

Investigation of the Effects of Cutting Parameters on Diameter Change and Burr Height in Drilling of HSLA Steel with Gray Relational Analysis Method

 Yusuf SİYAMBAŞ^{1,*}  Yakup TURGUT² 
¹Erzincan Binali Yıldırım University Vocational High School, Department of Machinery and Metal Technologies, Merkez/Erzincan

²Gazi University Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 03/02/2020

Revision 28/03/2020

Accepted: 12/04/2020

Highlights

- Cutting tool performance
- HSLA material
- Machinability properties

Keywords

 Drilling
 Diameter Change
 Burr Height
 Gray Relational Analysis

In this experimental study, the effects of cutting parameters on diameter change and burr height were investigated by using three cutting speeds (18, 26, 34 m / min) and three feed rate (0.05, 0.075, 0.1 mm/rev) values with TiAlN coated and uncoated HSS drills. Drilling operations were carried out in wet conditions and throughout. According to the gray relationship degree value, the most suitable parameters in terms of diameter change and burr height values were determined as uncoated drills, 0.05 mm/rev feed rate and 34 m/min cutting speed.

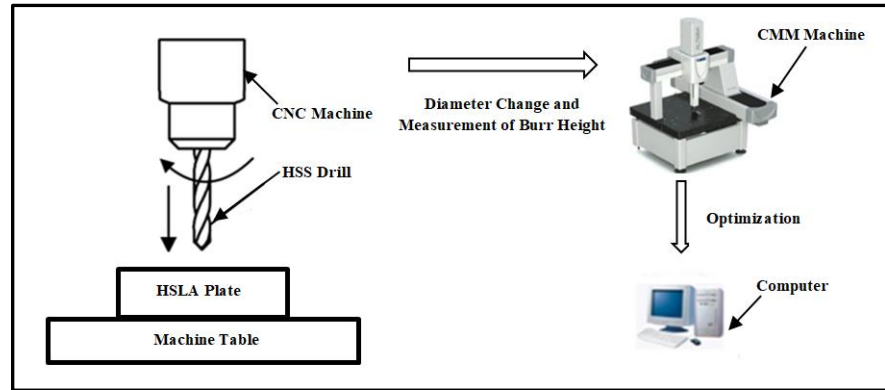


Figure A. Schematic view of the operations performed

Purpose: In this experimental study, the effects of cutting parameters on diameter change and burr height were investigated by using three cutting speeds (18, 26, 34 m / min) and three feed rate (0.05, 0.075, 0.1 mm / rev) values with TiAlN coated and uncoated HSS drills.

Theory and Methods: Drilling operations were carried out in wet conditions and throughout. The experiments were performed according to Taguchi L_{18} orthogonal experiment design. The results of the experiments were optimized with the help of gray relational analysis method. ANOVA method was used in order to determine the most effective parameter on the process.

Results: According to the gray relationship degree value, the most suitable parameters in terms of diameter change and burr height values were determined as uncoated drills, 0.05 mm/rev feed rate and 34 m/min cutting speed.

Conclusion: It was found that diameter change and burr height values were lower in uncoated tools compared to TiAlN coated drills. In drilling HSLA material with HSS drills, the optimum drilling parameters for diameter change and burr height were determined using the gray relational analysis method.



HSLA Çeliğinin Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Çap Değişimi ve Çapak Yüksekliği Üzerindeki Etkilerinin Gri İlişkisel Analiz Yöntemiyle Araştırılması

Yusuf SİYAMBAŞ^{1,*} Yakup TURGUT²

¹Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Merkez/ERZİNCAN

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

Öz

Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler (HSLA) yüksek mukavemet, hafiflik ve işlenebilirlik gibi mühendislik özelliklerinden dolayı otomotiv sanayisinde tercih edilmektedir. Yapılan deneysel çalışmada, TiAlN kaplamalı ve kaplamasız HSS matkaplar ile üç adet kesme hızı (18, 26, 34 m/dak) ve üç adet ilerleme hızı (0,05, 0,075, 0,1 mm/dev) değeri kullanılarak kesme parametrelerinin çap değişimi ve çapak yüksekliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Delik delme işlemleri ıslak şartlarda ve boydan boya gerçekleştirilmiştir. Deneysel Taguchi L18 ortogonal deney tasarımına göre yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları gri ilişkisel analiz yöntemi yardımıyla optimize edilmiştir. İşlem üzerindeki en etkili parametrenin belirlenmesi için anova metodu kullanılmıştır. Gri ilişki derecesi değerine göre, çap değişimi ve çapak yüksekliği değerlerinde, en uygun parametrelerin kaplamasız matkaplar, 0,05 mm/dev ilerleme hızı ve 34 m/dak kesme hızı olduğu tespit edilmiştir.

