tamlık-Da<sub>Lopt</sub> ve dairesel alanlardaki tahminsel boyutsal tamlık-Da<sub>Copt</sub> belirlenmiştir. Doğrulama deneyleri kalite karakteristiğini belirlemek için güven aralığı hesaplanmıştır. Tahminsel optimal kalite karakteristiği Ra<sub>opt</sub>, Da<sub>Lopt</sub> ve Da<sub>Copt</sub> için güven aralığı (CI);

$$CI = \sqrt{F_{\alpha;1,V2} \cdot Ve \cdot \left( \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (1)$$

formülü ile hesaplanmıştır [25]. Burada; F<sub>α;1,V2</sub> anlamlı seviye α'nın F-oranı, α anlamlı seviye, Ve birleştirilmiş hata varyansı, r tekrar deneylerinin sayısı ve neff geçerli ölçüm sonuçlarının sayısıdır. Geçerli ölçüm sonuçlarının sayısı (n<sub>eff</sub>);

$$n_{eff} = \frac{T_{den}}{1+dof} \quad (2)$$

Bu denklemde; T<sub>den</sub> toplam deney sayısı, dof tahmin için kullanılan faktörlerin toplam serbestlik derecesidir [25].

GRA, 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 GRA'da daha az veri ile bir sistemin faktörleri arasındaki temel ilişkiler belirlenebilmektedir. GRA 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 [26]. KLK malzeme üzerine farklı kesici takımlarla, farklı takım yolu stratejilerinde ve frezeleme parametrelerinin üç farklı seviyelerinde cep işlenmesinde Ra yüzey pürüzlülüğünün minimum ve cebin doğrusal ve dairesel boyutlarının nominal değerlerde/değerlere yakın elde edilmesi için GRA'nın aşağıdaki adımları sırasıyla uygulanmıştır [25, 26]:

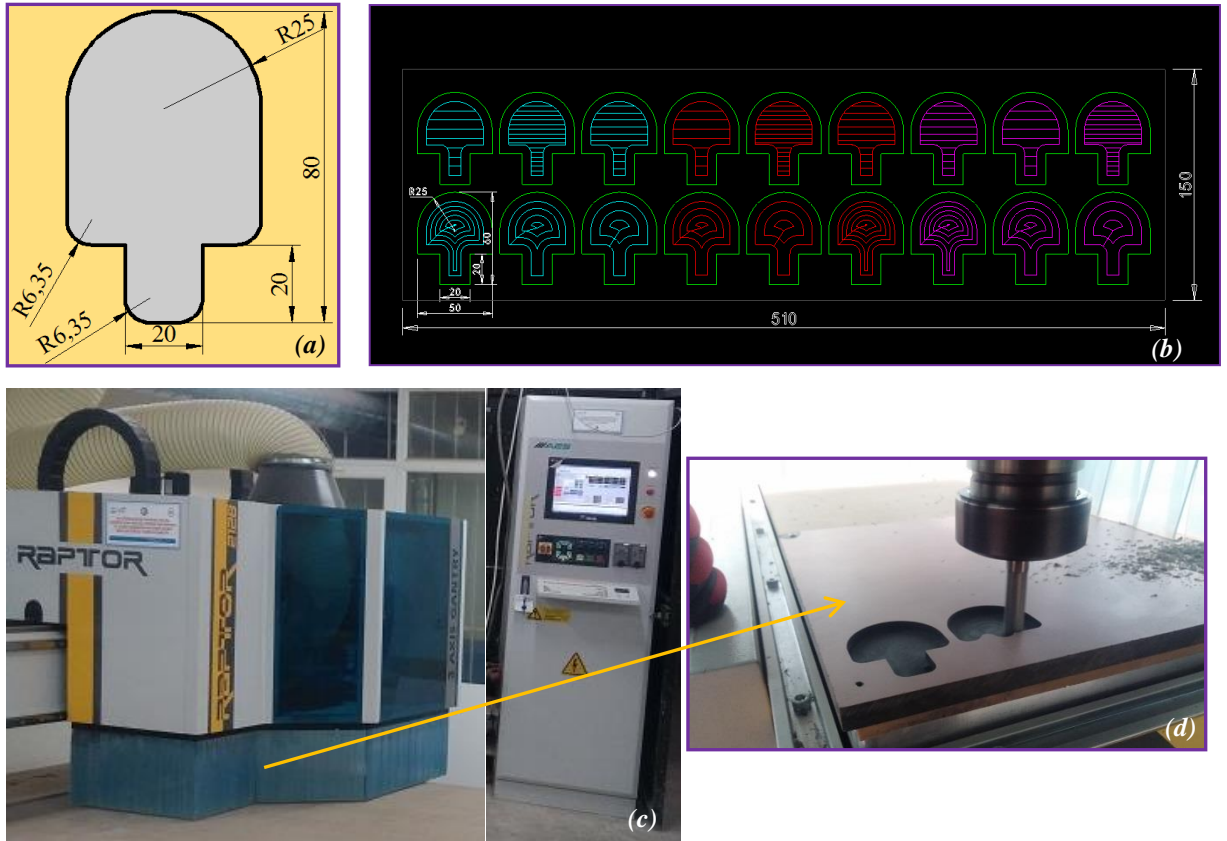
1. Deney sonuçlarına bağlı olarak sinyal/gürültü (S/N) oranları hesaplanmıştır. KLK üzerine cep frezelenme işleminde ortalama Ra değerlerinin (Ra<sub>ort</sub>) en düşük olması istendiğinden S/N oranları dB cinsinden “Daha küçük daha iyi”, doğrusal ve dairesel Da değerlerinin (Da<sub>Lort</sub> ve Da<sub>Cort</sub>) ise nominal değerlerde olması istendiğinden “Nominal daha iyi” yaklaşımına göre hesaplanmıştır.
2. Farklı ölçü birimine sahip olan Ra<sub>ort</sub> ile Da<sub>Lort</sub> ve Da<sub>Cort</sub> 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 [26]. Katsayı ξ ile gösterilir ve  $0 < \xi < 1$  aralığında tanımlanmaktadır. Katsayı matrisi hesabında, Ra<sub>ort</sub> için  $\xi = 0.5$ , Da<sub>Lort</sub> için  $\xi = 0.25$  ve Da<sub>Cort</sub> için ise  $\xi = 0.25$  alınmıştır.
4. Katsayı matrisleri hesaplandıktan sonra bir sonraki aşamada Gri İlişkisel Derece (GRD) belirlenmiştir.

5. GRD belirlendikten sonra sıralanmıştır. En yüksek GRD değerinin yer aldığı satır no/deney no en düşük  $Ra_{ort}$  ve nominal değerlerde  $Da_{L_ort}$  ve  $Da_{C_ort}$  değerlerinin elde edileceği/edildiği optimum cep frezeleme parametreleri olarak tespit edilmiştir.

GRD değerinin varyans analizi yapılarak en düşük  $Ra_{ort}$  ve nominal değerlerde  $Da_{L_ort}$  ve  $Da_{C_ort}$  değerlerinin elde edilmesinde cep frezeleme parametrelerinin etkileri belirlenmiştir.

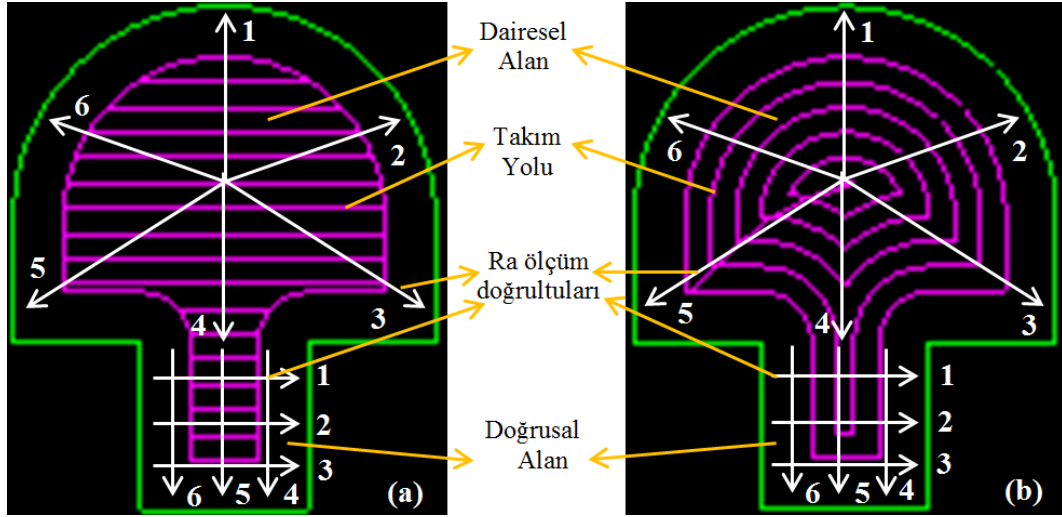
### C. CEP FREZELEME DENEYLERİ, YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ VE BOYUTSAL TAMLIK ÖLÇÜMLERİ

Ceplerin Tablo 2’de verilen parametrelerin farklı seviyelerinde frezelenmesi için önce en uygun cep geometrisi belirlenerek CAM yazılımı olan ALFACAM programı kullanılarak çizimi yapılmıştır (Şekil 1.a). Daha sonra, Tablo 2’de verilen kontrol faktörlerinin farklı seviyelerinden oluşan L18 ortogonal diziyeye göre takım yolları ve CNC kodlar türetilmiştir (Şekil 1.b). Türetilen kodlar CNC dik işleme merkezi kontrol ünitesine aktarılmıştır (Şekil 1.c). CNC programın ilgili satırlarına isteğe bağlı durdurma (optional stop) komutu eklenerek işlenen her cep işleme sonrasında kullanılan takımın yenisi ile değiştirilmesi sağlanmıştır. Böylece her deneye yeni bir kesici takım ile başlanması sağlanmıştır. Deneysel çalışmalar için aynı ebatlarda iki iş parçası malzemesi hazırlanmış ve deneysel tasarımda yer alan deney sırası gözetilerek önce birinci iş parçası sonra ikinci iş parçasında olmak üzere tüm deneyler iki kez yapılmıştır (Şekil 1.d).



