



An optimization for milling operation of Kevlar fiber-epoxy composite material using factorial design and goal programming methods

Yusuf Tansel İç^{1*}, Faruk Elaldı², Barış Keçeci¹, Gözde Önder Uzun¹, Nur Limoncuoğlu³, İrem Aksoy⁴

¹Department of Industrial Engineering, Başkent University, 06810, Ankara, Turkey.

²Department of Mechanical Engineering, Başkent University, 06810, Ankara, Turkey.

³Mesa Manufacturing Co., Sincan, Ankara, Turkey.

⁴7949 Stromesa ct. Suite D, San Diego, Ca, 92126.

Highlights:

- The cutting parameters of the Kevlar fiber-epoxy composite material are optimized by using the integrated 2^k factorial design and goal programming methods.
- Minimum delamination and minimum surface roughness of kevlar fiber-epoxy composite and the best machining parameters are determined for the material.
- The results are compared with the results of the multi-criteria decision-based Taguchi methods

Keywords:

- Kevlar fiber-epoxy composite material
- Design of experiment
- Factorial design
- Multi response optimization
- Goal programming

Article Info:

Research Article

Received: 26.12.2016

Accepted: 05.11.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.570704

Correspondence:

Author: Yusuf Tansel İç

e- mail:

yustanic@baskent.edu.tr

phone: +90 312 246 6664

Graphical/Tabular Abstract

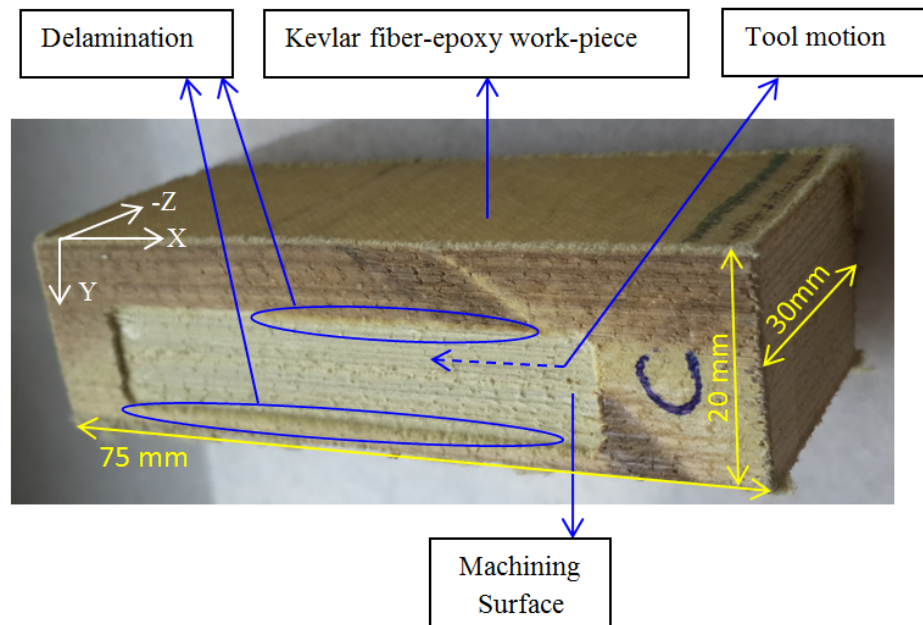


Figure A. (Machined work-piece)

Purpose: In this study, the multi-objective cutting parameters are concurrently optimized for minimum delamination and minimum surface roughness of Kevlar fiber-epoxy composite and the best machining parameters have been obtained for the material.

Theory and Methods: The integrated 2^k factorial design and goal programming methods were used in this study.

Results: The results were compared with the results of the multi-attribute decision making-based Taguchi methods (TOPSIS-Taguchi, GRA-Taguchi, and VIKOR-Taguchi) and satisfactory/better results are obtained.

Conclusion: The optimum cutting parameters were determined as feed rate: 94 mm/min, depth of cut: 1.96 mm, width of cut: 5mm, and spindle speed: 1700 rpm in goal programming



Kevlar fiber-epoksi kompozit malzemesinin frezeleme işleminin faktöriyel tasarım ve hedef programlama yöntemleriyle eniyilemesi

Yusuf Tansel İç^{1*}, Faruk Elaldi², Barış Keçeci¹, Gözde Önder Uzun¹, Nur Limoncuoğlu³, İrem Aksoy⁴

¹Başkent Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bağlıca Kampüsü, Eskişehir Yolu 20. Km., Etimesgut, 06810, Ankara, Türkiye.

²Başkent Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bağlıca Kampüsü, Eskişehir Yolu 20. Km., Etimesgut, 06810, Ankara, Türkiye.

³Mesa İmalat San. Ve Tic. A.Ş., Mustafa Kemal Mah., Kayı Cad., No: 92, Yenikent/Sincan, Ankara, Türkiye.

⁴7949 Stromesa ct. Suite D, San Diego, Ca, 92126.

O N E Ç İ K A N L A R

- Kevlar fiber-epoksi kompozit malzemesinin kesme parametreleri 2^k faktöriyel tasarım ve hedef programlama yöntemleri kullanılarak eniyelenmiştir.
- Minimum delaminasyon ve minimum yüzey pürüzlülüğü için en iyi kesme parametreleri belirlenmiştir.
- Sonuçlar çok ölçütlü karar verme yöntemleri tabanlı Taguchi yöntemi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 26.12.2016

Kabul: 05.11.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.570704

Anahtar Kelimeler:

Kevlar fiber-epoksi kompozit malzemesi,
deney tasarımı,
faktöriyel tasarım,
çok yanıtli eniyileme,
hedef programlama

ÖZET

Kevlar fiber-epoksi kompozit malzemesi, çeşitli üstün özelliklerinden dolayı kullanımının getirdiği avantajlar nedeniyle günümüzde birçok üretim alanında özellikle balistik koruyucu amaçlı olarak tercih edilmektedir. Kevlar fiber-epoksi kompozit malzemesinin işlenmesi sırasında daha çok geleneksel işleme yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak kesme parametrelerine ait uygun seviyeler belirlenmediği için malzemenin işlenmesi sırasında çeşitli bozulmalar yaşanmaktadır. Makale kapsamında 2^k faktöriyel tasarım tekniği ile hedef programlama yöntemi bütünleşik olarak kullanılarak, kevlar fiber-epoksi kompozit malzemenin frezeleme operasyonunun iki kalite karakteristiği olan delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğünün eşzamanlı olarak eniyelenmesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar çok ölçütlü karar verme tabanlı Taguchi yöntemleri sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

An optimization for milling operation of Kevlar fiber-epoxy composite material using factorial design and goal programming methods

H I G H L I G H T S

- The cutting parameters of the kevlar fiber-epoxy composite material are optimized by using the integrated 2^k factorial design and goal programming methods.
- Minimum delamination and minimum surface roughness of kevlar fiber-epoxy composite and the best machining parameters are determined for the material.
- The results are compared with the results of the multi-criteria decision-based Taguchi methods

Article Info

Research Article

Received: 26.12.2016

Accepted: 05.11.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.570704

Keywords:

Kevlar fiber-epoxy
composite material,
design of experiment,
factorial design,
multi response optimization,
goal programming

ABSTRACT

Kevlar fiber-epoxy composite material is extensively used in manufacturing areas because of the advantages of composite material's characteristics. It is usually processed by traditional machining methods but the drawbacks for determination of optimum cutting parameters might cause some material deformations during machining process. In this study, the cutting parameters are concurrently optimized by using the integrated 2^k factorial design and goal programming methods for minimum delamination and minimum surface roughness of Kevlar fiber-epoxy composite and the best machining parameters have been obtained for the material. The results were compared with the results of the multi-criteria decision-based Taguchi methods.