Investigation of the Effects of Cutting Parameters on Diameter Change and Burr Height in Drilling of HSLA Steel with Gray Relational Analysis Method

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 03/02/2020
Düzeltilme: 28/03/2020
Kabul: 12/04/2020

Anahtar Kelimeler

Delik Delme
Çap Değişimi
Çapak Yüksekliği
Gri İlişkisel Analiz

Keywords

Drilling
Diameter Change
Burr Height
Gray Relational Analysis

Abstract

High strength low alloy steels (HSLA) are preferred in the automotive industry due to their engineering properties such as high strength, light weight and machinability. In this experimental study, the effects of cutting parameters on diameter change and burr height were investigated by using three cutting speeds (18, 26, 34 m / min) and three feed rate (0.05, 0.075, 0.1 mm / rev) values with TiAlN coated and uncoated HSS drills. Drilling operations were carried out in wet conditions and throughout. The experiments were performed according to Taguchi L18 orthogonal experiment design. The results of the experiments were optimized with the help of gray relational analysis method. ANOVA method was used in order to determine the most effective parameter on the process. According to the gray relationship degree value, the most suitable parameters in terms of diameter change and burr height values were determined as uncoated drills, 0.05 mm/rev feed rate and 34 m/min cutting speed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı (HSLA) çelikler, otomobillerin yük taşıyan kısımlarında, süspansiyon sistemlerinde, destek parçalarında, çapraz elemanlarda, boyuna kirişler ve şasi bileşenleri gibi parçaların üretilmesinde etkin rol oynamaktadır [1]. Otomotiv endüstrisinde, güç kaybetmeden ağırlığı azaltılmak amacıyla HSLA çelikleri kullanılmaktadır. HSLA çelikleri, kendileri ile yakın mekanik özelliklere sahip olan karbon çeliğinden %20-30 oranında daha hafiftir. Bu avantajı ile ağırlık tasarrufu sağlaması ve beraberinde yakıt tüketiminin azalmasından dolayı bu çeliklerin kullanımı artmıştır [2]. Delik delme işlemi imalatta en çok kullanılan yöntemler arasındadır. Matkaplar talaşlı üretimde en çok kullanılan kesici takımlardandır [3]. Bir araştırmaya göre havacılık endüstrisinde yapılan delik delme çalışmalarının tüm talaş kaldırma operasyonları içerisindeki payının %40 olduğu ifade edilmiştir [4].

Talaşlı imalatta daha yüksek talaş kaldırma oranları ve kesme hızları oldukça önemlidir. Bu koşullar ekonomik takım ömrü ile iyi bir yüzey kalitesi elde etmek için kesici takımlar üzerine yapılan kaplamalar ile sağlanmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle toz metalurjisi yöntemiyle üretilen kaplamalı ve kaplamasız HSS takımlar, modern delme işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Kesici takım teknolojisinin ilerlemesinde en büyük teknolojik katkılardan biride, kesiciler üzerine yüksek aşınma direncine sahip olan sert kaplamaların uygulanmasıdır. Son yıllarda tek ve çok katmanlı kaplamalar, kaplama teknolojisindeki önemli gelişmelerin bir sonucu olarak daha yüksek kesme ve ilerleme hızlarında kullanılmaya başlanmıştır [6]. Titanyum alüminyum nitrür (TiAlN) kaplamaların oksidasyon direnci, tokluğu, sertliği ve korozyon direnci daha yüksek olduğu için, titanyum nitrür (TiN) kaplamalarına alternatif olarak geliştirilmiştir [7-9]. TiAlN kaplamalar düşük ısı iletkenliği ve sürtünme özelliklerinden dolayı yüksek hızlarda kullanılır. Ayrıca TiAlN gibi oksidasyon direnci yüksek kaplamalar imalat maliyetlerini düşürmek ve metal kesme işlemlerinde verimliliği artırmak için kullanılmaktadır. [10-12].