Şekil 1. Cep frezeleme deneysel prosedür. (a) Uygun cebin tasarımı ve ölçülendirilmesi, (b) Takım yollarının ve CNC kodların türetilmesi, (c) CNC dik işleme merkezi ve kontrol ünitesi (d) Cep işleme deneyleri.

Farklı kesme şartları altında doğrusal ve kontur cep işleme yöntemleriyle işlenen ceplerin taban yüzeylerinin kalitesi değerlendirmek üzere ortalama yüzey pürüzlülük değeri ( $R_a$ ) ölçümü esas alınmış ve ölçümlerde Mitutoyo SurfTest SJ-210 taşınabilir yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Ölçümler öncesinde kalibrasyon bloğu ile kalibre edilmiştir. Örnekleme uzunluğu ( $\lambda_c$ ) 1.25 mm alınmıştır. Ölçülecek yüzey uzunluğu ( $L$ ) örnekleme uzunluğunun en az 5 katı olacağından 6.25 mm olarak seçilmiştir.  $R_a$  ölçüm doğrultuları Şekil 2’de gösterilmiştir. Her bir deney için doğrusal alanlarından ( $R_{aL}$ ) 6 (Şekil 2.a), dairesel alanlarından ( $R_{aC}$ ) 6 (Şekil 2.b) ölçüm alınmış ve ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır.



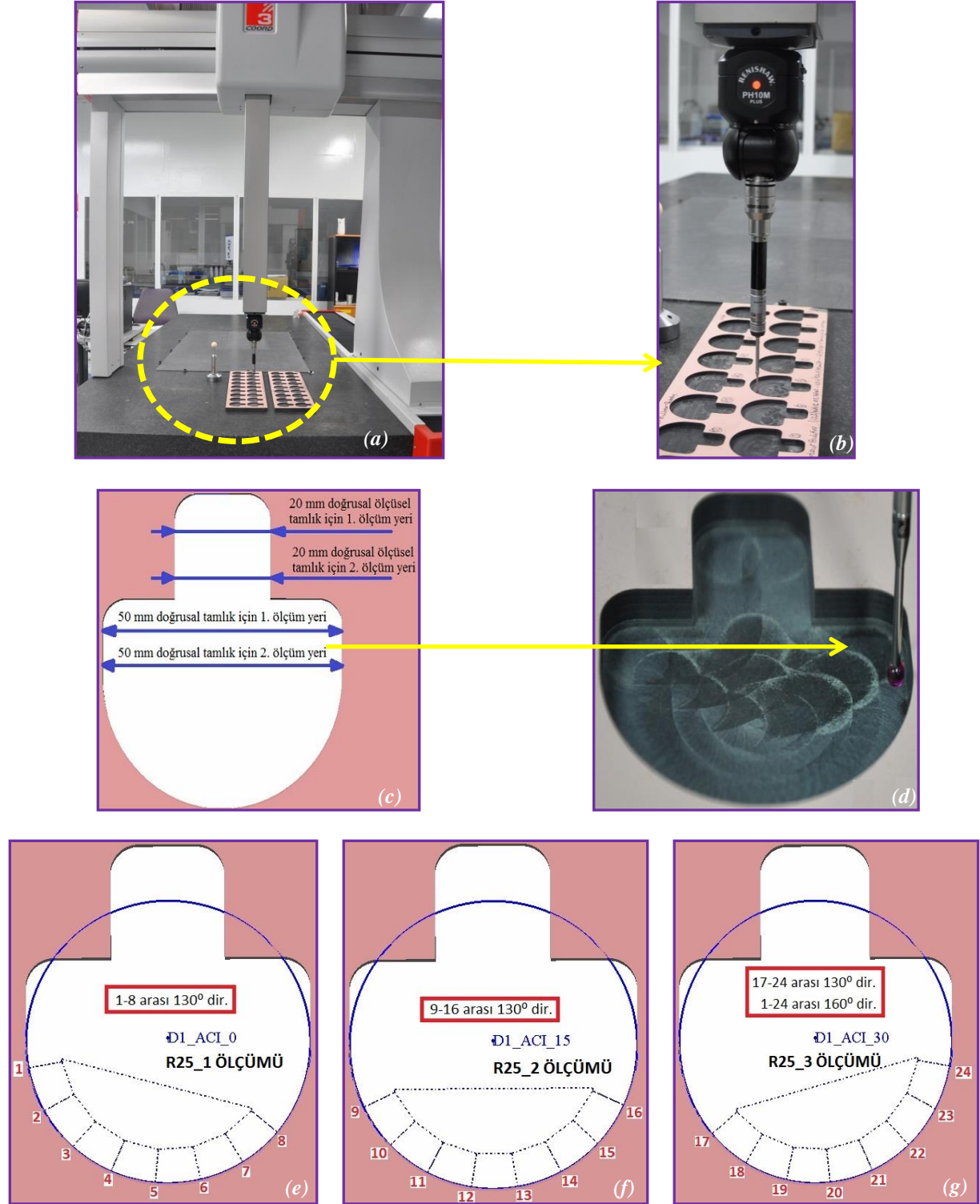
Şekil 2. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü doğrultularının gösterimi. (a) Doğrusal cep işleme, (b) Kontur Cep işleme.

Da ölçümleri COORD3 marka üç boyutlu Koordinat Ölçüm Tezgaahında (CMM) Şekil 3.a ve b’de görüldüğü gibi yapılmıştır. Doğrusal boyutsal tamlık ölçümleri ( $Da_L$ ) cep üzerinde belirlenen iki bölge üzerinde ( $L_1=20$  mm ve  $L_2=50$  mm) yapılmıştır (Şekil 3. c ve d). Yapılan istatistiki çalışma sonucunda Şekil 3. c ve d’de gösterilen her iki bölge için de frezeleme parametrelerinin  $Da_L$  üzerindeki etkileri benzer tespit edildiği için bu çalışmada sadece  $L_1=20$  mm bölgesinde yapılan ölçüm sonuçları değerlendirmeye alınmıştır. Doğrusal ve dairesel boyutsal tamlık ölçümlerinde her iki iş parçası üzerinden alınan ölçüm sonuçlarını istatistiki değerlendirmeye tutulmuştur. Ceplerin doğrusal ( $Da_L$ ) ve dairesel alanlardaki boyutsal tamlığının ( $Da_C$ ) hassas bir şekilde belirlenmesi için parçanın üst yüzeyi referans olarak alınarak bu yüzeyden 2 mm aşağıda ölçümler yapılmıştır (Şekil 3.d). Her cebin  $Da_L$ ’sini belirlemek için prob  $L_1=20$  mm bölgesinde, 1. ve 2. ölçüm yerindeki cep yan yüzeylerine temas ettirilmiş ve ölçüm sonuçları kaydedilmiştir (Şekil 3.d). İki iş parçası üzerinde işlenmiş ceplerin üst yüzeyinden 2 mm aşağıda olmak üzere 18’er adet cepten ikişer ölçüm alınarak toplam 72 adet ölçüm (18 cep x 2 iş parçası x 2 farklı bölgede ölçüm=72 ölçüm) ile cebin  $Da_L$ ’si tespit edilmeye çalışılmıştır.

Frezeleşmiş ceplerin  $Da_C$ ’sini belirlemek için cep üzerinde  $R=25$  mm yarıçapındaki yarım dairesel alan/bölge ölçümler için kullanılmıştır. İş parçaları (1. ve 2. iş parçası) üzerindeki her bir cep üzerinde üç ölçüm alınmıştır (Şekil 3. e-g). 1. ölçümde probun ucu cep yan yüzeyine (1) nolu noktadan dokunmaya başlamış ve sekiz noktaya temas ederek (8) nolu noktada  $130^\circ$ ’lik açı ile ölçüm tamamlanmıştır (Şekil 3.e). 2. ölçümde prob 1. ölçüme göre  $15^\circ$  döndürülerek (9) nolu noktadan ölçüme başlamış ve prob sekiz noktaya temas ederek (16) nolu noktada  $130^\circ$ ’lik açı ile 2. ölçüm tamamlanmıştır (Şekil 3.f). 3. ölçümde ise 2. ölçüme göre yine prob  $15^\circ$  döndürülerek (17) nolu



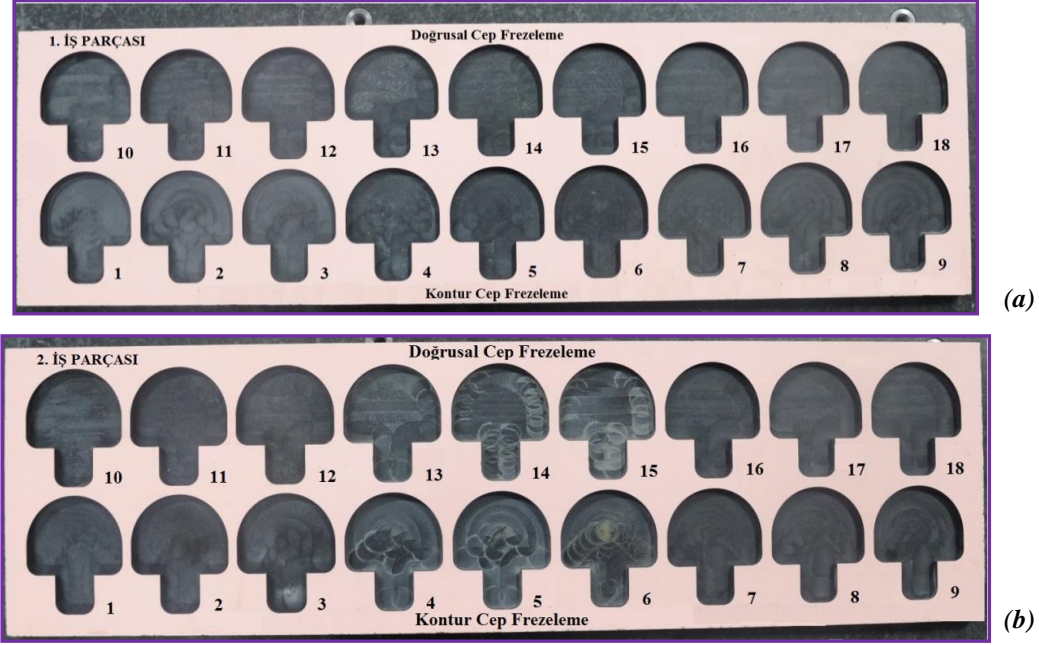
noktadan ölçüme başlamış ve prop sekiz noktaya temas ederek (24) nolu noktada  $130^\circ$ lik açı ile 3. ölçüm de tamamlanmıştır (Şekil 3.g). Üç ölçüm toplamda  $160^\circ$ lik bir yay içerisinde gerçekleşmiştir. İki adet iş parçası üzerindeki 18'er adet cepten 3'er ölçüm alınarak 108 adet ölçüm (18 cep x 2 iş parçası x 3 farklı bölgede ölçüm=108 ölçüm) ile cebin  $Da_C$ 'si tespit edilmeye çalışılmıştır.