*Sorumlu Yazar/Corresponding yustanic@baskent.edu.tr, elaldi@baskent.edu.tr, bkececi@baskent.edu.tr, gonder@baskent.edu.tr, nur_lim@hotmail.com, iremaksoy_3@hotmail.com / Tel: +90 312 246 6664
1550

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İki ya da daha fazla malzemenin (genellikle farklı kimyasal özelliklere sahip) kullanım alanına göre makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan yeni malzemelere “kompozit malzemeler” denir [1]. Kompozit malzemeler matris ve fiber malzemeden oluşmaktadır. Matrisler kompozitleri oluşturan ana malzemelerdir. Matris malzemeler; kompozit malzeme bir kuvvete maruz kaldığında, fiber malzemede oluşabilecek herhangi bir plastik deformasyonda meydana gelen çatlakların büyümesini ve böylece kompozit malzemenin zarar görmesini engellemektedir. Fiber malzemeler ise kompozitlere dayanıklılık kazandırarak sağlamlığını arttırmak için kullanılan takviye malzemelerdir [1].

Kompozit malzemeler içerdikleri matris malzemeye göre sınıflandırıldıklarında *i*) Polimer matrisli, *ii*) Seramik matrisli ve *iii*) Metal matrisli olarak 3 grupta toplanabilir. Polimer matrisli kompozitlerin ana malzemesi olan polimerler, genellikle üzerinde çalışılması en kolay olan malzemelerdir. Bu malzemelerin elastik modüllerinin düşük olması ve çok fazla sıcaklık gerektirmeden kullanılabilir olmaları başlıca özelliklerindedir. Sıcaklık ile şekil değiştirmeyen (thermo-set) polimer matrislerin arasında en önemli olanları polyeater ve epoksi reçine matrislerdir. Polimer matrislerle birleştirilerek kompozit malzeme haline dönüştürülen fiberler arasında ise cam, kevlar fiber, bor ve karbon ilk sırada gelmektedir. El yatırma, filaman sarım, enjeksiyon kalıplama ve reçine transfer tekniği gibi yöntemler polimer matrisli kompozitlerin en çok kullanılan üretim yöntemleri arasındadır [2].

Makale kapsamında, kevlar fiber ile epoksi matrisin birleşiminden oluşan kevlar fiber-epoksi kompozit malzeme kullanılmıştır. Kevlar fiber, kısa ve sert bir elyafır. Ayrıca aşınma direnci ve sürtmeye karşı sağlamlık yönünden oldukça kuvvetlidir. Sürtünmeye maruz kalma durumu yüksek olan malzemelerde kullanılan kompozitler kevlar fiber ile güçlendirilmektedir [3]. Kevlar fiber-epoksi malzemesi hem hafif, hem de darbeye dayanıklı bir malzeme olduğu için en önemli kullanım yeri savunma sanayiidir. Koruyucu başlık (miğfer) ve koruyucu yelek (kurşun geçirmez yelek) imalatı gibi savunma sanayiinde kullanılan kevlar fiber-epoksi kompozit malzemesi, teknolojinin de gelişimiyle değişik yaklaşımlar ve yöntemlerle üretilebilmekte ve günümüzde çok farklı sektörlerde kullanılır hale gelmektedir. Özellikle titreşim, yorulma ve ısı dayanımı gibi nitelikler uzay ve havacılık sanayinde kevlar fiber-epoksi malzemelerin önde gelen avantajlarıdır. Diğer taraftan, kevlar fiber-epoksi kompozit malzemesi, tank zırhı, uçak kanatları imalatı, hafif ağırlıklı kano imalatı, bomba imha uzmanı giysileri gibi diğer birçok alanda kullanım alanı bulunan önemli bir ileri teknoloji malzemesidir.

Kevlar fiber-epoksi kompozit malzemesinin işlenmesi için günümüzde en yaygın kullanılan yöntemler; geleneksel talaşlı imalat yöntemleri, su jeti ile kesme, aşındırıcı su jeti ile kesme ve lazerle kesme yöntemleridir [4]. Ancak su jeti

ile kesme ve lazerle kesme yöntemlerinin avantajlarının yanı sıra, maliyetlerinin yüksek olması, kevlar fiber-epoksi kompozit malzemesinin su jeti ile kesimi sırasında ıslanarak özelliğini yitirmesi veya lazerle kesme uygulamasında yanması gibi birtakım önemli dezavantajları da bulunmaktadır.

Son yıllarda, kompozit malzemelerinin kullanımının birçok mühendislik alanında artış göstermesine paralel olarak kompozitlerin hassas işleme ihtiyaçları da büyük ölçüde artmıştır. Kompozitlerin üretimi sırasında; kompozit şekilleri ihtiyaçlara en yakın şekilde üretilse bile boyutsal toleranslar, yüzey kalitesi ve diğer fonksiyonel gereksinimleri karşılamak için kompozitlerin bitirme işlemleriyle son boyutlarına getirilmesi gerekmektedir [5]. Geleneksel bir yöntem olan frezeleme yöntemi ile kompozit malzeme işlendiğinde ise; yüzeyde bozulmalar, delaminasyon ve malzemenin israf olması gibi zorluklar yaşanabilmektedir. Ancak bu yöntemin işleme maliyetinin diğer yöntemlere göre daha düşük olması, işleme parametrelerinin daha esnek bir şekilde ayarlanabilme kabiliyeti ve kesme işlemi için yeterli sertlikte kesici takım alternatifinin bulunabilmesi gibi önemli avantajları bulunmaktadır. Uygun işleme koşullarının belirlenmesiyle, alışılmamış imalat yöntemlerine göre çok daha kolay uygulanabilen frezeleme işlemiyle kevlar fiber-epoksi malzemelerin işlenmesinin sağlanabileceği düşünülmektedir.

Diğer taraftan, kevlar fiber-epoksi malzemenin üretiminde freze tezgâhlarında yüzey işleme operasyonuna birçok alanda ihtiyaç bulunmaktadır. Çünkü yüzey işleme operasyonu malzemenin son şekli verilirken kullanılan bir bitirme operasyonu olarak gerçekleştirilmektedir. Çalışma kapsamında, kevlar fiber-epoksi malzemenin frezeleme işleminde malzemede meydana gelen delaminasyonu en aza indirecek, işlenmiş yüzeyin kalitesini en iyileyecek kesme parametrelerinin tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda çalışmada 2^k faktöriyel tasarım tekniği ile hedef programlama yöntemi bütünlük olarak kullanılarak kevlar fiber-epoksi kompozit malzemesinin işleme parametreleri eniyilenmeye çalışılmıştır. Elde edilen en iyi işleme parametreleri (iş mili hızı, ilerleme oranı, kesme derinliği ve kevlar fiber-epoksi kompozit malzemenin katman sayısı) seviyelerinin hangisinin en iyi yüzey kalitesini (en az delaminasyon ve en az yüzey pürüzlülüğü) sağladığı belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE SURVEY)

Literatürde kompozit malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırıldığı birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Örneğin, Muthukrishnan ve Davim [5] cam/epoksi, grafit/epoksi ve kevlar fiber/epoksi kompozit malzeme işleme sırasında gerekli kesme kuvvetlerini değerlendirmek ve karşılaştırmak için yapay sinir ağlarını kullanarak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Azmir ve Ahsan [6] ise iki yönlü kumaş tabakasından yapılmış grafit/epoksi,

cam/epoksi, kevlar fiber/epoksi, bor/epoksi kompozit malzemelerinin üzerinde su jeti ile kesme çalışmaları yaparak en iyi kesme koşulunu belirlemeye çalışmıştır. Shanmugam vd. [4] polimer matrisli kompozitlerin aşındırıcı su jeti ile kesilmesine yönelik çalışmalar yapmışlardır. Su jeti ile kesme işleminde kompozit malzeme yüksek basınçlı su ile kesilmektedir. Literatürde su jeti ile kesme yöntemiyle ilgili olarak çeşitli olumsuzluklara yer verilmektedir. Bu yöntemde yüksek basınçtaki suyu kontrol etmek zor olduğu gibi su jeti makinelerinin kurulması için firmalarda bu makineler için özel yer ayrılması gerekmektedir. Su jeti metoduyla işlemin diğer bir olumsuz yönü ise, kevlar fiber-epoksi kompozit malzemesinin işleme sırasında ıslanarak tabakalar arası ayrılması neden olunmasıdır.