Helisel matkaplar ile delik delmede deliğin boyutsal tamlığını, daireselliğini ve yüzey kalitesini en fazla matkap ucunda oluşan titreşimler etkilemektedir [13]. Delme operasyonlarında genel olarak üç farklı titreşim oluşmaktadır. Bunlar, yanal zırlama, burulma-eksenel zırlama ve eksenel dönme titreşimleri olarak ifade edilmektedir. Bu titreşim tiplerinden herhangi birinin oluşması düzensizliğe sebep olmaktadır. Meydana gelen zırlama titreşim frekansı, matkap doğal frekansına yaklaştıkça dönel titreşim kararsızlığı neredeyse her iş mili hızında oluşmaktadır [14]. Dönel düzensizlik deliğin her yönünde meydana gelir ve bu düzensizlik yanal ve burulma- eksenel titreşimlerini arttırarak deliğin ölçü tamlığını ve matkap ucunu bozmaktadır [13]. İstenilen yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesinde kesme parametrelerinin uygunluğu işleme zamanının kılmasına ve bunun sonucu olarak işleme maliyetlerinin düşürülmesinde son derece önemlidir.

Delme işleminde iş parçası üzerinde çapak oluşumu endüstride karşılaşılan yaygın bir sorundur. Arzu edilen yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesinde kesme parametreleri malzemenin çeşidi ve işlenmesiyle uygun olmalıdır. Çapak, delme işlemi sırasında deliğin merkezinde kesicinin ilerlemesi ile yüksek basınçtan ötürü meydana gelen plastik şekil değiştirmedir. [15]. Delme işlemi sırasında meydana gelen çapağın temizlenmesi, malzemenin deforme olmasına, ek bir çalışma süresine ve beraberinde ek bir maliyet oluşturmamasından ötürü verimli bir işlem olmayıp olabildiğince düşürülmelidir. Çapak oluşumu deliğin girişinde ve çıkışında oluşmaktadır. Delik çıkışında meydana gelen çapak, delik girişindeki göre çok daha fazla oluşmaktadır. Delik çıkışındaki çapak boyu, girişten daha fazla olduğundan çapak oluşumu ile ilgili sorunların çıkış bölgesinde meydana geldiği söylenmektedir [3].

Çap değişimi ve çapak yüksekliği üzerine bir çok çalışma yapılmıştır. Kıvak ve ark. AISI 316 malzemesinin farklı katman kalınlığındaki kaplamalı matkaplarla delinmesinde delik kalitesini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kesme hızı değerinin artması ile delik çapı değerinde artma olduğunu ve çap değişiminde en etkili parametrenin kesme hızı olduğunu ifade etmişlerdir[16]. Yaman ve ark. Ti6Al4V alaşımının farklı uzunluktaki kaplamasız HSS matkaplarla delinmesinde işleme şartlarına göre takım boyunun delik toleranslarına olan etkisini incelemişlerdir. Farklı uzunluktaki HSS matkaplarla aynı işleme şartlarında yapılan delme işlemlerinde, kısa matkapların daha iyi performans sergilediğini gözlemlemişlerdir [14]. Rahman ve Mamat, pirinç malzemenin mikro delinmesinde işleme parametrelerinin delik kalitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Delinen deliklerin doğruluğu değerlendirildiğinde, matkap çapı, ilerleme hızı ve devir sayısı değerlerinin artması ile delik çapı doğruluğunda bir azalma olduğunu söylemişlerdir [17]. Kumar ve Packiaraj, OHNS malzemenin HSS matkaplarla delinmesinde kesme parametrelerinin yüzey kalitesi, takım aşınması, talaş kaldırma oranı ve çap değişimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda delik çap doğruluğu üzerinde en etkili parametrenin ilerleme olduğunu belirtmişlerdir. [18]. Mavi, Dubleks paslanmaz çeliklerden 1.4462 kalite paslanmaz çelik malzemenin kaplamalı karbür takımlarla (TiAlN ve TiN) delinmesinde kesme parametrelerinin silindiriklikten ve çaptan sapma değerlerini araştırmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen değerlerin gri ilişkisel analiz yöntemi ile optimizasyonu yapılmıştır. Yapılan değerlendirmede en uygun kesme parametrelerinin TiN kaplamalı takım, en düşük ilerleme hızı ve en düşük kesme hızı olduğunu ifade etmiştir [19]. Kıvak ve ark. Inconel 718 malzemesinin TiN ve TiAlN kaplamalı ve kaplamasız kesicilerle delinmesinde işleme parametrelerinin delik kalitesi (dairesellik ve delik çapı) üzerine etkilerini araştırmışlardır. Tüm kesme hızı ve ilerleme hızı kombinasyonlarında, delik