**Şekil 3.** Cep üzerinde doğrusal ve dairesel boyutsal tamlik ölçümleri. (a) CMM tezgahında boyutsal tamlik ölçümünün genel görünümü, (b) Ölçüm propunun cep üzerinde hareketleri, (c) Doğrusal ölçüm temas noktaları, (d) Probu ile doğrusal ölçüm noktalarına teması, (e) 1.ölçümde prob temas noktaları, (f) 2. Ölçümde prob temas noktaları, (g) 3. Ölçümde prob temas noktaları

### III. BULGULAR VE TARTIŞMA

KLK'nin cep frezelenmesinde işleme parametrelerinin Ra ve Da üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yapılan deneysel çalışmada işlenmiş parçalar/cepler Şekil 4'te gösterilmiştir



Şekil 4. İki iş parçası üzerinde deney sırasına göre frezelenmiş cepler. (a) 1. İş deneysel parçası, (b) 2. deneysel iş parçası.

KLK'nin üç farklı kesici takım ve iki farklı takım yolu stratejisi ile cep frezelenmesinde elde edilmiş yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal tamlık sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur. Tablo 3'te görüleceği üzere KLK'nin farklı kesici takımlarla cep frezelenmesinde ortalama  $Ra=1.000 \mu m$  yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri  $0.529 \mu m$  ile  $1.818 \mu m$  aralığında ölçülmüştür. KLK'nin işlenmesinde Ra değerinin alt sınırı uygulayıcılar tarafından elde edilebilecek en düşük Ra değeri olarak belirtilmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda, farklı geometriye sahip takımlarla elyaf takviyeli ve lamine edilmiş kompozitlerin işlenmesinde yaklaşık  $3-4 \mu m$  aralığında Ra değerlerinin elde edildiği görülmektedir [1, 11]. Bu nedenle KLK'nin cep frezelenmesinde elde edilen Ra değerlerinin oldukça yeterli olduğunu söylemek mümkündür. Diğer taraftan, doğrusal alanda ölçülen ortalama  $Ra_L$  değeri dairesel alanda ölçülen ortalama  $Ra_D$  değerinden yaklaşık  $0.02 \mu m$  düşük çıkmıştır. Bunun sebebi dairesel alandaki takım yolu hareketlerinin daha kompleks olmasına atfedilebilir.

KLK'nin farklı kesme şartlarında frezelenmesinde cebin Şekil 2'de görülen  $L=20 \text{ mm}$ 'lik boyutu ortalama  $Da_L=20.3121 \text{ mm}$  doğrusal boyutsal tamlıkta,  $R=25 \text{ mm}$ 'lik boyutu ise ortalama  $Da_C=25.1187 \text{ mm}$  dairesel boyutsal tamlıkta elde edilmiştir. Ortalama  $Da_L$  ve  $Da_C$  değerlerinin nominal değerlerden sırasıyla  $0.3121 \text{ mm}$  ve  $0.1187 \text{ mm}$  daha büyük değerlerde elde edildiği görülmektedir.

Taguchi Metodu'nun uygulanmasıyla  $Ra_{ort}$ ,  $Da_L$  ve  $Da_C$  için tahminsel ortalama değerler sırasıyla  $Ra_{tah}=1.011 \mu m$ ,  $Da_{L,tah}=20.2131 \text{ mm}$ ,  $Da_{C,tah}=25.1187 \text{ mm}$  olarak hesaplanmıştır (Tablo 3). Ölçülmüş değerler ile hesaplanmış tahminsel değerler arasındaki farkların (artıkların) oldukça düşük olması Taguchi Metodunun tahmin yeteneğini yansıtmaktadır.

**Tablo 3.** Ra ve Da ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalamaları, S/N oranları ve tahminsel değerleri.

D.N.	Cep Frezeleme Parametreleri											Boyutsal Tamlık, mm											
												Ra Yüzey Pürüzlülüğü, µm						Doğrusal Boyutsal Tamlık, mm					Dairesel Boyutsal Tamlık
												Nominal Değer: 20 mm					Nominal Değer: R25 mm						
												Ölçülen Değerler					Hesaplanan Değerler					Ölçülen Değerler	
TPS	CT	Vc	f	SO	Ra <sub>L</sub>	Ra <sub>C</sub>	Ra <sub>ort</sub>	Ra <sub>tah</sub>	Artık1	S/N	Da <sub>L1</sub>	Da <sub>L2</sub>	Da <sub>ort</sub>	Da <sub>tah</sub>	Artık2	S/N	Da <sub>C1</sub>	Da <sub>C2</sub>	Da <sub>ort</sub>	Da <sub>tah</sub>	Artık3	S/N	
1	Kont.C.	HSS_D	178	0.070	3.0	0.980	1.000	0.990	0.931	0.059	0.09	20.7703	20.7692	20.7698	20.7574	0.0123	88.53	25.3568	25.3618	25.3593	25.3082	0.0511	77.11
2	Kont.C.	HSS_D	250	0.011	4.5	0.700	0.911	0.806	0.825	-0.019	1.87	20.7839	20.7691	20.7765	20.7891	-0.0126	65.96	25.2732	25.2920	25.2826	25.3113	-0.0287	65.58
3	Kont.C.	HSS_D	350	0.156	6.0	0.710	0.677	0.694	0.817	-0.123	3.17	20.7667	20.7728	20.7698	20.7713	-0.0015	73.65	25.2964	25.2838	25.2901	25.3036	-0.0135	69.06
4	Kont.C.	Karb_D	178	0.070	4.5	1.471	1.503	1.487	1.562	-0.075	-3.45	20.1448	20.1478	20.1463	20.1264	0.0199	79.55	25.0410	25.0416	25.0413	25.0096	0.0317	95.42
5	Kont.C.	Karb_D	250	0.011	6.0	1.512	1.727	1.619	1.478	0.141	-4.18	20.1330	20.1116	20.1223	20.1286	-0.0063	62.48	25.0318	25.0531	25.0425	25.0443	-0.0018	64.42
6	Kont.C.	Karb_D	350	0.156	3.0	1.041	1.163	1.102	1.138	-0.036	-0.84	20.0768	20.0743	20.0756	20.0801	-0.0046	81.10	24.9322	24.9359	24.9340	24.9695	-0.0354	79.58
7	Kont.C.	HSS_Y	178	0.011	3.0	0.774	0.988	0.881	0.862	0.019	1.10	20.0641	20.0130	20.0386	20.0499	-0.0113	54.88	<b>24.9264</b>	24.9218	24.9241	24.9736	-0.0495	77.69
8	Kont.C.	HSS_Y	250	0.156	4.5	0.741	0.836	0.789	0.747	0.042	2.06	20.1387	20.0980	20.1184	20.1076	0.0108	56.89	25.0338	25.0389	25.0363	24.9905	0.0458	76.83
9	Kont.C.	HSS_Y	350	0.070	6.0	0.941	0.842	0.891	0.899	-0.008	1.00	20.0737	20.0588	20.0663	20.0730	-0.0067	65.60	24.9725	24.9864	24.9794	24.9792	0.0003	68.10
10	Doğr.C.	HSS_D	178	0.156	6.0	1.376	1.039	1.208	1.005	0.203	-1.64	20.7909	20.7592	20.7751	20.7737	0.0013	59.34	25.3967	25.3912	25.3940	25.3799	0.0140	76.30
11	Doğr.C.	HSS_D	250	0.070	3.0	<b>0.689</b>	0.648	0.668	0.739	-0.071	3.50	20.7410	20.7255	20.7332	20.7545	-0.0212	65.54	25.2915	25.3183	25.3049	25.3577	-0.0528	62.51
12	Doğr.C.	HSS_D	350	0.011	4.5	0.811	<b>0.529</b>	0.670	0.719	-0.049	3.48	20.7574	20.7661	20.7617	20.7401	0.0216	70.57	25.3324	25.3366	25.3345	25.3046	0.0299	78.62
13	Doğr.C.	Karb_D	178	0.011	6.0	1.618	1.270	1.444	1.597	-0.153	-3.19	20.1165	20.0754	20.0959	20.0986	-0.0026	56.80	25.0711	25.0776	25.0744	25.0742	0.0002	74.74
14	Doğr.C.	Karb_D	250	0.156	3.0	1.036	1.242	1.139	1.171	-0.032	-1.13	20.1514	20.0680	20.1097	20.0961	0.0136	50.66	25.0888	25.0955	25.0921	25.0556	0.0366	74.48
15	Doğr.C.	Karb_D	350	0.070	4.5	1.094	1.818	1.456	1.301	0.155	-3.26	20.0701	20.0719	20.0710	20.0910	-0.0200	83.96	24.9794	24.9836	24.9815	25.0127	-0.0312	78.50
16	Doğr.C.	HSS_Y	178	0.156	4.5	0.812	0.810	0.811	0.865	-0.054	1.82	20.0723	20.0436	20.0579	20.0776	-0.0196	59.90	24.9680	24.9778	24.9729	25.0204	-0.0475	71.14
17	Doğr.C.	HSS_Y	250	0.070	6.0	0.979	0.764	0.872	0.932	-0.060	1.19	20.1322	20.0771	20.1046	20.0889	0.0157	54.25	25.0783	25.0541	25.0662	25.0653	0.0009	63.32
18	Doğr.C.	HSS_Y	350	0.011	3.0	0.720	0.606	0.663	0.602	0.061	3.57	<b>20.0478</b>	<b>20.0035</b>	20.0256	20.0145	0.0112	56.11	25.0080	25.0453	25.0267	24.9767	0.0500	59.54
		En Büyük Değer				1.618	1.818	1.619	1.597			20.7909	20.7728	20.7765	20.7891			25.3967	25.3912	25.3940	25.3799		
		En Küçük Değer				0.689	0.529	0.663	0.602			20.0478	20.0035	20.0256	20.0145			24.9264	24.9218	24.9241	24.9695		
		Ortalama (T)				1.000	1.021	1.010	1.011			20.3240	20.3003	20.3121	20.3121			25.1155	25.1220	25.1187	25.1187		
Ra <sub>L</sub> : Ceplerin doğrusal/dikdörtgen kesitli bölgesinden ölçülen Ra değerlerinin aritmetik ortalaması, mm												Da <sub>L1</sub> , Da <sub>L2</sub> : Ceplerde 20 mm'lik ölçü üzerinde 1 ve 2 nolu noktadan ölçülen doğrusal Da değerleri, mm											
Ra <sub>C</sub> : Ceplerin dairesel kesitli bölgesinden ölçülen Ra değerlerinin aritmetik ortalaması, mm												Da <sub>ort</sub> : Doğrusal Da ölçümlerinin aritmetik ortalaması, mm											
Ra <sub>ort</sub> : Ra ölçümlerinin aritmetik ortalaması, mm												Da <sub>tah</sub> : Doğrusal Da'nın tahminsel değeri, mm											
Ra <sub>tah</sub> : Ra'nın tahminsel değeri, µm												Artık2: Da <sub>ort</sub> - Da <sub>tah</sub> , mm											
Artık1: Ra <sub>ort</sub> -Ra <sub>tah</sub> , µm												Da <sub>C1</sub> , Da <sub>C2</sub> : Ceplerde R25 mm'lik ölçü üzerinde ölçülen dairesel Da değerleri, mm											
S/N: Sinyal/Gürültü oranı, dB												Da <sub>Cort</sub> : Dairesel Da ölçümlerinin aritmetik ortalaması, mm											
												Da <sub>Ctah</sub> : Dairesel Da'nın tahminsel değeri, mm											
												Artık3: Da <sub>Cort</sub> - Da <sub>Ctah</sub> , mm											