Diğer taraftan Mazumdar [7], kompozit malzemeler üzerinde lazerle kesme çalışmaları yaparak kesme kalitesini eniyeleyecek parametreleri bulmaya çalışmıştır. El-Taweel vd. [8] kevlar fiber tabakaları üzerinde CO₂ lazeri ile farklı kalınlıklarda delik açma çalışmaları gerçekleştirmiştir. Lazer, elektron ışını ve plazma ark-kesme şeklindeki alışılmamış imalat yöntemlerinin uygulanmasıyla kesilen bölgede yüksek miktarda ısı etkisi açığa çıkmaktadır. Kesilen bölgenin ısınması kevlar fiber-epoksi kompozit malzeme yapısında bozulmalara neden olabilmektedir [9]. Diğer taraftan lazerle kesim yaparken uygulama sırasında operatörün sağlığını olumsuz etkileyecek şekilde açığa çıkan zararlı gazları uzaklaştırmak gerekmektedir. Aynı zamanda lazerle kesim firmalar için oldukça yüksek maliyete neden olmaktadır.

Literatürde kevlar fiber-epoksi malzemenin veya diğer kompozit malzemelerin geleneksel frezeleme/tornalama/delme operasyonlarıyla işlenmesine yönelik sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bir tanesinde Azmi vd. [10] polimer kompozitlerin uç frezeleme işleminde takım aşınmasını tahmin eden bulanık yapay sinir ağlarının kullanıldığı bir tahmin modeli geliştirmiştir. Başka bir çalışmada Rajesh vd. [11] alüminyum metal matris kompozitlerin (MMK) tornalama işleminin çok yanıtlı eniyilenmesi için Gri İlişkisel Analiz (GRA) tabanlı Taguchi yöntemini kullanmıştır. Çalışma içeriğinde MMK'lerin tornalama işlemine ait, kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği ve kesici takım burun yuvarlaklık yarıçapı olarak 3 seviyeli tanımlanan parametrelerin, kesme gücü ve yüzey pürüzlülüğü yanıtlarını eniyeleyecek değerleri tespit edilmeye çalışılmıştır. İç vd. [12] kevlar fiber epoksi kompozit malzemesinin frezeleme işleminin eniyilenmesine yönelik olarak TOPSIS, VIKOR ve GRA yöntemlerini ayrı ayrı Taguchi yöntemiyle birleştirerek en iyi yüzey kalitesini veren kesme koşullarını belirlemeye çalışmışlardır. Çalışma sonucunda çok ölçütlü karar verme yöntemleri içerisinde TOPSIS yönteminin Taguchi yöntemiyle birleştirildiği durumda başlangıç koşuluna göre en iyi iyileştirme sağlanabildiği [12]. Literatürde birden fazla performans yanıtının eşzamanlı olarak eniyilenmesinde deney tasarımı yöntemleri yaygın olarak uygulanmaktadır [13-23]. Bu çalışma kapsamında Kevlar fiber-epoksi malzemesinin işleme kalitesini etkileyen ve "delaminasyon" ile "yüzey

pürüzlülüğü" olarak adlandırılan iki adet performans yanıtı bulunmaktadır. 2^k faktöriyel tasarım tekniği kullanılarak öncelikle her iki performans yanıtına ait regresyon fonksiyonları elde edilecek ve performans yanıtında etkili olan faktörler ve etkileşimleri belirlenecektir. Ardından çok amaçlı eniyileme yöntemi olan Hedef Programlama tekniği kullanılarak her iki performans yanıtını eş zamanlı olarak eniyeleyen faktör değerleri elde edilmeye çalışılacaktır.

Faktöriyel tasarım, deney tasarımlarında birçok faktörün içerisinde hangi faktörlerin sonuçlara ne ölçüde etki ettiğinin tespit edilmesinde kullanılan bir istatistiksel yöntemdir. Bu yöntemin en temel ve özel uygulama alanı iki aşamalı faktöriyel tasarımdır. Bu tür tasarımlarda tekrarların tamamlanması için $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ gözleme ihtiyaç duyulur [24]. 2^k tasarımının kullanıldığı birçok deneyde faktörlerden hangisinin ve ne yönde etkisinin olduğu test edilmektedir. Günümüzde birçok istatistiksel paket program bu ilişkinin hesaplanmasında zaman kazanımı ve sonuçların doğruluğu açısından önemli faydalar sağlayarak kullanılmaktadır. Çalışmamızda bu paket programlardan bir tanesi olan ve geniş bir kullanım alanına sahip MINITAB R14 programı kullanılmıştır.

3. KEVLAR FİBER-EPOKSİ MALZEMENİN FREZELEME İŞLEMİNİN ENİYİLENMESİ (OPTIMIZATION OF MILLING OPERATION OF KEVLAR FIBER-EPOXY COMPOSITE MATERIAL)

Kevlar fiber-Epoksi malzemenin yüzey frezeleme işleminde etkili olan ilerleme oranı, kesme derinliği, işlenen kanal genişliği ve iş mili hızı olmak üzere 4 adet işleme faktörüne ait iki farklı seviye tespit edilmiş olup (Tablo 1), 2⁴⁻¹ tasarımı (4 adet işleme faktörü ve 1/2 kesirli=8 deney dikkate alınarak) kullanılarak her kombinasyon için (faktörlerin farklı seviyelerini içeren 8 adet deney senaryosu) yüzey frezeleme operasyonu gerçekleştirilerek delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür.

Eğer tam faktöriyel deney tasarımı ile çalışma gerçekleştirilmiş olsaydı 2⁴=16 adet deney yapılması gerekecekti. Çalışma kapsamında laboratuvar koşulları, maliyet unsuru ve sistem kısıtları ile birlikte karşılaşılabilecek zaman kaybı ve maliyet dikkate alındığında, 2⁴⁻¹ =8 adet deney yapılmak suretiyle deney sayısı azaltılarak daha ekonomik bir çalışma gerçekleştirilebilmiştir.

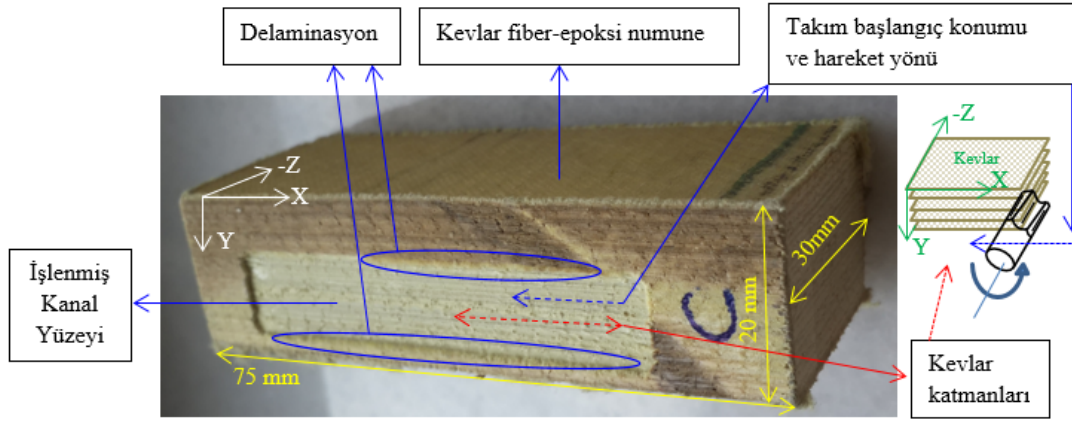
CNC frezede işlenmek üzere hazırlanan kevlar fiber-epoksi deney numunelerinin 2⁴⁻¹ deney planına göre frezelemesi için G-kodları kullanılarak bir parça işleme programı yazılmıştır. Yazılan parça programı CNC frezenin bilgisayarına yüklenerek, deney numunelerinin otomatik olarak işlenmesi sağlanmıştır (Şekil 1).