çapları için en iyi değerler kaplanmamış matkaplarla elde edilmiştir. Ayrıca ilerleme hızı değeri arttıkça her üç takım için de delik çaplarının arttığını gözlemlemişlerdir. [20] Tsao ve Hocheng, yaptıkları çalışmada farklı uç açıları ile farklı kesme şartlarında karbon fiber ile güçlendirilmiş kompozit (CFRP) malzemenin delinmesi sonucunda elde edilen delik çapları incelenmiştir. Yapılan çalışmada, ilerleme hızı ve matkap çapının delme performansında en etkili faktör olduğu belirtilmiştir [21]. Gaitonde ve ark. AISI 316L paslanmaz çelik malzemenin farklı çaplarda, uç açıları ve helis açıları HSS matkaplar ile delinmesinde kesme hızı ve ilerleme hızı değerlerini kullanarak çapak oluşumunun azaltılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda, kesme hızı ve ilerleme hızının çapak oluşumu üzerine önemli bir etken olduğu söylemişlerdir. Çapak oluşumunu azaltmak için kesme hızı ve ilerleme hızının düşürülmesi ve daha büyük çap ve uç açısına sahip matkapların kullanılması gerektiği tespit etmişlerdir [22]. Kaplan ve ark. AISI D2 ve AISI D3 çeliklerinin farklı çaplardaki HSS matkaplarla delinmesinde delik çıkışındaki çapak oluşumunu incelemişlerdir. İşleme parametreleri kesme hızı ve ilerleme hızı olarak seçilmiştir. Çalışma sonucunda, ilerlemenin artması ile çapak boyunun azaldığı; delinen deliklerin sayısı, kesme hızı ve malzemenin sertliğinin artması ile çapak boyunun yükseldiğini gözlemlemişlerdir [23]. Tosun, AISI 4140 çelik malzemesinin delinmesinde gri ilişkili analiz yöntemini kullanarak çapak oluşumunda etkili olan kesme parametrelerini (kesici takım malzemesi, kesme hızı, matkap uç açısı ve ilerleme) optimize etmiştir. Çalışmada, çapak yüksekliğine etki eden parametrelerin önem sırasına göre matkap malzemesi, kesme hızı, devir başına ilerleme ve matkap uç açısı şeklinde olduğunu belirtmiştir [24]. Kılıçkap ve Hüseyinoğlu, AISI 304 paslanmaz çeliğin delinmesi işleminde kesme hızı, ilerleme hızı ve uç açısı gibi işleme parametrelerinin oluşan çapak boyu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Delik delme parametrelerinin çapak yüksekliği üzerindeki etkileri yanıt yüzey yöntemi (RSM) kullanılarak değerlendirilmiş ve çapak yüksekliğini minimize etmek için optimum delme koşulları genetik algoritma (GA) uygulaması kullanılarak belirlenmiştir. GA optimizasyon sonuçlarına göre en düşük çapak boyunun düşük kesme hızı, ilerleme hızı ve daha büyük uç açısında elde edildiğini ifade etmişlerdir [25]. Gaitonde ve Karnik, Yapay Sinir Ağı (ANN) modeli kullanarak AISI 316L paslanmaz çeliğin delinmesi sırasında çapak yüksekliğini ve çapak kalınlığını en aza indirmek amacıyla belirli bir matkap çapı için ilerleme hızı ve uç açısının en iyi kombinasyon değerlerini seçmek üzerine bir çalışma yapmışlardır. Gereken çapak büyüklüğü modellerini tam faktoriyel tasarımına göre planlanan delme deneyleri ile yapay sinir ağı kullanılarak geliştirilmiştir. Belirlenen bir matkap çapı için çapak yüksekliği ilerleme hızındaki artışla artarken, düşük ilerleme hızı değerlerinde belirtilen tüm matkap çapları için minimum değerde olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca büyük matkap çapı değerleri için uç açısı arttıkça çapak yüksekliğinin azaldığını gözlemlemişlerdir [26]. Yağmur ve ark. AISI 1050 malzemesinin delinmesinde kesme parametrelerinin itme kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kesme parametreleri için kaplamalı ve kaplamasız matkaplar ile üç farklı ilerleme hızı ve üç farklı kesme hızı değerleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmadan alınan veriler kullanılarak Taguchi yöntemi ile optimum işleme parametreleri ortaya konulmuştur. Taguchi metoduna göre, kaplamalı kesici için optimum parametrelerin, kesme hızının orta değeri (90 m/dak) ve ilerleme hızının en düşük değeri (0,15 mm/dev) olduğunu ifade etmişlerdir [27].