## A. CEP FREZELEME PARAMETRELERİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİLERİ

KLK malzemenin üç farklı kesici takım ile işlenmesinde cep frezeleme parametrelerinin Ra yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri Şekil 5’de gösterilmiş ve sıralanmıştır. Aynı şekil üzerinde, Varyans analizi sonucu elde edilmiş her bir parametrenin % etkisi de gösterilmektedir. % etkileri şekle aktarılan varyans analizinin korelasyon katsayısı  $R^2=0.908$  olarak hesaplanmıştır. Korelasyon katsayısının yüksek olması Ra yüzey pürüzlülüğü ile cep frezeleme arasındaki ilişkinin olduğunu ve bu ilişkinin de büyük bir doğrulukla açıklanabildiğini göstermektedir. Bu bağlamda, Ra yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametreler sırasıyla kesici takım tipi ve malzemesi (%70.9), kesme hızı (%9.4) ve kesici takım yana kayma mesafesi (%8.2) olmuştur. Diğer parametrelerin etkisi %2’nin altında kalmış olup bu etkiler istatistiki olarak anlamlı bulunmamıştır. Parçacıklı GFRP laminatların ultra sert bir kaplama olan Ti-Namite ile kaplanmış WC parmak frezelerle, kaplamasız WC parmak frezelerle ve dökme uçlu WC parmak freze takımlarla frezelenmesinde de kesme hızı ve ilerleme miktarının etkisi de oldukça düşük bulunmuştur [15].

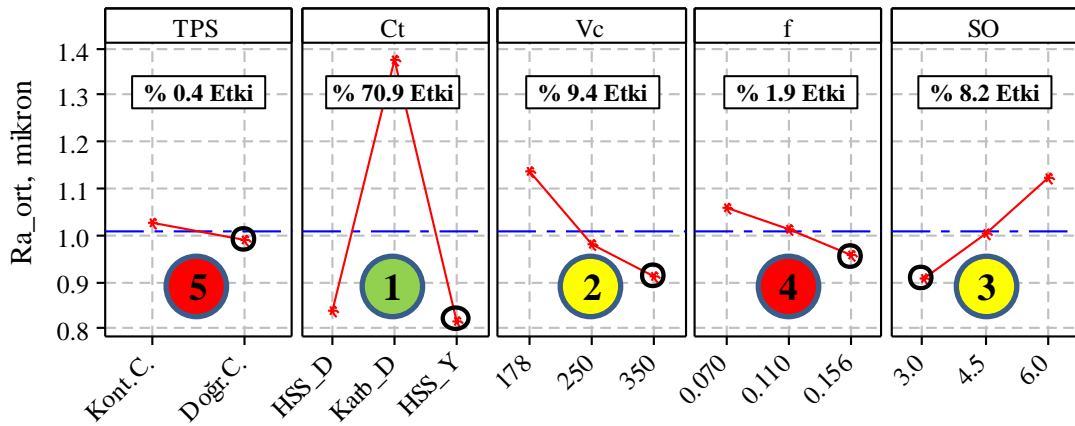
KLK’nın doğrusal cep işleme çevrimi (doğrusal takım yolu stratejisi) ile işlenmesinde elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri kontur cep işleme çevrimine göre bir miktar (%3) daha düşük çıkmıştır. İki boyutlu, kompleks yüzeylere sahip olmayan cep işlemlerde kesici takım kendi eksenini etrafında dönme hareketi yaparken cep tabanına paralel şekilde ilerleme hareketi yapmaktadır. Doğrusal cep işlemede cep tabanına paralel devam eden bu ilerleme hareketleri ve takım yana kaymaları cebin sınırları içerisinde bir eksen üzerinde olmaktadır. Kontur cep işlemede ise kesici takım cep profilini/şeklini referans alır ve cebin alan sınırları içerisinde kalarak belirlenmiş başlangıç noktasından kesmeye başlar. Kesici takım istenilen yana kayma mesafesinde doğrusal ya da dairesel (birleşik) hareketlerden oluşan bir yörüngede hareket ederek cebin işlenmesini tamamlar. Bu çalışmada seçilen cebin, aynı kesme şartlarında, doğrusal cep işleme çevrimi ile ya da kontur cep işleme çevrimi ile işlenmesinde cep işleme süreleri birbirinden farklı çıkmıştır. Kontur cep işlemede cep işleme süresi daha uzun çıkmıştır. Kontur cep işlemede işleme süresinin daha uzun olması kesicinin kat etmiş olduğu takım yolunun daha uzun olması kesici takım kesme kenarının cebin taban yüzeyine daha fazla temas etmesi ve işlenmiş yüzeyleri deforme etmesi anlamına gelmektedir. Bu sebepten dolayı, kontur cep işlenmiş yüzeylerin doğrusal cep işlenmiş yüzeylere göre bir miktar daha pürüzlü olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan, KLK malzemenin reçine matrisinin kontur cep işlemedeki birleşik/dairesel hareketlerle oluşan ısı sonucu yapısal değişimi de kontur cep işlemede daha kötü yüzeylerin elde edilmesine sebep olabilir.

KLK malzeme üzerine cep işlemede kesici takım malzemesi ve tipi yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre (%70.9) olmuştur (Şekil 5). Düz helisel HSS parmak freze yerine kenarları yuvarlatılmış helisel HSS parmak freze kullanmak Ra yüzey pürüzlülüğünü %2.56 oranında, düz helisel kaplamasız sinterlenmiş karbür parmak freze takım yerine kenarları yuvarlatılmış helisel HSS parmak freze kullanmak Ra yüzey pürüzlülüğünü %68.1 oranında iyileştirmiştir. Bu durum, HSS takım ile işlemede KLK matris malzemesinin takım kesme kenarlarında daha az yığılarak kesme kenarlarının kesme kabiliyetini zayıflatmamasına atfedilebilir. KLK’nın yüksek kesme hızında cep frezelenmesinde daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. Valarmathi vd, ahşap kompozit panellerin HSS takımlarla işlenmesinde minimum yüzey pürüzlülüklerinin elde edilmesi için yüksek kesme hızının seçilmesi gerektiğini bildirmektedirler [1]. Nurhaniza vd. CFRP’nin PCD takım ile frezelenmesinde daha iyi yüzey kalitesi için yüksek kesme hızında işlemeyi önermektedirler [10]. Ali vd. GFRP LK’nın delme ve frezeleme işlemlerinde yüksek kesme hızı ile işleminin daha uygun olacağını tespit

etmişlerdir [11]. Raj ve Perumal tarafından yapılan çalışmada GFRP laminatların karbür parmak freze takımlarla yüksek kesme hızlarında işlenmesinde daha iyi yüzey kaliteleri elde edilmiştir [15].

KLK'nın yüksek ilerleme miktarlarında işlenmesinde daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. İlerleme miktarının tespit edilen bu etkisi literatürde farklı laminat malzemeler üzerine yapılan işlenebilirlik çalışmalarında elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermemektedir [1, 9, 10]. Bu durum, özellikle yüksek kesme hızlarında ve daha düşük ilerleme miktarlarında kesme işlemi sürdüren kesici takımın iş parçası malzemesi ile daha fazla temasta kalması sonucu oluşan ısı etkisi ile kesici takım malzemesine göre oldukça düşük sertlikteki KLK matris malzemesinin yapısal değişimi sonucu kesme bölgesindeki iş yüzeyinin bozulmasına atfedilebilir. Yine, düşük ilerleme miktarlarında kesici takım kesme kenarları düşük sertlikteki KLK'nın işlenmiş yüzeyini daha fazla çizmiş olacaktır. Kesici takımın yana kayma mesafesi  $R_a$  yüzey pürüzlülüğü üzerinde %8.1 etkili olup artan yana kayma mesafesi ile cebin yüzey kalitesi kötüleşmiştir. Kesici takımın yana kayma mesafesi arttığında kaldırılacak talaş kesit alanı ve hacmi artmaktadır. Düşük yana kayma mesafesinde ise kesici takım çapının bir bölümü işlenmiş yüzey üzerinde hareket edeceği için bir önceki takım yolunda kesilememiş talaşın kesilmesini sağlayarak yüzeyin iyileşmesini sağlayacaktır.