3.1. Deneyler (Experiments)

2⁴⁻¹ tasarımına göre belirlenen deney planı Başkent Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Üretim Sistemleri Laboratuvarında bulunan CNC dik işleme merkezi (EMCO PC Mill55: Çalışma alanı (x, y, z eksenleri):

Tablo1. Frezeleme kesme parametreleri (Cutting parameters of milling)

Faktör	Faktör Sembolü	Faktör Seviyesi	Faktör Seviyesinin Değeri
İlerleme Oranı	A	1	80 mm/dak
		2	120 mm/dak
Kesme Derinliği	B	1	0,5 mm
		2	3,5 mm
İşlenen Kanal Genişliği	C	1	4 mm
		2	12 mm
İş Mili Hızı	D	1	1700 devir/dak
		2	2300 devir/dak



Şekil 1. İşlenmiş iş parça (Machined work-piece)

190x125x190mm; iş mili hızı: 100-17500 devir/dak; ilerleme: 2m/dak; hızlı hareket: 2m/dak; ağırlık:160 kg; boyutlar (LxDxH): 840x865x816 mm) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Frezeleme işleminde 4 mm çaplı HSS kısa tip parmak freze (TS303/20; HSSCO8 DIN 844/B-N) kullanılmıştır. Deney planında görülen işlenen kanal genişliği seviyelerinin sağlanması için düşük seviye için 4mm genişliğinde kanal (tek paso), yüksek seviye içinse 12mm genişliğinde kanal (3 paso) açma işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlenmiş yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü ölçüm işlemleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Laboratuvarında yer alan “Phertometer” marka ($L_r=5.6\text{mm}$, $\lambda_c=0.008x5^\circ$) yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılarak her numune için 3'er ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Delaminasyon ölçümleri ise Başkent Üniversitesi Metalografi Laboratuvarında yer alan “Nikon Eclipse” marka MA100 model mikroskop (Oküler; LE Plan 5X/0.10 $\infty/0$ WD31) ve mikroskoba bütünleşik Clemex kamera ile Clemex Captiva yazılımı kullanılarak ve yine parça yüzeyinde 3 farklı ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Delaminasyon değerleri işlenen toplam kanal genişliğinin (delaminasyonlu kısımlar dahil- W_{max}), delaminasyonsuz kanal genişliğine (W) bölünmesiyle hesaplanmıştır [25]. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon değerleri Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2’de görülen değerler MINITAB programına girilerek varyans analizi sonuçları elde edilmiştir (Tablo 3). ANOVA tablosu incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü için (Y_1) Kesme Derinliği (B) faktörü dışında tüm faktörlerin etkili olduğu ve

İlerleme Oranı ve İşlenen Kanal Genişliği (A ve C) faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde birlikte etkili olduğu görülmektedir. Şekil 3’te üst tarafta yer alan yüzey grafiği ve kontur grafiğinden de görüldüğü gibi, A ve C faktörlerinin düşük değerlerinde yüzey pürüzlülüğü değeri azalırken C faktörünün en düşük değeri ile A faktörünün en büyük değerinde yüzey pürüzlülüğü değeri minimize olmaktadır. Diğer taraftan delaminasyon için (Y_2) A ve C faktörlerinin (İlerleme Oranı ve İşlenen Kanal Genişliği) ve AxB (İlerleme Oranı ve Kesme Derinliği), AxC (İlerleme Oranı ve İşlenen Kanal Genişliği), AxD (İlerleme Oranı ve İş Mili Hızı) etkileşimlerinin sonuçlar üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Yüzey grafikleri incelendiğinde ise AxC etkileşiminde A ve C’nin düşük değerlerinin, AxB etkileşiminde A ve B’nin düşük değerinin, AxD etkileşiminde A ve D’nin düşük değerlerinin (2100 devir/dak değerine kadar) minimum delaminasyonu sağladığı görülmektedir. Tablo 3 ve Tablo 5’ten faydalanılarak yüzey pürüzlülüğü (Y_1) ve delaminasyon (Y_2) için regresyon fonksiyonları aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

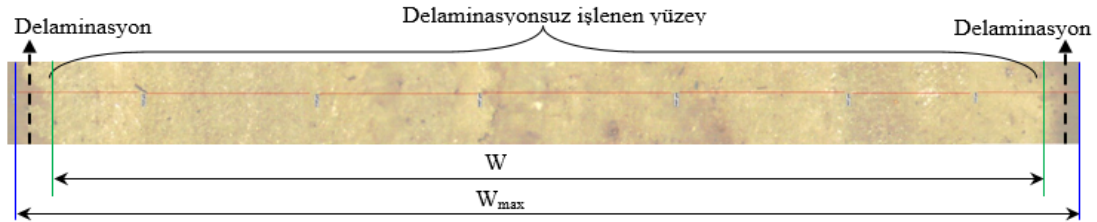
$$Y_1 = 4,62617+0,56558 A+0,07850 B+0,72517 C+1,46875 D+0,48492 AC \quad (1)$$

$$Y_2 = 1,3984+0,2515 A +0,0343 B -0,1042 C +0,0040 D +0,08792AB-0,1276 AC -0,0608 AD \quad (2)$$

Varyans analizi sonuçlarından elde edilen Eş. 1 ve Eş. 2 hedef programlama [18] modelinin amaç fonksiyonları (hedefleri) olarak kullanılmış ve aşağıdaki doğrusal olmayan karar modeli oluşturulmuştur (Tablo 6):

Tablo 2. 2⁴⁻¹ deney tasarımı (3 tekrarlı) dizilimi ve elde edilen sonuçlar (2⁴⁻¹ experimental design (3 repetition) and results)

Deney No	Faktörler				Yüzey Pürüzlülüğü (µm)		Delaminasyon	
	A	B	C	D	Y1	Y2		
1.Tekrar	1	1	1	1	7,834			1,389
	2	-1	-1	-1	2,133			1,138
	3	1	1	-1	-1	2,33		1,813
	4	-1	1	-1	1	5,745		1,142
	5	-1	1	1	-1	2,344		1,054
	6	1	-1	-1	1	5,981		1,532
	7	1	-1	1	-1	4,134		1,246
	8	-1	-1	1	1	5,318		1,294
2.Tekrar	9	1	1	1	1	8,120		1,564
	10	-1	-1	-1	-1	3,444		1,123
	11	1	1	-1	-1	2,247		2,204
	12	-1	1	-1	1	2,935		1,074
	13	-1	1	1	-1	3,045		1,003
	14	1	-1	-1	1	5,897		1,972
	15	1	-1	1	-1	5,721		1,317
	16	-1	-1	1	1	5,075		1,278
3.Tekrar	17	1	1	1	1	8,305		1,471
	18	-1	-1	-1	-1	1,654		1,050
	19	1	1	-1	-1	2,331		2,139
	20	-1	1	-1	1	7,011		1,214
	21	-1	1	1	-1	4,209		1,125
	22	1	-1	-1	1	5,104		1,630
	23	1	-1	1	-1	4,297		1,521
	24	-1	-1	1	1	5,814		1,268