Yapılan literatür araştırması sonucunda HSLA çeliklerinin delinebilirliği ile ilgili çalışmaların sınırlı olduğu ancak farklı alanlarda bir çok çalışmanın yapıldığı görülmüştür. HSLA çeliklerinin tormalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve talaş biçimleri üzerindeki etkilerinin araştırıldığı [28-30], frezeleme işlemlerinde kaplamalı kesiciler ve farklı soğutma sistemlerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkilerinin kıyaslandığı [31-33] ve kaynak edilebilirliği [34-37] ile ilgili araştırmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada ise HSLA çeliğinin delinmesinde oluşan çap değişimi ve çapak yüksekliğine, kesme parametrelerinin ve matkapların etkisinin gri ilişkisel analiz yöntemi ile değerlendirilip optimum sonuçların tespit edilmesi amaçlanmıştır.

2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND MEDHOD)

2.1. Deneysel Malzemesi (Experiment Material)

Delik delme deneyleri için otomotiv endüstrisinde önemli bir yere sahip olan HSLA çeliği kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan plakaların ölçüleri 100x80x4 mm şeklindedir. HSLA çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. HSLA-DIN EN 10149 çelik malzemenin kimyasal bileşimi (Ağırlıkça %)

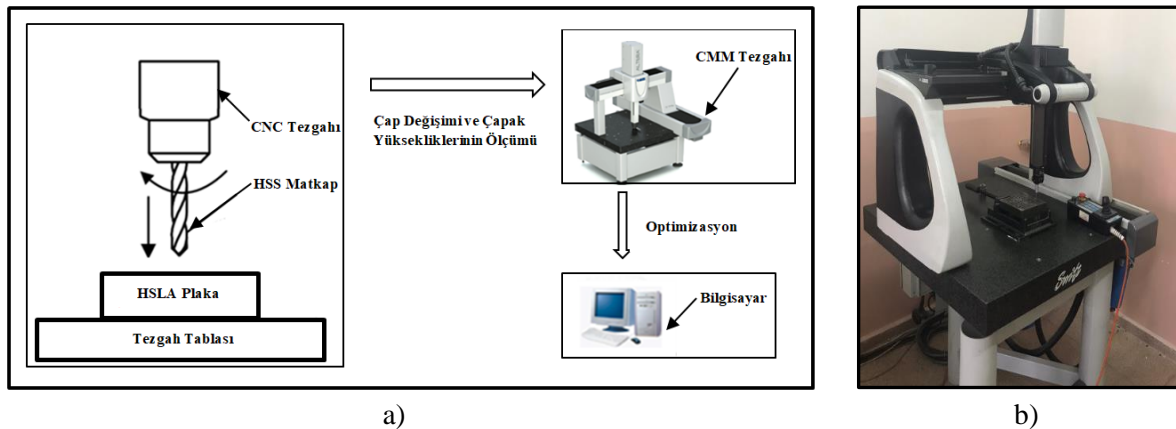
C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Ti	V	Fe
0,12	0,50	1,50	0,025	0,020	0,015	0,09	0,15	0,20	Kalan

2.2. Deneylerde Kullanılan Takım Tezgahı (Machine Tool Used in The Experiments)

Delik delme deneyleri, Johnford VMC-550 marka CNC dik işleme merkezinde ıslak şartlarında gerçekleştirilmiş olup, Hocut 3380 marka (%20 emülsiyon) kesme sıvısı kullanılmıştır. Deneylerde kesme sıvısı CNC tezgâhına ait soğutma sistemi ile kesici ve iş parçası üzerine tek taraftan püskürtülerek kullanılmıştır. Çap değişimi ve çapak yükseklikleri ölçümleri üç boyutlu CMM cihazında yapılmıştır. Ölçme işlemi, üç ayrı noktadan koordinat alınarak ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması ile çap değişimi ve çapak yükseklikleri belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan tezgahın teknik özellikleri Tablo 2'de, çap değişimi ve çapak yükseklikleri optimizasyonunda takip edilen işlemlerin şematik görünümü ve ölçüm yapılan CMM tezgahının fotoğrafı şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 2. Deneylerde kullanılan tezgahın teknik özellikleri

Tezgâhın gücü	7,5 KW
Maksimum devir sayısı	6000 dev/dak
Sırayla x, y, z ekseninde kurs	550, 500, 450 mm
Ölçü Hassasiyeti	0,001 mm
İşletim Sistemi	Fanuc