Şekil 5'ten KLK'nın  $\varnothing 12.7$  mm parmak freze takımlarla cep frezelenmesinde minimum yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri de ( $TPS_2-Ct_3-Vc_3-f_3-SO_1$ ) belirlenebilir. Sadece minimum  $R_a$  yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesi hedeflendiğinde; KLK'nın kenarları yuvarlatılmış HSS helisel parmak ile yüksek kesme hızlarında ( $Vc:350$  m/dak), yüksek ilerleme miktarlarında ( $f:0.156$  mm/dev) düşük yana kayma mesafelerinin ( $SO=3.0$  mm) uygulandığı doğrusal cep işleme çevrimleri işlenmesi gerekmektedir.



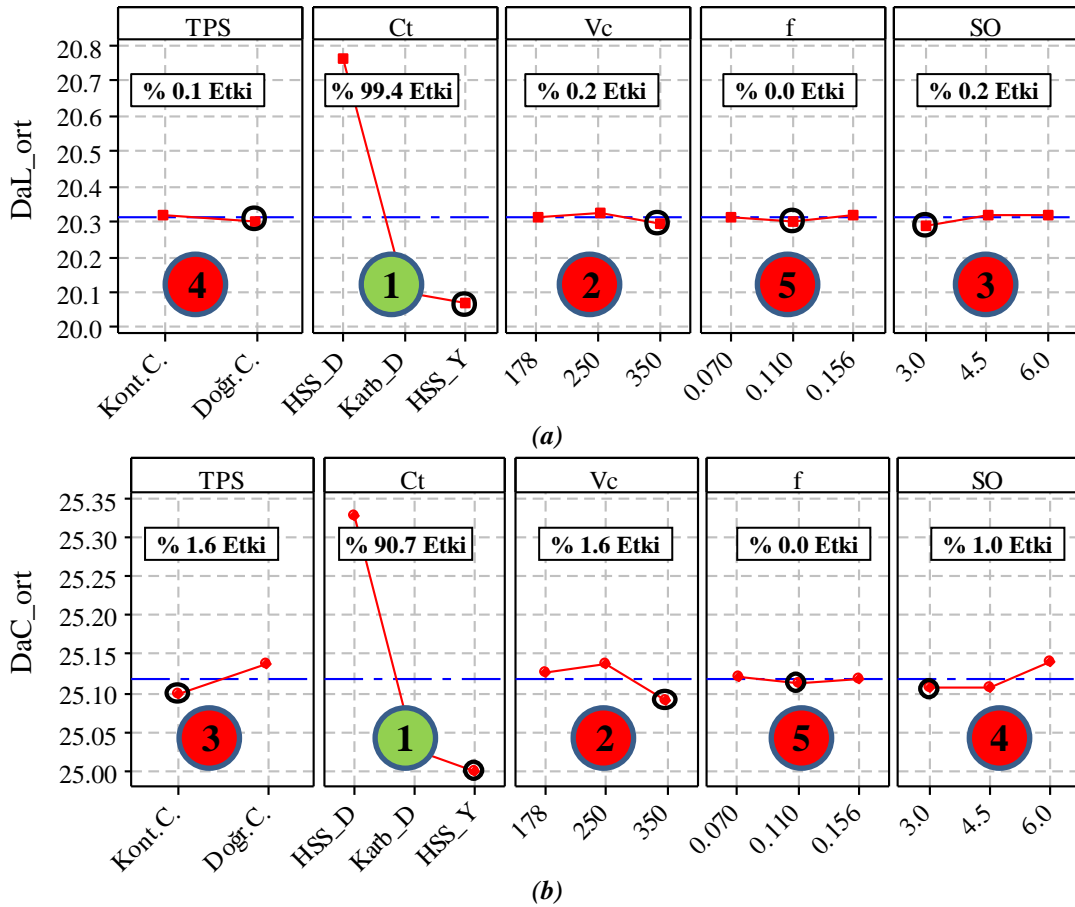
Şekil 5. Yüzey pürüzlülüğü üzerine cep frezeleme parametrelerinin etkisi-Varyansın: Artık hata=9.2,  $S=0.1393$ ,  $R^2=\%90.8$ , Ayarlı  $R^2=\%80.4$ .

### B.CEP FREZELEME PARAMETRELERİNİN BOYUTSAL TAMLIĞA ETKİLERİ

KLK'nın üç farklı kesici takım ile frezelenmesinde cep frezeleme parametrelerinin doğrusal boyutsal tamlık ve dairesel boyutsal tamlık üzerindeki ana etkileri sırasıyla Şekil 6.a ve Şekil 6.b'de gösterilmektedir. Şekil 6'da, cep frezeleme parametrelerinin  $Da_L$  ve  $Da_C$  üzerindeki etki sıralamasını ve % etkilerini gösteren Varyans analizi sonuçları da bulunmaktadır.  $Da_L$  için Varyans analizi korelasyon katsayısı  $R^2=99.6$ ,  $Da_C$  için ise  $R^2=95.1$  olarak hesaplanmıştır.  $Da_L$  üzerinde en etkili parametre kesici takım malzemesi ve tipi (%99.4) olmuş iken diğer cep işleme parametrelerinin etkisi %1'in altında kalmıştır (Şekil 6.a). Aynı şekilde,  $Da_C$  üzerinde de en etkili parametre kesici takım

malzemesi ve türü (%90.7) olmuştur. Diğer parametrelerin etkisi %2'nin altında kalarak istatistiki olarak anlamlı bulunmamıştır. Diğer kesici takımlara göre kenarları yuvarlatılmış helisel HSS parmak freze takımlarla nominal ölçülere daha yakın boyutsal tamlıkta cepler elde edilmiştir. Bu durum kullanılan kesici takımın geometrisinin talaş kaldırma/uzaklaştırma kabiliyeti ve temiz kesim yeteneğine atfedilmiştir. Kesme hızının boyutsal tamlık üzerindeki etkisi de Ra yüzey pürüzlülüğü ile benzer çıkmıştır. Artan kesme hızı ile nominal ölçülere daha yakın boyutsal tamlıkta cepler elde edilmiştir. KLK'nın matris malzemesi göz önünde bulundurulduğunda, bu durum, artan kesme hızı ile kesme kuvvetlerinin azalmasına, malzemenin elastik deformasyonu kolaylaşmasına ve daha yüksek kesme hızlarında radyal fener mili hatalarının/etkilerinin azalmasına atfedilebilir. Cebin nihai şekli kesici takımın cebin sınırlarına paralel bir şekilde hareketi ile verilmektedir. KLK malzemenin işlenebilirliğinin yüksek, sertliğinin ise kullanılan kesici takım sertliklerine göre oldukça düşük olması sebebiyle ilerleme miktarı artışının cebin boyutsal tamlığı üzerine anlamlı etkisi olmadığı söylenebilir. İstatistiki olarak anlamlı olmasa dahi yana kayma mesafesinin artmasıyla cebin boyutsal tamlığı azalmış ve nominal ölçülerden daha büyük değerlerde cepler elde edilmiştir. Bu durum artan yana kayma mesafesi ile talaş kaldırılacak kesme alanından daha fazla talaşın kaldırılmasına atfedilebilir.

KLK'nın Ø12.7 mm parmak freze takımlarla cep frezelenmesinde Şekil 1.a'da gösterilen nominal ölçülere (L=20 mm, R=25 mm) daha yakın boyutsal tamlıkta cepler elde etmek üzere  $Da_L$  ve  $Da_C$  için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri sırasıyla;  $TPS_2-Ct_3-Vc_3-f_2-SO_1$  ve  $TPS_1-Ct_3-Vc_3-f_2-SO_1$ 'dir (Şekil 6.a ve b).



Şekil 6. Boyutsal tamlık üzerine cep frezelenme parametrelerinin etkileri, (a) Doğrusal boyutsal tamlık üzerine cep frezelenme parametrelerinin etkisi-Varyansın: Artık hata=0.2,  $S=0.02039$ ,  $R^2=\%99.8$ , Ayrılmış  $R^2=\%99.6$ , (b) Dairesel boyutsal tamlık üzerine cep frezelenme parametrelerinin etkisi-Varyansın: Artık hata=4.9,  $S=0.05169$ ,  $R^2=\%95.1$ , Ayrılmış  $R^2=\%89.6$

### C. DOĞRULAMA DENEYLERİ VE GÜVEN ARALIĞININ HESAPLANMASI

Ra\_ort, Da<sub>L</sub>\_ort ve Da<sub>C</sub>\_ort için sırasıyla optimal Ra yüzey pürüzlülük değeri Ra\_opt, optimal doğrusal boyutsal tamlık değeri Da<sub>L</sub>\_opt ve optimal dairesel boyutsal tamlık değeri Da<sub>C</sub>\_opt varyans analizlerinde etkili (P<0.05) kontrol faktörlerinin belirlenmesi ile (Şekil 5, Şekil 6) ve yine kontrol faktörlerinin optimum kombinasyonları (Ra\_ort için TPS<sub>2</sub>-Ct<sub>3</sub>-Vc<sub>3</sub>-f<sub>3</sub>-SO<sub>1</sub>, Da<sub>L</sub>\_ort için TPS<sub>2</sub>-Ct<sub>3</sub>-Vc<sub>3</sub>-f<sub>2</sub>-SO<sub>1</sub> ve Da<sub>C</sub>\_ort için TPS<sub>1</sub>-Ct<sub>3</sub>-Vc<sub>3</sub>-f<sub>2</sub>-SO<sub>1</sub>) dikkate alınarak aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır:

$$Ra_{opt}=T_{Ra_{ort}}+(Ct_3-T_{Ra_{ort}})=1.0106+(0.8178-1.0106)=0.8178\mu m \quad (3)$$

$$Da_{L_{opt}}=T_{Da_{L_{ort}}}+(Ct_3-Da_{L_{ort}})=20.3121+(20.07-20.3121)=20.07mm \quad (4)$$

$$Da_{C_{opt}}=T_{Da_{C_{ort}}}+(Ct_3-Da_{C_{ort}})=25.1187+(25.00-25.1187)=25.00mm \quad (5)$$

Yukarıdaki denklemlerde, T<sub>Ra\_ort</sub>; çalışmada ölçülmüş tüm Ra yüzey pürüzlülüklerinin ortalaması, T<sub>Da<sub>L</sub>\_ort</sub> ölçülmüş tüm Da<sub>L</sub> değerlerinin ortalaması ve T<sub>Da<sub>C</sub>\_ort</sub> ölçülmüş tüm Da<sub>C</sub> değerlerinin ortalamasıdır (Tablo 3). Her bir denklemdeki Ct<sub>3</sub> değerleri ise Taguchi metoduna göre Ra\_ort, Da<sub>L</sub>\_ort ve Da<sub>C</sub>\_ort için yapılan çözümlenmelerle elde edilen yanıt tablolarında Ra yüzey pürüzlülüğü için minimum, doğrusal ve dairesel boyutsal tamlık için ise nominal değeri veren kesici takımın kullanılmasıyla elde edilen değerlerdir.