Şekil 2. Delaminasyon ölçümü (Measurement of delamination)

Tablo 3. Y₁ için faktör etkileri ve katsayıları (kodlanmış birimler) (Estimated effects and coefficients for Y₁ (coded units))

Terim	Etki	Katsayı	Standart Hata Katsayısı	T	P
Sabit		4,62617	0,1949	23,73	0,000
A	1,13117	0,56558	0,1949	2,90	0,010
B	0,15700	0,07850	0,1949	0,40	0,692
C	1,45033	0,72517	0,1949	3,72	0,002
D	2,93750	1,46875	0,1949	7,54	0,000
A*B	-0,15150	-0,07575	0,1949	-0,39	0,703
A*C	0,96983	0,48492	0,1949	2,49	0,024
A*D	0,42600	0,21300	0,1949	1,09	0,291

S = 0,954925 R² = 84,43% R²(düzeltmiş) = 77,61%

$$Y_1 + d_1^- - d_1^+ = 2,5 \quad (3) \quad -1 \leq x_3 \leq 1 \quad (7)$$

$$Y_2 + d_2^- - d_2^+ = 1,5 \quad (4) \quad -1 \leq x_4 \leq 1 \quad (8)$$

$$-1 \leq x_1 \leq 1 \quad (5) \quad d_1^-, d_1^+, d_2^-, d_2^+ \geq 0 \quad (9)$$

$$-1 \leq x_2 \leq 1 \quad (6) \quad \text{Kısıtları altında,}$$

Tablo 4. Y₁ için varyans analizi (kodlanmış birimler) (Analysis of variance for Y₁ (coded units))

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kare Toplam	Düzeltilmiş Kare Toplam	Düzeltilmiş Kareler Ortalaması	F	P (%95 Güven Düzeyinde)
Ana Etkiler	4	72,2194	72,2194	18,0548	19,80	0,000
İkili Etkileşimler	3	6,8700	6,8700	2,2900	2,51	0,096
Artık Hata	16	14,5901	14,5901	0,9119		
Hata	16	14,5901	14,5901	0,9119		
Toplam	23	93,6795				

Tablo 5. Y₂ için faktör etkileri ve katsayıları (kodlanmış birimler) (Estimated effects and coefficients for Y₂ (coded units))

Terim	Etki	Katsayı	Standart Hata Katsayısı	T	P
Sabit		1,3984	0,02665	52,47	0,000
A	0,5029	0,2515	0,02665	9,44	0,000
B	0,0686	0,0343	0,02665	1,29	0,216
C	-0,2084	-0,1042	0,02665	-3,91	0,001
D	0,0079	0,0040	0,02665	0,15	0,884
A*B	0,1584	0,0792	0,02665	2,97	0,009
A*C	-0,2553	-0,1276	0,02665	-4,79	0,000
A*D	-0,1216	-0,0608	0,02665	-2,28	0,037

S = 0,130551 R²= 89,94% R²(düzeltilmiş) = 85,53%

Tablo 6. Y₂ için varyans analizi (kodlanmış birimler) (Analysis of variance for Y₂ (coded units))

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kare Toplam	Düzeltilmiş Kare Toplam	Düzeltilmiş Kareler Ortalaması	F	P (%95 Güven Düzeyinde)
Ana Etkiler	4	1,8068	1,8068	0,45169	26,50	0,000
İkili Etkileşimler	3	0,6302	0,6302	0,21006	12,32	0,000
Artık Hata	16	0,2727	0,2727	0,01704		
Hata	16	0,2727	0,2727	0,01704		
Toplam	23	2,7097				