Şekil 1. a) Yapılan işlemlerin şematik görünümü, b) Ölçüm yapılan CMM tezgâhının görünümü

2.3. Kesici Takımlar ve Kesme Parametreleri (Cutting Tools and Cutting Parameters)

Kesici takım olarak TiAlN kaplamalı ve kaplamasız HSS matkaplar kullanılmıştır. Çalışmada işleme parametreleri üretici firmanın verileri ve literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak üç adet ilerleme hızı ve üç adet kesme hızı değeri seçilmiştir (Tablo3 ve Tablo4).

Tablo 3. Kesme parametreleri

İlerleme hızı (mm/dev)	0,05	0,075	0,1
Kesme hızı (m/dak)	18	26	34

Tablo 4. Deneylerde kullanılan kesici takımlar

Kesici takım	Üretici kodu	Çap (mm)	Kaplama bileşimi	Kaplama kalınlığı (μ)	Uç açısı	Helis açısı	Helis boyu (mm)
Kaplamasız HSS takım	UFL A1148	8	-	-	130°	30°	24
Kaplamalı HSS takım	UFL TFL 1149	8	TiAlN	3	130°	30°	24

2.4. Gri İlişkisel Analizi Metodu (Grey Relational Analysis Method)

Bu çalışmada GİA analiz yöntemi ile HSLA çeliğinin delinmesinde optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. GİA ile deney çalışmalarının değerlendirilmesinde excel tabloları kullanıldı. İki farklı matkap türü, üç farklı ilerleme hızı ve üç farklı kesme hızı arasından çap değişimi ve çapak yüksekliği ölçüm değerlerine göre en ideal matkap, ilerleme hızı ve kesme hızının belirlenmesi sağlanmıştır. GİA yöntemine göre yapılan değerlendirme aşağıda sırası ile anlatılmıştır.

1. Adım: Verilerin normalize edilmesi.

Bu aşamada, deney sonuçlarının 0-1 aralığında normalleştirilir. Normalizasyon işleminde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta hangi yaklaşıma göre yapılacağıdır. Gri ilişkisel analiz yönteminde serideki noktaların küçük değerlerde olması istenen bir durumsa lineer normalizasyonda küçük değer alan noktalar normalizasyonda 1'e yakın değerler alırken, büyük değer alan noktalar "0" a yakın değerler alacaktır [38]. Eğer amaç "daha yüksek daha iyi" yaklaşımı ise normalizasyon aşağıdaki formülle hesaplanır.

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

$x_i^0(k)$, i serisi k. sıradaki orjinal değer, $x_i(k)$ normalizasyon sonrası i. seri k. sıradaki değer, $\min x_i^0(k)$ i serisindeki minimum değer, $\max x_i^0(k)$ i serisindeki maksimum değerdir. "Daha düşük daha iyi" için aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$x_i(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (2)$$

"İdeal değer en iyi" için aşağıdaki formül kullanılır.

$$x_i(k) = 1 - \frac{|x_i^0(k) - x^0|}{\max x_i^0(k) - x^0} \quad (3)$$

Formüldeki x^0 olması gereken değeri ifade etmektedir.

2. Adım: k, n uzunluğundaki serideki k. sırayı gösterebilir. $\varepsilon(x_0(k), x_i(k))$, k. noktadaki gri ilişkisel katsayı olup formül 4, 5, 6 ve 7'e göre hesaplanır.

$$\varepsilon(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \xi \Delta_{\max}} \quad (4)$$

$$\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_j(k)| \quad (5)$$

$$\Delta_{\min} = \min_j \min_k |x_0(k) - x_j(k)| \quad (6)$$

$$\Delta_{\max} = \max_j \max_k |x_0(k) - x_j(k)| \quad (7)$$

$\xi \in (0-1)$ arasında bir değer olup genellikle 0,5 alınması tavsiye edilmiştir [39]. ξ işlevi, Δ_{0i} ile Δ_{\max} arasındaki farkı ayarlamaktır.

3. Adım: Gri ilişkisel derecenin hesaplanması aşağıdaki formül ile yapılır.

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon(x_0(k), x_i(k)) \quad (8)$$

$\gamma(x_0, x_i)$ gri bir sistemdeki x_i serisi ile x_0 referans serisi arasındaki geometrik benzerliğin bir ölçüsüdür. Gri ilişkisel derecesinin büyüklüğü x_i ile x_0 arasında kuvvetli bir ilişki olduğunun göstergesidir. Eğer karşılaştırılan iki seri birbirinin aynısı ise gri ilişkisel derece değeri 1 olarak bulunur. Gri ilişkisel derece karşılaştırılan serinin referans seriye ne kadar benzer olduğunu gösterir.