Ra\_ort üzerinde sadece etkili olan kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinin hesaba katılmasıyla Ra<sub>opt</sub>=0.8178 μm (Denklem 3) olarak hesaplanmış iken tüm kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinin (TPS<sub>2</sub>-Ct<sub>3</sub>-Vc<sub>3</sub>-f<sub>3</sub>-SO<sub>1</sub>) hesaba katılmasıyla tahminsel olarak Ra<sub>opt</sub>=0.545 μm hesaplanmıştır. Aynı şekilde, Da<sub>L</sub>\_ort için Da<sub>L</sub>\_opt=20.0700 mm olarak hesaplanmış iken tüm kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinin (TPS<sub>2</sub>-Ct<sub>3</sub>-Vc<sub>3</sub>-f<sub>2</sub>-SO<sub>1</sub>) hesaba katılmasıyla tahminsel olarak Da<sub>L</sub>\_opt=20.0144 μm hesaplanmıştır. Son olarak, Da<sub>C</sub>\_ort için Da<sub>C</sub>\_opt=25.0000 mm olarak hesaplanmış iken tüm kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinin (TPS<sub>1</sub>-Ct<sub>3</sub>-Vc<sub>3</sub>-f<sub>2</sub>-SO<sub>1</sub>) hesaba katılmasıyla tahminsel olarak Da<sub>C</sub>\_opt=24.9370 μm hesaplanmıştır.

Ra\_opt, Da<sub>L</sub>\_opt ve Da<sub>C</sub>\_opt'un kalite karakteristiğini belirlemek için güven aralıkları (CI<sub>Ra\_opt</sub>, CI<sub>Da<sub>L</sub>\_opt</sub> ve CI<sub>Da<sub>C</sub>\_opt</sub>) Denklem 6-8'de sayısal değerler yerine konularak Denklem 1 ve Denklem 2 yardımı ile hesaplanmıştır;

$$CI_{Ra_{opt}}=\sqrt{F_{\alpha,1,V_2} \cdot V_e \cdot \left( \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)}=\sqrt{6.94 \cdot 0.019415 \cdot 0.056 \cdot 0.333}=\sqrt{0.052}=0.229\mu m \quad (6)$$

$$CI_{Da_{L_{opt}}}=\sqrt{F_{\alpha,1,V_2} \cdot V_e \cdot \left( \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)}=\sqrt{6.94 \cdot 0.000416 \cdot 0.056 \cdot 0.333}=\sqrt{0.001}=0.034mm \quad (7)$$

$$CI_{Da_{C_{opt}}}=\sqrt{F_{\alpha,1,V_2} \cdot V_e \cdot \left( \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)}=\sqrt{6.94 \cdot 0.002255 \cdot 0.056 \cdot 0.333}=\sqrt{0.006}=0.078mm \quad (8)$$

% 95 güven seviyesinde Ra\_ort için doğrulama testlerinin 0.8178±0.229 μm ya da 0.5888 μm–1.0468 μm aralığında olması beklenmiştir. Aynı şekilde, Da<sub>L</sub>\_ort için doğrulama testlerinin 20.07±0.034 mm (20.036 mm–20.104 mm), Da<sub>C</sub>\_ort için ise 25.00±0.078mm (24.922 mm–25.078 mm) olması beklenmiştir.

Minimum Ra yüzey pürüzlülük değerleri elde etmek üzere Taguchi Metodu ile belirlenmiş kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinde (TPS<sub>2</sub>-Ct<sub>3</sub>-Vc<sub>3</sub>-f<sub>3</sub>-SO<sub>1</sub>) doğrulama deneyleri yapılmış ve doğrulama deneyi sonrasında Ra yüzey pürüzlülük değeri (Ra<sub>doğ</sub>)=0.873 µm ölçülmüştür. Ölçülen bu değer Ra değeri hesaplanan üst sınır ve alt sınır yüzey pürüzlülük değerleri (güven aralıkları) içerisinde kalmıştır (0.5888 µm<0.873 µm<1.0468 µm). Yine, Da<sub>L</sub> için kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinde (TPS<sub>2</sub>-Ct<sub>3</sub>-Vc<sub>3</sub>-f<sub>2</sub>-SO<sub>1</sub>) ve Da<sub>C</sub> için kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinde (TPS<sub>1</sub>-Ct<sub>3</sub>-Vc<sub>3</sub>-f<sub>2</sub>-SO<sub>1</sub>) yapılan doğrulama deneylerinde ölçülen boyutsal tamlık değerleri sırasıyla; Da<sub>L</sub><sub>doğ</sub>=20.0634 mm ve Da<sub>C</sub><sub>doğ</sub>=25.0372 mm ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler de 20.036 mm<20.0634 mm<20.104 mm ve 24.922 mm<25.0372 mm<25.078 mm boyutları arasında kalmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada minimum Ra<sub>ort</sub>, nominal Da<sub>L</sub><sub>ort</sub> ve nominal Da<sub>C</sub><sub>ort</sub> için kontrol faktörlerinin optimum şartlarından yapılan doğrulama deneylerinde ölçülen Ra, Da<sub>L</sub> ve Da<sub>C</sub> değerleri hesaplanan güven aralığında ölçülmüştür. Böylece, çalışmada bu aşamaya kadar hedeflenen Ra, Da<sub>L</sub> ve Da<sub>C</sub> değerlerinin her biri için, ayrı ayrı, (tek amaçlı) cep frezeleme parametrelerinin optimum şartları belirlenmiş ve yapılan doğrulama testleri ölçüm sonuçlarının hesaplanan güven aralıkları içerisinde kaldığı görülmüştür. Bu aşamadan sonra hedeflenen Ra, Da<sub>L</sub> ve Da<sub>C</sub> değerlerinin aynı anda elde edilmesini sağlayan cep frezeleme parametrelerinin belirlenmesi çok amaçlı optimizasyon yöntemi olan Gri İlişkisel Analiz (GRA) ile yapılmıştır.

#### D.GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ İLE CEP FREZELEME PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

KLK malzeme üzerine üç farklı parmak freze takım ile cep işlemede cebin hem minimum yüzey pürüzlülüğünde ve hem de istenilen boyutsal tamlıkta elde edilmesi için GRA yönteminin ilgili işlem basamakları takip edilmiş ve gerekli hesaplama ve analizleri yapılarak Tablo 4'te sunulmuştur. GRA derecenin en büyük değerinin yer aldığı deney no/satırda nominal Da ve minimum Ra'nın elde edildiği optimum cep frezeleme şartları yer almaktadır (Tablo 4).

**Tablo 4.** Taguchi L18 ortogonal dizi, gri ilişkisel katsayıları ve gri ilişkisel dereceleri.

D.N.	Cep Frezeleme Parametrelerinin Seviyeleri					Deneysel Ölçüm Sonuçları			GRA Katsayısı			Gri İlişkisel Derece	GRA'ya Göre En İyi Sıralama
	TPS	Ct	Vc	f	SO	Ra <sub>ort</sub>	Da <sub>L</sub> <sub>ort</sub>	Da <sub>C</sub> <sub>ort</sub>	Ra <sub>ort</sub>	Da <sub>L</sub> <sub>ort</sub>	Da <sub>C</sub> <sub>ort</sub>		
									%50	%25	%25		
1	Kont.C. (1)	HSS_D (1)	178	0.070	3.0	0.990	20.7698	25.3593	0.594	0.201	0.215	0.337	17
2	Kont.C. (1)	HSS_D (1)	250	0.011	4.5	0.806	20.7765	25.2826	0.770	0.200	0.258	0.409	16
3	Kont.C. (1)	HSS_D (1)	350	0.156	6.0	0.694	20.7698	25.2901	0.939	0.201	0.253	0.465	15
4	Kont.C. (1)	Karb_D (2)	178	0.070	4.5	1.487	20.1463	25.0413	0.367	0.570	0.705	0.547	11
5	Kont.C. (1)	Karb_D (2)	250	0.011	6.0	1.619	20.1223	25.0425	0.333	0.613	0.699	0.548	10
6	Kont.C. (1)	Karb_D (2)	350	0.156	3.0	1.102	20.0756	24.934	0.521	0.720	0.599	0.613	8
7	Kont.C. (1)	HSS_Y (3)	178	0.011	3.0	0.881	20.0386	24.9241	0.687	0.834	0.565	0.695	5
8	Kont.C. (1)	HSS_Y (3)	250	0.156	4.5	0.789	20.1184	25.0363	0.791	0.621	0.731	0.714	4
9	Kont.C. (1)	HSS_Y (3)	350	0.070	6.0	0.891	20.0663	24.9794	0.677	0.745	0.827	0.750	3
10	Doğr.C. (2)	HSS_D (1)	178	0.156	6.0	1.208	20.7751	25.394	0.467	0.200	0.200	0.289	18
11	Doğr.C. (2)	HSS_D (1)	250	0.070	3.0	0.668	20.7332	25.3049	0.990	0.209	0.244	0.481	13
12	Doğr.C. (2)	HSS_D (1)	350	0.011	4.5	0.67	20.7617	25.3345	0.986	0.203	0.227	0.472	14
13	Doğr.C. (2)	Karb_D (2)	178	0.011	6.0	1.444	20.0959	25.0744	0.380	0.669	0.570	0.540	12
14	Doğr.C. (2)	Karb_D (2)	250	0.156	3.0	1.139	20.1097	25.0921	0.501	0.639	0.517	0.552	9
15	Doğr.C. (2)	Karb_D (2)	350	0.070	4.5	1.456	20.071	24.9815	0.376	0.732	0.842	0.650	6
16	Doğr.C. (2)	HSS_Y (3)	178	0.156	4.5	0.811	20.0579	24.9729	0.764	0.770	0.784	0.773	2
17	Doğr.C. (2)	HSS_Y (3)	250	0.070	6.0	0.872	20.1046	25.0662	0.696	0.650	0.598	0.648	7
<b>18</b>	<b>Doğr.C. (2)</b>	<b>HSS_Y (3)</b>	<b>350</b>	<b>0.011</b>	<b>3.0</b>	<b>0.663</b>	<b>20.0256</b>	<b>25.0267</b>	<b>1.000</b>	<b>0.883</b>	<b>0.787</b>	<b>0.890</b>	<b>1*</b>