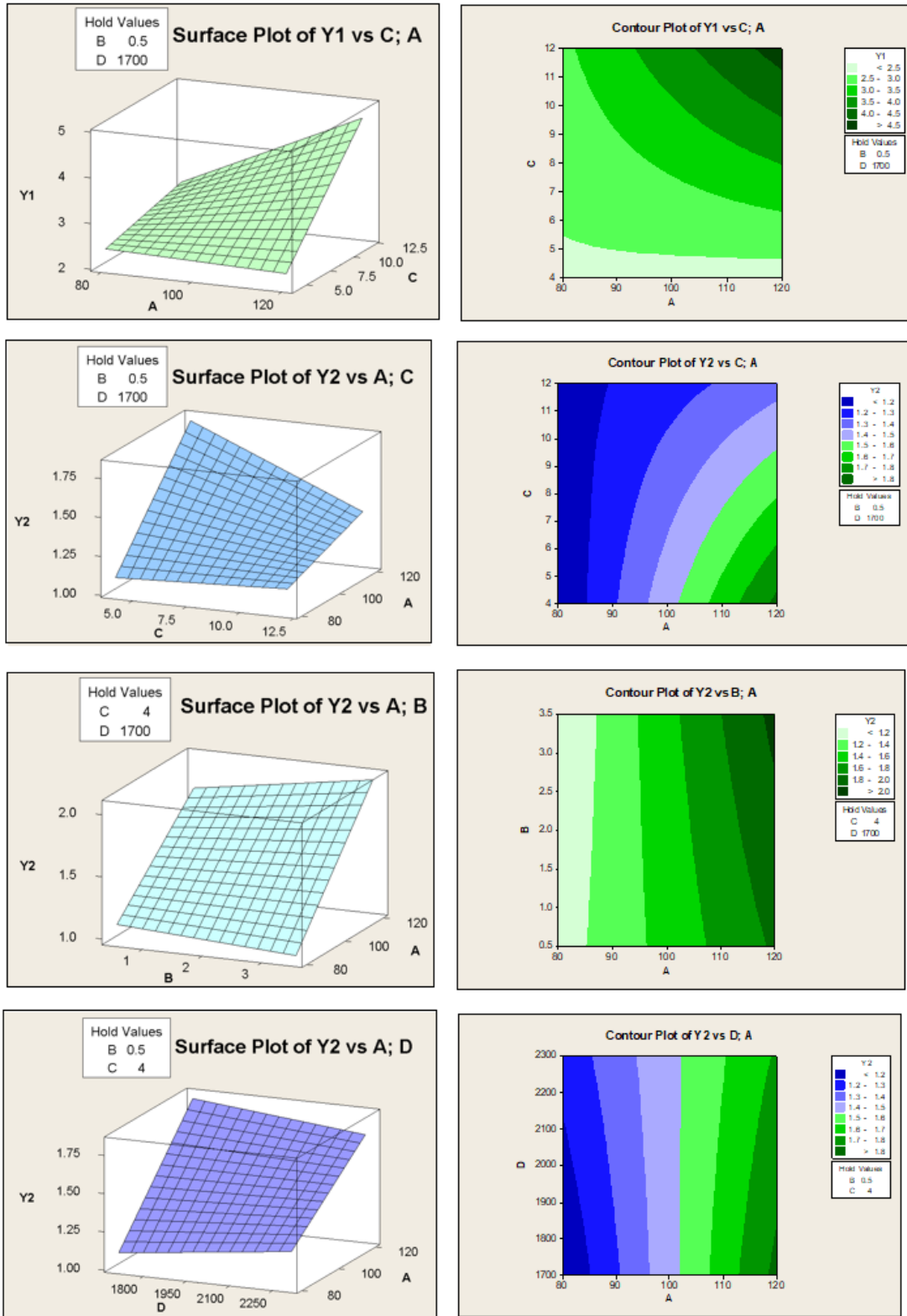
$$Enk z = d_1^+ + d_2^+ \quad (10)$$

Yukarıdaki hedef programlama modelinde Eş. 3 ve Eş. 4 sırasıyla yüzey pürüzlülüğü (Y₁) ve delaminasyon (Y₂) hedeflerini göstermektedir. Bu eşitliklerde yer alan d₁⁻ ve d₁⁺ istenilen yüzey pürüzlülüğü hedefinden (≤2,5) negatif ve pozitif sapmaları gösterirken; d₂⁻ ve d₂⁺ istenilen delaminasyon hedefinden (≤1,5) negatif ve pozitif sapmaları göstermektedir. Sapma değerleri belirlenirken 24 deneyden elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon verileri küçükten büyüğe doğru sıralanmış, ardından ardışık olarak aralarındaki farklar hesaplanmıştır (Tablo 7). Yüzey pürüzlülüğü için 1. kartilden (quartile-ilk çeyrek kısım) sonra deney sonuçlarındaki farkın önemli düzeyde arttığı, delaminasyon içinse 3. kartilden sonra değerler arasında farkın önemli düzeyde arttığı gözlenmektedir. MINITAB programı kullanılarak her iki veri setinin istatistiksel özet tablosu alınmış ve kartil değerleri Şekil 4'te verildiği gibi hem yüzey pürüzlülüğü verisi, hem de delaminasyon verisi için elde edilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü gibi yüzey pürüzlülüğü için 1. kartil değeri 2,4918, delaminasyon içinse 3. kartil değeri 1,5560'tır. Bu veriler ışığında yüzey pürüzlülüğü için hedef programlamada hedef değer 2,5, delaminasyon için hedef değer ise 1,5 olarak alınmıştır. Eş. 5, Eş. 6, Eş. 7 ve Eş. 8 hedef programlama modelinin teknik

kısıtlarını oluşturmaktadır (x₁, x₂, x₃ ve x₄ değerleri sırasıyla A, B, C ve D faktörlerini temsil etmektedir). Son olarak Eş. 9, değişkenler için işaret kısıtlarını vermektedir. Amaç fonksiyonu Eş. 10 yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon hedeflerinden pozitif sapma toplamalarını enküçükleme amaçtır. Hedef programlamaya ilişkin detaylı bilgiler [18, 26] numaralı kaynaklarda mevcuttur. Hedef programlama modelinin Excel Solver aracı ile çözümü sonucunda en iyi değerler; x₁=-0,31, x₂=0,0248, x₃=-0,66665 ve x₄=-1 olarak hesaplanmıştır. Buna göre enterpolasyon sonucunda bulunan en iyi kesme parametreleri x₁=93,8 mm/dak, x₂=1,9628 mm, x₃=5,3334 mm, ve x₄=1700 devir/dak olarak hesaplanmıştır. Freze işlemi içinse bu değerler; x₁=94 mm/dak (A), x₂=1,96 mm (B), x₃=5 mm (C) ve x₄=1700 devir/dak (D) alınarak işleme gerçekleştirilmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSION)

Elde edilen en iyi faktör seviyeleri literatürde TOPSIS, GRA ve VIKOR yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Literatürde İç vd. [12] söz konusu malzeme için TOPSIS, GRA ve VIKOR tabanlı Taguchi yöntemlerini uygulayarak aynı faktörler için en iyi faktör düzeylerini belirlemişlerdir.



Şekil 3. Y_1 ve Y_2 için faktör etkileşimlerine ilişkin yüzey ve kontur grafikleri
(Surface and contour graphics for Y_1 and Y_2 related factor interactions)

Tablo 7. Deney sonuçlarının sıralanması ve kartiller (Sorting of experimental results and quartiles)

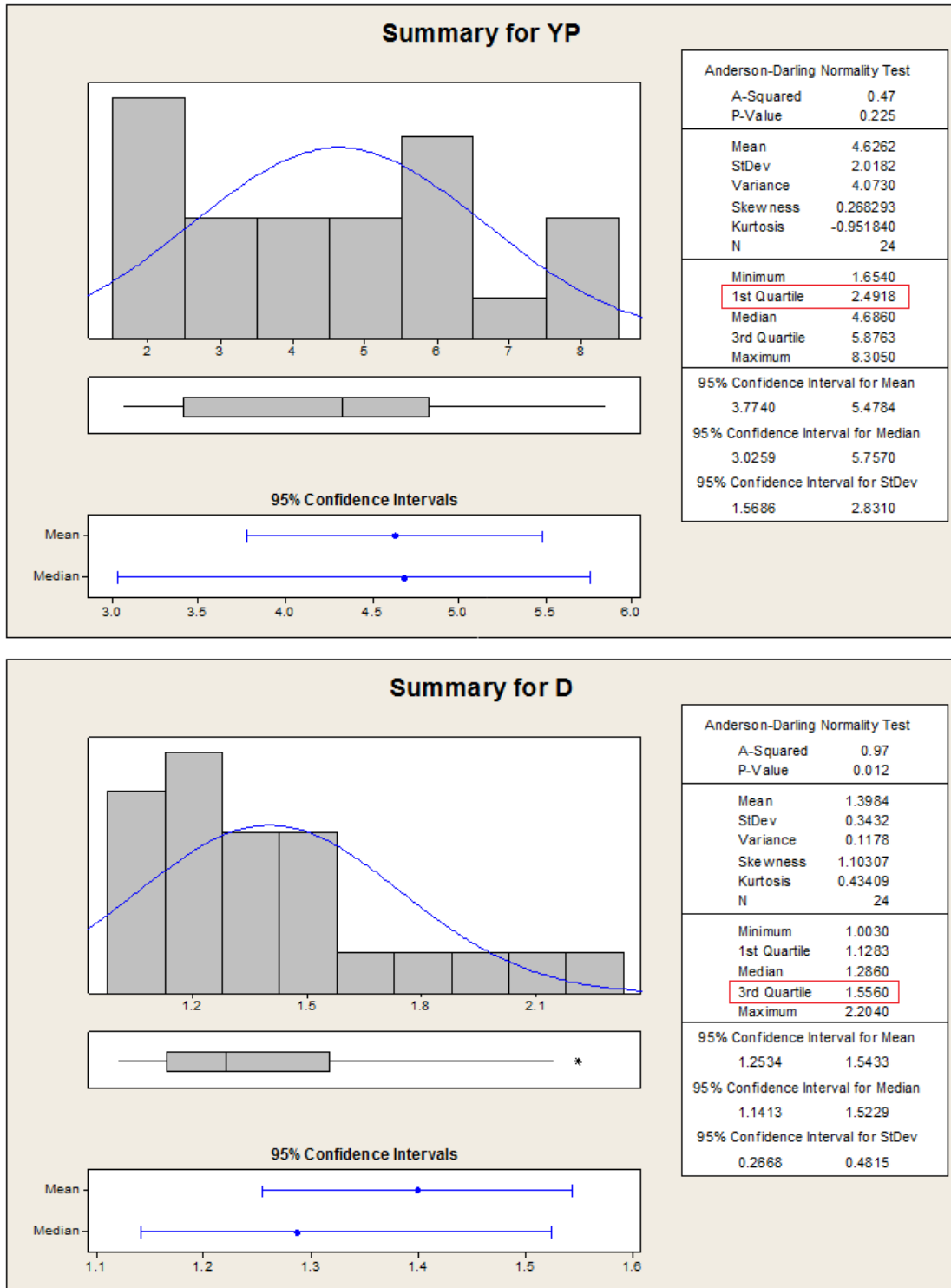
Kartil (Q)	Sıra	Yüzey Pürüzlülüğü(μm)	Fark	Delaminasyon	Fark
Q1	1	1,654	-	1,003	-
	2	2,133	0,479*	1,05	0,047
	3	2,247	0,114	1,054	0,004
	4	2,33	0,083	1,074	0,020
	5	2,331	0,001	1,123	0,049
	6	2,344	0,013	1,125	0,002
Q2	7	2,935	0,591	1,138	0,013
	8	3,045	0,110	1,142	0,004
	9	3,444	0,399	1,214	0,072
	10	4,134	0,690	1,246	0,032
	11	4,209	0,075	1,268	0,022
	12	4,297	0,088	1,278	0,010
Q3	13	5,075	0,778	1,294	0,016
	14	5,104	0,029	1,317	0,023
	15	5,318	0,214	1,389	0,072
	16	5,721	0,403	1,471	0,082
	17	5,745	0,024	1,521	0,050
	18	5,814	0,069	1,532	0,011
Q4	19	5,897	0,083	1,564	0,032
	20	5,981	0,084	1,63	0,066
	21	7,011	1,030	1,813	0,183
	22	7,834	0,823	1,972	0,159
	23	8,12	0,286	2,139	0,167
	24	8,305	0,185	2,204	0,065