2.5. Kontrol Faktörleri ve Taguchi Metodu ile Deneysel Tasarım (Experimental Design with Control Factors and Taguchi Method)

Deneysel çalışma için üç seviyeli üç farklı kontrol faktörü ile bir Taguchi deney tasarımı oluşturulmuştur. Deneysel tasarım için iki farklı matkap, üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme hızı kullanılmıştır. Minitab programı ile üç seviyeli Taguchi L18 deney tasarımı yapılmıştır. Tablo 5’de tasarımın seviyeleri ve kontrol faktörleri verilmiştir.

Tablo 5. Deneylerde kullanılan faktörler ve seviyeler

Sembol	Kesme parametreleri	Seviyeler		
		1	2	3
A	Takım	Kaplamasız	Kaplamalı	-
B	İlerleme (mm/dev)	0,05	0,075	0,1
C	Kesme hızı (m/dak)	18	26	34

Tablo 5’deki faktörlerden yararlanılarak deneyler için kullanılan parametrelerin çap değişimi ve çapak yüksekliğine olan etkilerinin belirlenmesi için Tablo 6’da oluşturulan deney tasarımı verilmiştir.

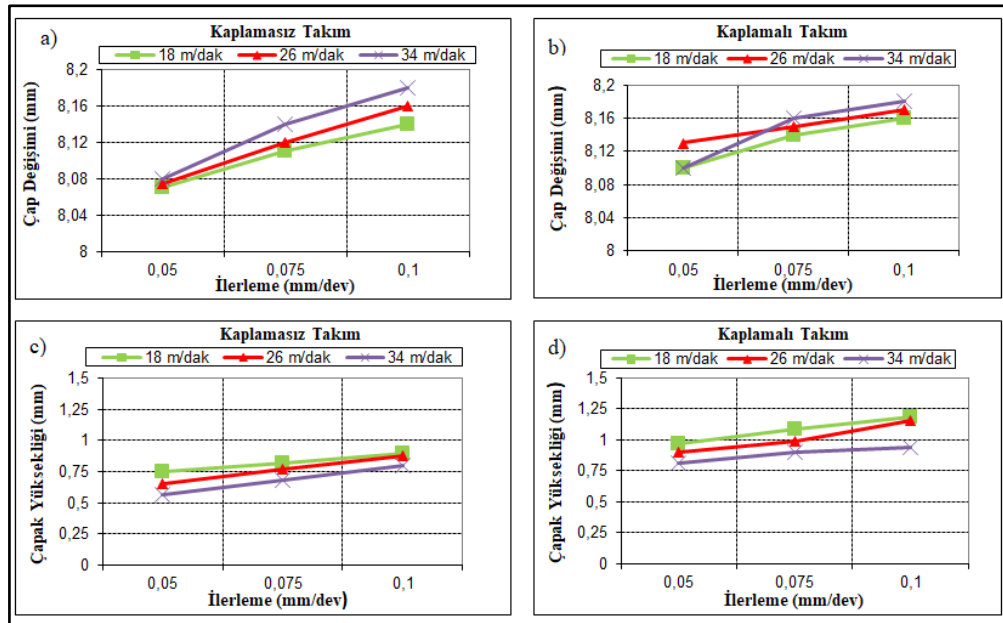
Tablo 6. Taguchi L18 ortogonal deney tasarımı

Deney No	A	B	C	Kesici Takım	İlerleme Hızı mm/dev	Kesme Hızı m/dak	Çap Değişimi (mm)	Çapak Yüksekliği (mm)
1	1	1	1	Kaplamasız	0,05	18	8,07	0,75
2	1	1	2	Kaplamasız	0,05	26	8,075	0,65
3	1	1	3	Kaplamasız	0,05	34	8,08	0,56
4	1	2	1	Kaplamasız	0,075	18	8,11	0,82
5	1	2	2	Kaplamasız	0,075	26	8,12	0,77
6	1	2	3	Kaplamasız	0,075	34	8,14	0,68
7	1	3	1	Kaplamasız	0,1	18	8,14	0,9
8	1	3	2	Kaplamasız	0,1	26	8,16	0,88
9	1	3	3	Kaplamasız	0,1	34	8,18	0,8