\*Nominal ölçüye yakın Da ve minimum Ra değerlerinin elde edildiği deney no/cep frezeleme şartları



Tablo 4'te görüleceği üzere, KLK malzeme 18 nolu deneyde yer alan cep frezeleme şartlarında; TPS<sub>2</sub>-Ct<sub>3</sub>-Vc<sub>3</sub>-f<sub>2</sub>-SO<sub>1</sub> (TPS<sub>2</sub>: Doğrusal cep işleme, Ct<sub>3</sub>:Kenarları yuvarlatılmış helisel HSS parmak freze, Vc<sub>3</sub>:350 m/dak, f<sub>2</sub>:0.011 mm/dev, SO<sub>1</sub>:3 mm) hem nominal değerlere yakın boyutsal tamlıkta dogrusal ve dairesel cep boyut değerleri hem de minimum Ra yüzey pürüzlülük değerlerine sahip cepler çok amaçlı olarak elde edilecektir.

Gri ilişkisel derece için ANOVA sonuçları Tablo 5'te sunulmuştur. Gri ilişkisel derece üzerinde anlamlı etkisi olan cep frezeleme parametreleri (P<0.05) "\*" ile belirtilmiştir. Tablo 5'te gri ilişkisel derece (Ra<sub>ort</sub>, Da<sub>1\_ort</sub> ve Da<sub>c\_ort</sub>) üzerinde en etkili cep frezeleme parametreleri %81.52 katkı oranıyla kesici takım tipi ve malzemesi olmuştur. Kesici takım tipi ve malzemesini %9.36 katkı oranı ile kesme hızı takip etmiştir. Diğer cep frezeleme parametrelerinin gri ilişkisel derece üzerinde anlamlı etkileri tespit edilmemiştir.

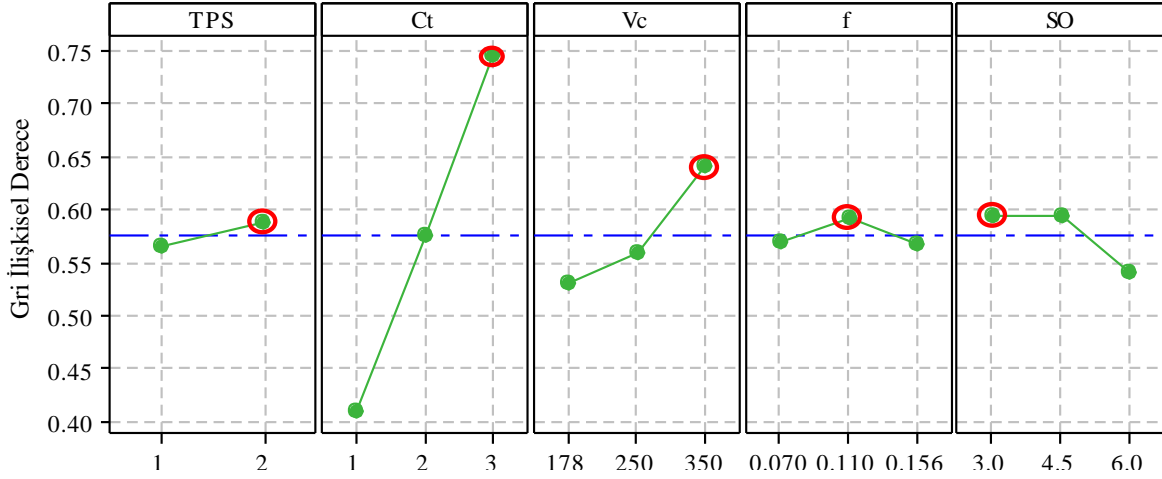
**Tablo 5.** Gri İlişkisel derece için varyans analizi

Kaynak	DoF	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	% Katkı
TPS	1	0.002579	0.002579	0.98	0.351	0.62
Ct	2	0.339051	0.169525	64.4	<b>0.000*</b>	<b>81.52</b>
Vc	2	0.038941	0.01947	7.4	<b>0.015*</b>	<b>9.36</b>
F	2	0.002343	0.001171	0.44	0.656	0.56
SO	2	0.011932	0.005966	2.27	0.166	2.87
Artık Hata	8	0.02106	0.002633			5.06
Toplam	17	0.415906				100.00

\*Anlamlı parametre, S td. Sapma= 0.051, Korelasyon katsayısı (R<sup>2</sup>)=%94.94, Ayarlı R<sup>2</sup>=%89.24

Gri ilişkisel derece için ana etki grafiği Şekil 7'de sunulmuştur. Yüksek gri ilişkisel derece değeri kontrol faktörlerinin optimal seviyesini göstermektedir. Buna göre, kontrol faktörlerinin optimal seviyeleri; TPS<sub>2</sub>-Ct<sub>3</sub>-Vc<sub>3</sub>-f<sub>2</sub>-SO<sub>1</sub> (TPS<sub>2</sub>:Doğrusal cep işleme, Ct<sub>3</sub>:Kenarları yuvarlatılmış HSS parmak freze, Vc<sub>3</sub>:350 m/dak, f<sub>2</sub>:0.011 mm/dev, SO<sub>1</sub>:3 mm) hem nominal değerlere yakın boyutsal tamlıkta dogrusal ve dairesel cep boyut değerleri hem de minimum Ra yüzey pürüzlülük değerlerine sahip cepler elde edilecektir.

Cep frezeleme parametrelerinin etki sıralaması Şekil 7'deki grafik üzerinde incelendiğinde gri ilişkisel derece üzerinde en etkili parametreler Tablo 4'te verilen ANOVA sonuçlarını destekler şekilde kesici takım tipi ve malzemesi, kesme hızı, takımın yana kayma mesafesi, takım yolu stratejisi ve ilerleme miktarı olmuştur.



Şekil 7. Gri ilişkisel derece için ana etki grafiği

Son olarak, optimal cep işleme parametrelerinin tespitine GRA'nın katkısını belirlemek amacıyla GRA sonucu elde edilen kontrol faktörlerinin optimal seviyelerinde (TPS<sub>2</sub>-Ct<sub>3</sub>-Vc<sub>3</sub>-f<sub>2</sub>-SO<sub>1</sub>) deneysel olarak doğrulama deneyleri yapılmıştır. Doğrulama deneyleri sonucu ölçülmüş Ra yüzey pürüzlülüğü, doğrusal ve dairesel cep boyut ölçümlerinin ortalamaları (Ra<sub>ort</sub>, Da<sub>L\_ort</sub> ve Da<sub>C\_ort</sub>) Tablo 6'da sunulmuştur. Doğrulama deneyi sonucu elde edilen değerlerin (Ra<sub>ort</sub>=0.744 µm, Da<sub>L\_ort</sub>=20.0376 mm ve Da<sub>C\_ort</sub>=25.0086 mm) GRA sonucu tespit edilen 18 nolu deney sonuçlarına oldukça yakın olduğu görülmektedir (Tablo 6). Ayrıca, GRA'nın doğrulama deneylerinde ölçülen Ra<sub>ort</sub>, Da<sub>L</sub> ve Da<sub>C</sub> değerlerinin bir önceki bölümde hesaplanan güven aralıklarında (Ra<sub>ort</sub> için: 0.5888 µm<0.663 µm<1.0468 µm, Da<sub>L\_ort</sub> için: 20.036 mm<20.0376 mm<20.104 mm ve Da<sub>C\_ort</sub> için: 24.922 mm<25.0086 mm<25.078 mm) olduğu da tespit edilmiştir.

Diğer taraftan; Tablo 3'te sunulan 18 deney sonucunda elde edilen ortalama Ra<sub>ort</sub>, Da<sub>L\_ort</sub> ve Da<sub>C\_ort</sub> değerleriyle (Sırasıyla Ra<sub>ort</sub>=1.010 µm, Da<sub>L</sub>= 20.3121 mm ve Da<sub>C</sub>=25.1187 mm) Tablo 6'da sunulan GRA sonucu kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinde yapılan doğrulama deneyi sonuçları (Sırasıyla Ra<sub>ort</sub>=0.744 µm, Da<sub>L</sub>= 20.0376 mm ve Da<sub>C</sub>=25.0086 mm) kıyaslandığında;

- Ra yüzey pürüzlülüğü %76.66 oranında iyileştirilmiştir.
- Ceplerin işlenmesinde doğrusal ve dairesel boyutların nominal değerlerinden sıfır sapma beklenirken doğrusal boyutsal tamlık nominal değeri (Da<sub>L</sub>= 20 mm) gerçekleştirilen 18 adet deney sonrasında nominal değerden ortalama 0.3121 mm daha büyük çıkmıştır (Tablo 3). GRA analiz sonrasında optimal şartlarda yapılan doğrulama deneyinde ise boyut değeri 0.0376 mm daha büyük çıkmıştır (Tablo 6). GRA analiz yönteminin uygulanmasıyla nominal doğrusal boyut değerinden sapma azaltılarak doğrusal boyutsal tamlık % 830 oranında iyileştirilmiştir.
- Dairesel boyutsal tamlık nominal değeri (Da<sub>C</sub>= 25 mm) gerçekleştirilen 18 adet deney sonrasında nominal değerden ortalama 0.1187 mm daha büyük çıkmıştır (Tablo 3). GRA analiz sonrasında optimal şartlarda yapılan doğrulama deneyinde ise 0.0086 mm daha büyük çıkmıştır (Tablo 6). GRA analiz yönteminin uygulanmasıyla nominal dairesel boyut değerinden sapma azaltılarak dairesel boyutsal tamlık yaklaşık % 1380 oranında iyileştirilmiştir.