*2,133-1,654=0,479

Çalışma sonucunda en başarılı sonuç TOPSIS tabanlı Taguchi yöntemiyle elde edilebilmiştir. Taguchi yönteminde L9 ortogonal deney tasarımı kullanılmıştır. Tablo 8’de 2^k faktör tasarımı ve TOPSIS-Taguchi yönteminden elde edilen en iyi faktör seviyeleri verilmektedir. Her iki yöntemden elde edilen en iyi faktör seviyelerinin karşılaştırılması için 2^k faktöriyel tasarım sonucunda elde edilen en iyi faktör seviyeleri ile doğrulama deneyi yapılmış ve yüzey pürüzlülüğü ile delaminasyon değerleri ölçülerek TOPSIS-Taguchi yöntemi sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Sonuç olarak iki farklı deney tasarımı tekniği ile gerçekleştirilen çalışma sonuçlarının incelenmesinde 2^k faktöriyel tasarım ve hedef programlama bütünleşik uygulaması sonucunda faktörlerin sınır değerleri yerine ara değerler (kesikli olmayan değerler) elde edilebilmektedir. Bu sonuca göre 2^k faktöriyel tasarım daha hassas sonuçlar sunabilmekte ve bu yönüyle Taguchi yönteminden elde edilen sonuçlara göre daha hassas faktör seviyeleri sunabilmektedir (Tablo 8).

2^k faktöriyel tasarım yöntemi ile elde edilen en iyi faktör seviyeleri kullanılarak bir doğrulama deneyi yapılmış ve elde edilen sonuçlar TOPSIS-Taguchi yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Burada amaçlanan hangi yöntem sonucunun kevlar fiber-epoksi kompozit malzemesinin frezeleme işleminde en iyi yüzey kalitesini sağladığının tespit edilmesidir. İşlenen deney numunesinin (Şekil 1) işlenmiş yüzeyleri üzerinde yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon ölçüm işlemleri tekrarlanmıştır (Tablo 9). Tablo 9 incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü açısından 2^k faktöriyel tasarım yöntemi ile en iyi sonuç elde edilmiştir.

Delaminasyon açısından da TOPSIS-Taguchi yöntemiyle çok yakın bir sonuç elde edilebilmiştir. Hesaplanan değerlere göre 2^k faktöriyel tasarım yönteminin faktörlerin uç değerleri yerine ara değerleri de önerebildiği görülmektedir. Buna göre çalışma sonucunda en iyi faktör seviyeleri A: İlerleme Oranı 94 mm/min, B: Kesme Derinliği 1,96 mm, C: İşlenen Kanal Genişliği 5mm ve D: İş Mili Hızı 1700 devir/min) olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan 2^k deney tasarımı ve hedef programlama bütünleşik yöntemi ile elde edilen en iyi faktör seviyeleri ile Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleriyle bütünleşik olarak uygulanan Taguchi yöntemi (ÇKKV-Taguchi yöntemi) ile elde edilen en iyi faktör seviyeleri arasında önemli farklılıklar gözlenmektedir (Tablo 8). Örneğin “kesme derinliği” için elde edilen en iyi değer 2^k yöntemi ile 1,96 iken, bu değer diğer yöntemler ile 0,5 (yaklaşık 4 kat daha küçük bir değer) olarak belirlenmiştir. Yine, 2^k deney tasarımı ve hedef programlama bütünleşik yöntemi sonucuna göre en iyi ilerleme oranı değeri 94 mm/dak iken, ÇKKV-Taguchi yöntemi sonuçlarına göre bu değer 80 mm/dak olarak tespit edilmektedir. İşlenen kanal genişliği açısından ise 2^k deney tasarımı ve hedef programlama bütünleşik yöntemi ile 5 mm değeri en iyi sonuç olurken, TOPSIS-Taguchi ve GRA-Taguchi yöntemleriyle 12 mm, VIKOR-Taguchi yöntemiylese bu değer 4 mm olarak tespit edilmektedir. İş mili hızı için sonuçlar incelendiğinde, 2^k deney tasarımı ve hedef programlama bütünleşik yöntemi ile tespit edilen 1700 devir/dak değeri GRA-Taguchi yöntemiyle elde edilen değerle aynı olmakla birlikte, TOPSIS-Taguchi ve VIKOR-Taguchi yöntemleriyle bu değer 2300 devir/dak olarak



Şekil 4. Deney sonuçları için özet istatistik verileri ve kartil değerleri (summary statistical data for experimental results and quartile values)

hesaplanmaktadır. Bununla birlikte 2^k deney tasarımı ve hedef programlama bütünlük yöntemine en yakın yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon değerleri TOPSIS-Taguchi yönteminden elde edilmektedir (Tablo 9). Tablo 3 ve Tablo 5'e göre her iki yanıt için etkili faktörlerin A (ilerleme oranı) ve C (işlenen kanal genişliği) faktörleri olduğu

görülmektedir. 2^k deney tasarımı ve hedef programlama bütünlük yöntemi ile ÇKKV-Taguchi yöntemlerinin aksine kesikli alt ve üst değerler yerine kesikli noktalar arasındaki sürekli değerler tespit edilebilmiştir. 2^k deney tasarımı ve hedef programlama bütünlük yönteminin kesikli veriler yerine sürekli veriler üzerinde en iyi faktör seviyelerini tespit

Tablo 8. 2^k faktöriyel tasarım ve TOPSIS-Taguchi yöntemlerinin sonuçları
(2^k experimental design and results of TOPSIS-Taguchi method)

Yöntemler	En İyi İşleme Parametreleri			
	İlerleme Oranı (mm/dak)	Kesme Derinliği (mm)	İşlenen Kanal Genişliği (mm)	İş Mili Hızı (devir/dak)
2 ^k faktöriyel tasarım	94	1,96	5	1700
TOPSIS-Taguchi [12]	80	0,5	12	2300
VIKOR-Taguchi [12]	80	0,5	4	2300
GRA-Taguchi [12]	80	0,5	12	1700

Tablo 9. Doğrulama deneyi sonuçları (Results of verification experiment)

Yöntem	Yüzey Pürüzlülüğü (R _a) (µm)				Delaminasyon (D)			
	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Geometrik Ortalama	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Geometrik Ortalama
2 ^k faktöriyel	3,718	3,455	3,234	3,463	1,0934	1,290	1,210	1,195
TOPSIS-Taguchi [12]	2,394	3,864	4,707	3,518	1,118	1,132	1,149	1,133
VIKOR-Taguchi [12]	4,504	5,08	5,681	5,066	2,090	2,640	2,890	2,517
GRA-Taguchi [12]	3,648	5,54	5,737	4,876	9,420	9,620	9,910	9,648

edebilme avantajı sunmasının ÇKKV-Taguchi yöntemine göre önemli bir üstünlüğü olduğu değerlendirilmektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Kevlar fiber-epoksi kompozit malzemesi büyük oranda savunma sanayiinde kullanılan ve diğer sektörlerde de kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşan bir malzemedir. Ancak malzemenin uygun işleme koşullarında işlenememesi durumunda talaş kaldırma işlemi oldukça zor olmakta, yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyona neden olmaktadır. Bu nedenle yapılan çalışma sonucunda kevlar fiber-epoksi kompozit malzemesinin en uygun frezeleme koşullarının tespit edilmesine çalışılmıştır. Böylece yapılan çalışma ile bu malzemeyi kullanarak üretim gerçekleştiren firmalara ve Türk imalat sanayisine de önemli veriler sunabilecek sonuçlar tespit edilmiştir.

Çalışmamız kapsamında yapılan doğrulama deneyleri sonucunda 2^k faktöriyel tasarım ve hedef programlama yönteminden elde edilen en iyi faktör değerleri ile Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleriyle bütünleşik olarak uygulanan Taguchi yöntemi (ÇKKV-Taguchi yöntemi) uygulama sonuçlarıyla karşılaştırıldığında 2^k faktöriyel tasarımla bütünleşik hedef programlama yönteminin daha başarılı sonuçlar sunabildiği görülmektedir. Burada yöntemin daha iyi sonuçlar vermesindeki en önemli özelliği sürekli fonksiyonlar üzerinden eniyileme yapmasıdır. ÇKKV-Taguchi yöntemi uygulanma prensipleri açısından kesikli değerler ile çalışarak bu değerler içinden en iyi faktör kombinasyonuna ulaşmayı hedeflerken, 2^k faktöriyel tasarımla bütünleşik hedef programlama yöntemi sürekli fonksiyonlardan oluşan hedef fonksiyonlarını yine sürekli aralık şeklinde ifade edilen teknik kısıtlar üzerinden eniyilemeye çalışmaktadır. Bu sayede faktörlerin çalışma aralıklarının içerisinde yer alan en uygun faktör değerlerinin tespit edilebilmesine olanak sağlayabilmektedir. Böylece ÇKKV-Taguchi yönteminin elde ettiği kesikli noktaların

ötesinde daha iyi sonuç verebilecek sürekli faktör değerlerini tespit edilebilmektedir.

Gelecek dönemde yapılabilecek çalışmalar açısından daha sert kesici uçlarla ve iş mili hız aralığı daha geniş freze tezgâhlarında çalışmanın tekrarlanması önerilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Yazarlar kevlar fiber kumaşın tedariki ve kevlar fiber-epoksi malzemenin üretilmesinde sağladıkları katkılar nedeniyle TELATEKS TEKSTİL ÜRÜNLERİ SAN. ve TİC. A.Ş. ve EPSİLON KOMPOZİT LTD. ŞTİ 'ne, kevlar fiber-epoksi deney numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm işlemlerinin gerçekleştirilmesindeki desteklerinden ötürü Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Adem Acır'a teşekkürlerini sunarlar.

Bu çalışma Başkent Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından BA-11/FM-08 kontrat numarasıyla ve TÜBİTAK-2209- Üniversite Öğrencileri Yurt İçi / Yurt Dışı Araştırma Projeleri Destekleme Programınca desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Eryiğit E., Tabakalı kompozit çubuklarda yanal yük etkisi ile oluşan burkulma davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2006.
2. Ekinci V.Ş., Alümina takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
3. Ramadhan A.A., Abu Talib A.R., MohdRafie A.S., Zahari R. High velocity impact response of Kevlar fiber-29/epoxy and 6061-T6 aluminum laminated panels, Materials and Design (Mater. Des.), 43, 307-321, 2013.

4. Shanmugam D.K., Chen F.L., Siores E., Brandt M., Comparative study of jetting machining technologies over laser machining technology for cutting composite materials, *Composite Structures (Compos. Struct.)*, 57, 289-296, 2002.
5. Muthukrishnan N. ve Davim J.P., Optimization of machining parameters of Al/SiC-MMC with ANOVA and ANN analysis, *Journal of Materials Processing Technology (J. Mater. Process. Technol.)*, 209, 225-232, 2009.
6. Azmir M.A. ve Ahsan A.K., Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining, *Journal of Materials Processing Technology (J. Mater. Process. Technol.)*, 198, 122-128, 2008.
7. Mazumdar S.K., *Composites Manufacturing: Materials Product and Process Engineering*, CRC Press, A.B.D., 2001.
8. El-Taweel T.A., Abdel-Maaboud A.M., Azzam B.S., Mohammad A.E., Parametric studies on the CO₂ lasercutting of Kevlar fiber-49 composite, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40, 907-917, 2009.
9. Akkurt A., Su jeti ile kesme sistemleri ve uygulama alanlarının değerlendirilmesi, *Politeknik Dergisi*, 2, 129-139, 2004.
10. Azmi A.I., Lin R.J.T., Bhattacharyya D., Tool wear prediction models during endmilling of glassfibre-reinforced polymer composites, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67 (1), 701-718, 2012.
11. Rajesh S., Devaraj D., Sudhakara Pandian R., Rajakarunakaran S., Multi- response optimization of machining parameters on red mud-based aluminum metal matrix composites in turning process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67 (1), 811-821, 2012.
12. İç Y.T., Elaldı F., Keçeci B., Topsis based Taguchi optimization of machining characteristics in end milling operation of kevlar fiber-epoxy composites, *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, 6, 653-662, 2016.
13. Şimşek B., İç Y.T., Şimşek E.H., A RSM-based multi-response optimization application for determining optimal mix proportions of standard ready-mixed concrete, *Arabian Journal for Science Engineering*, 41, 1435-1450, 2016.
14. Şimşek B., İç Y.T., Şimşek E.H., Güvenç A.B., Development of a graphical user interface for determining the optimal mixture parameters of normal weight concretes: A response surface methodology based quadratic programming approach, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 136, 1-9, 2014.
15. Mostafapour A., Akbari A., Nakhaei M.R., Application of response surface methodology for optimization of pulsating blank holder parameters in deep drawing process of Al 1050 rectangular parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91, 731-737, 2017.
16. Wang C-C. ve Jiang B.C., Integral DOE and MANOVA techniques for classification feature selection: using solder joint defects as an example, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27, 392-396, 2005.
17. Bitondo C., Prisco U., Squilace A., Buonadonna P., Dionoro G., Friction-stir welding of AA 2198 butt joints: mechanical characterization of the process and of the welds through DOE analysis, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53, 505-516, 2011.
18. İç Y.T., Elaldı F., Pakdil F., İpek N.E., Design of experiment and goal programming application for GMAW process, *Welding Journal*, 91 (4), 106-112, 2012.
19. Razavykia A., Farahany S., Yusof N.M., Evaluation of cutting force and surface roughness in the dry turning of Al-Mg₂Si in-situ metal matrix composite inoculated with bismuth using DOE approach, *Measurement*, 76, 170-182, 2015.
20. López A., Aisa J., Martinez A., Mercado D., Injection moulding parameters influence on weight quality of complex parts by means of DOE application: Case study, *Measurement*, 90, 349-356, 2016.
21. Altın A., Optimization of turning machining parameters in inconel 600 super alloy, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (4), 677-684, 2013.
22. Günay M., Optimization with Taguchi method of cutting parameters and tool nose radius in machining of AISI 316L STEEL, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (3), 437-444, 2013.
23. Çiftçi İ., Gökçe H., Optimisation of cutting tool and cutting parameters in machining of molybdenum alloys through the Taguchi method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2018, <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416482>, 2018.
24. Montgomery D.C., *Design and Analysis of Experiment*, John Wiley & Sons, New York, A.B.D., 1991.
25. Siddiqui T.U. ve Shukla M., Experimental investigation and optimization of kerf characteristics in abrasive waterjet trepanning of thick kevlar fiber-epoxy composites, *Proceedings in Manufacturing Systems*, 5 (2), 109-112, 2010.
26. Taha, H.A., *Operations Research: An Introduction*, Prentice Hall, Sixth Ed., NJ, A.B.D., 1996.