**Tablo 6.** Gri ilişkisel analiz sonucu kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinde yapılan doğrulama deneyinin sonuçları.

GRA Sonucu Kontrol Faktörlerinin Optimum Seviyeleri					GRA Sonucu Tespit Edilen 18 Nolu Deneyin Sonuçları			Doğrulama Deneyinin Sonuçları		
TPS (2)	Ct (3)	Vc (3)	f (2)	SO (1)	Ra_ort	Da <sub>r</sub> _ort	Da <sub>c</sub> _ort	Ra_ort	Da <sub>r</sub> _ort	Da <sub>c</sub> _ort
Doğr.C.	HSS_Y	350	0.011	3.0	0.663	20.0256	25.0267	0.744	20.0376	25.0086

## IV. SONUÇLAR

Kompakt laminat kompozit panellerin HSS ve sinterlenmiş karbür parmak freze takımlarıyla frezelenmesinde cep yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal tamlığı üzerinde frezeleme parametreleri olarak seçilen; takım yolu stratejisi (TPS), kesici takım tipi ve malzemesi (Ct), kesme hızı (Vc), ilerleme miktarı (f) ve takım yana kayma mesafesinin (SO) etkilerinin araştırıldığı ve optimize edildiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar şunlardır:

1. Ceplerin yan yüzeyleri ile iş parçasının üst yüzeyindeki kaplama katmanının kesiştiği noktada kaplama katmanının ayrılması/zarar görmesi şeklinde delaminasyon oluşumu gözlenmemiştir.
2. Ortalama Ra=1.000 µm yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.
3. Ra yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametreler sırasıyla kesici takım tipi ve malzemesi (%70.9), kesme hızı (%9.4) ve kesici takım yana kayma mesafesi (%8.2) olmuştur. Diğer parametrelerin etkisi % 2'nin altın kalmıştır.
4. Doğrusal cep işleme çevrimi ile kontur cep işleme çevrimine göre %3 daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir.
5. HSS takımlar sinterlenmiş karbür takımlara göre yaklaşık %68 oranında daha iyi yüzey kalitesi sağlamıştır.
6. Yüksek kesme hızı ve yüksek ilerleme miktarında daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. Kesici takım yana kayma mesafesinin arttırılmasıyla yüzey pürüzlülük değerleri artmıştır.
7. Doğrusal alanlarda nominal boyutlardan 0.3121 mm, dairesel alanlarda ise nominal boyutlardan 0.1187 mm daha büyük değerlerde cepler elde edilmiştir.
8. Doğrusal ve dairesel boyutsal tamlık üzerinde yaklaşık %90'ın üzerinde etki ile sadece kesici takım malzemesi etkili olmuştur. Seçilen diğer cep frezeleme parametrelerinin istatistiki olarak anlamlı etkisi tespit edilmemiştir.
9. Yüksek kesme hızı ve orta ilerleme miktarlarında nominal ölçülere daha yakın boyutsal tamlıkta cepler elde edilmiştir. Kesici takım yana kayma mesafesinin arttırılmasıyla nominal ölçülerden uzaklaşarak ceplerin doğrusal ve dairesel boyutları artmıştır.
10. Yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal tamlık için kontrol faktörlerinin belirlenen optimum seviyelerinde yapılan doğrulama deneyi sonuçları hesaplanan güven aralıkları içerisinde çıkmıştır.

11.Gri İlişkisel Analiz yöntemiyle yapılan çok amaçlı optimizasyon ile hem minimum yüzey pürüzlülüğü ve hem de nominal ölçülere daha yakın boyutsal tamlıkta cepler elde etmek için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri; TPS<sub>2</sub>:Doğrusal cep işleme, Ct<sub>3</sub>:Kenarları yuvarlatılmış helisel HSS parmak freze, Vc<sub>3</sub>:350 m/dak, f<sub>2</sub>:0.011 mm/dev, SO<sub>1</sub>:3 mm olarak belirlenmiştir.

12.Minimum Ra yüzey pürüzlülüğü, nominal doğrusal ve dairesel boyutsal tamlık değerlerini veren cep frezeleme parametreleri Taguchi metodunun kullanılmasıyla tek amaçlı ve Gri İlişkisel Analiz yönteminin kullanılmasıyla da çok amaçlı olarak başarılı bir şekilde optimize edilmiştir.

## V. KAYNAKLAR

[1] T. N.Valarmathi, K. Palanikumar and S. Sekar "Modeling of surface roughness in drilling of MDF panels", *Applied Mechanics and Materials*, vol. 766-767, pp. 831-836, 2015.

[2] Y. Karpat, O. Bahtiyar and B. Değer, "Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 56, pp. 79–93, 2012.

[3] Y. Karpat, O. Bahtiyar and B. Değer, "Milling Force Modelling of Multidirectional Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates", *Procedia CIRP*, vol. 1, pp.460-465, 2012.

[4] A. Hosokawa, N. Hirose, T. Ueda and T. Furumoto, "High-quality machining of CFRP with high helix end mill", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 63, no. 1, pp.89–92, 2014.

[5] W. Hintze, M. Cordes and G. Koerkel, "Influence of weave structure on delamination when milling CFRP", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 216, pp.199–205, 2015.

[6] S.C. Han, Y. Chen, J.H. Xu and J.W. Zhou, "Experimental study of tool wear in milling multidirectional CFRP laminates", *Materials Science Forum*, vol. 770, pp. 276-280, 2014.

[7] W. Hintze and D. Hartmann, "Modeling of delamination during milling of unidirectional CFRP", *Procedia CIRP*, vol. 8, pp. 444-449, 2013.

[8] O. Pecat, R. Rentsch and E. Brinksmeier, "Influence of milling process parameters on the surface integrity of CFRP", *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 466-470, 2012.

[9] M.H. El-Hofy, S.L. Soo, D.K. Aspinwall, W.M. Sim, D. Pearson and P. Harden, "Factors affecting workpiece surface integrity in slotting of CFRP", *Procedia Engineering*, vol. 19, pp. 94-99, 2011.

[10] M. Nurhaniza, M.K.A.M. Ariffin, F. Mustapha and B.T.H.T. Baharudin, "Analyzing the effect of machining parameters setting to the surface roughness during end milling of CFRP-Aluminium composite laminates", *International Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 2016, pp. 1-9, 2016.

[11] H.M. Ali, A. Iqbal and L. Liang "A comparative study on the use of drilling and milling processes in hole making of GFRP composite", *Sadhana*, vol. 38, no. 4, pp. 743–760, 2013.

- [12] A.I. Azmi, R.J.T. Lin and D. Bhattacharyya, “Experimental study of machinability of GFRP composites by end milling”, *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, no. 10, pp. 1045-1050, 2010.
- [13] M. Iliescu, P. Spânu and M. Costoiu, “Glass fibres reinforced polymeric composites - Statistic models of surface roughness”, *Materiale Plastice*, vol. 44, no. 4, pp.365-369, 2007.
- [14] N. Naresh, K. Rajasekhar and P. VijayaBhaskara Reddy, “Parametric analysis of GFRP composites in CNC milling machine using Taguchi method”, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 102-111, 2013.
- [15] P.P. Raj and A.E. Perumal, “Taguchi analysis of surface roughness and delamination associated with various cemented carbide K10 end mills in milling of GFRP”, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 3, no. 1, pp. 58-64, 2010.
- [16] G. Goli, M. Fioravanti, R. Marchal, L. Uzielli and S. Busoni, “Up-milling and down-milling wood with different grain orientations – the cutting forces behaviour”, *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 68, no. 4, pp. 385–395, 2010.
- [17] S.D. Sofuoglu, “Determination of optimal machining parameters of massive wooden edge glued panels which is made of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using Taguchi design method”, *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 75, no. 1, pp. 33–42, 2017.
- [18] A. Petrovic, L. Lukic, S. Ivanovic and A. Pavlovic, “Optimisation of tool path for wood machining on CNC machines”, *Proc IMechE Part C: J Mechanical Engineering Science*, vol. 231, no. 1, pp. 72-87, 2017.
- [19] B. Pałubicki and T. Rogoziński, “Efficiency of chips removal during CNC machining of Particleboard” *Wood Research*, vol. 61, no. 5, pp. 811-818, 2016.
- [20] G.D. Babu, K.S. Babu and B.U.M. Gowd, “Effect of machining parameters on milled natural fiberreinforced plastic composites”, *Journal of Advanced Mechanical Engineering*, vol. 1, pp.1-12, 2013.
- [21] T. Bilge, A.R. Motorcu ve A. Ivanov “Kompakt laminat kompozit malzemenin tungsten karbür takımlarla delinmesinde delaminasyon faktörünün değerlendirilmesi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 6, no. 3, pp.180-192, 2017.
- [22] T. Bilge, A.R. Motorcu ve A. Ivanov, “Kompakt laminant kompozitin delinmesinde yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi”, 17. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, Bursa, Türkiye, 2016, ss. 1-15.
- [23] Anonim, (3 Temmuz 2017). [Online]. Erişim: <http://www.asdlaminat.com/dosya/tds/compact-laminat-teknik-degerler-tr.pdf>.
- [24] Anonim, (3 Temmuz 2017). [Online]. Erişim: <https://drive.google.com/a/comu.edu.tr/file/d/0B9ho0dpYVTFONG9hdzJYeIVNNIE/view>.

[25] R.K. Roy, *A Primer on the Taguchi Method. Competitive Manufacturing Series*, 1st ed., New York, USA: Van Nostrand Reinhold, 1990, pp: 25-75.

[26] E. Yılmaz ve F. Güngör, “Gri ilişkisel analiz yöntemine göre farklı sertliklerde optimum takım tutucusunun belirlenmesi”, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir, Türkiye, 2010, ss. 1-9.