10	2	1	1	Kaplamalı	0,05	18	8,1	0,97
11	2	1	2	Kaplamalı	0,05	26	8,13	0,9
12	2	1	3	Kaplamalı	0,05	34	8,1	0,815
13	2	2	1	Kaplamalı	0,075	18	8,14	1,09
14	2	2	2	Kaplamalı	0,075	26	8,15	0,99
15	2	2	3	Kaplamalı	0,075	34	8,16	0,9
16	2	3	1	Kaplamalı	0,1	18	8,14	1,19
17	2	3	2	Kaplamalı	0,1	26	8,17	1,16
18	2	3	3	Kaplamalı	0,1	34	8,18	0,94

3. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION of TEST RESULTS)

Kesme parametreleri kullanılarak yapılan delik delme deneyleri sonucunda oluşan çap değişimi ve çapak yüksekliği değerleri ölçülmüştür. Kesme hızları, ilerleme hızları ve kesici takım tipine göre çap değişimi ve çapak yüksekliği değişimleri Şekil 2'deki grafiklerde verilmiştir.



Şekil 2. Çap değişimi ve çapak yüksekliği değerlerinin kesme hızı, kesici takım ve ilerleme hızına bağlı olarak değişimi

Kaplamalı ve kaplamasız HSS takımlarla, farklı kesme parametrelerinde delinen deliklerin çap değişimi ve çapak yüksekliği değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Şekil 2.a-b'deki grafikler incelendiğinde, bütün kesme hızı ve ilerleme hızı kombinasyonlarında, çap değişimi bakımından en iyi sonuç kaplamasız takımlardan alınmıştır. Bütün kesme hızlarında her iki takımında da en iyi çap değerlerinin alındığı ilerleme hızı 0,05 mm/dev'dir. Ayrıca ilerleme hızı arttıkça çap değerleri de artmıştır. Kesme hızları içinde, en iyi sonuç üç ilerleme hızında da 18 m/dak değerinde olmuştur. En büyük çap değerlerinin alındığı ilerleme hızı ise en yüksek ilerleme hızı olan 0,1 mm/dev'dir. Bütün kesme hızı ve ilerleme hızı kombinasyonlarında elde edilen çap değerleri nominal çaptan daha büyük olmuştur. İlerleme hızlarının artması ile delik çaplarında artış olması, yüksek kesme hızı ve ilerleme hızı kombinasyonlarında delik çap değerlerinin kötü olması, matkabın malzemeye dalma hızının büyük olmasına bağlı olarak birim zamanda kaldırılan talaş miktarının daha fazla olması sonucu kesme işleminin daha zor olması ile açıklanabilir [40]. Ayrıca artan kesme hızının titreşimleri artırması ile delik çaplarının büyümesine sebep olduğu düşünülmektedir [41]. Kesici takımlar açısından değerlendirme yapılırsa, kaplamalı takımlarla yapılan deneylerde delik çaplarındaki değişim kaplamasız takımlara göre daha fazla olmuştur. Bunun sebebi, kesici takım kaplamasından dolayı, kaplamasız kesicilere göre kesici kenar keskinliğinin azalması söylenebilir. Buna bağlı olarak, matkabın parçayı ağızlamasını zorlaştırdığı ve kaplamadan dolayı ezerek kesme yapıldığı da söylenebilir [42]. Şekil 2.c-d'deki grafikler incelendiğinde, ilerleme hızlarının artması

ile çapak yüksekliğinde artış olduğu görülmektedir. Bu durumu, matkabın çıkış esnasında delik sonundaki patlatma hızına bağlamak mümkündür. Yüksek ilerleme hızlarında patlatma hızı daha yüksek, düşük ilerleme hızlarında patlatma hızı daha düşük olmaktadır. Buda çapak yüksekliğini etkilemektedir.

Kesici takımlar açısından değerlendirme yapılırsa, kaplamasız takımlarla yapılan deneylerde, kaplamalı takımlara göre çapak yüksekliğinin daha az olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi, kaplamasız kesicilerin kaplamalı kesicilere oranla kesme kenarının daha keskin olması ve kaplamanın kesici kenarda azda olsa kalınlık artışına neden olması ile açıklanabilir. Dolayısı ile kaplamalı kesicilerde aynı cins kaplamasız kesicilere oranla malzemeye batmada zorlanmalar olabilir. Bu sebeple kaplamalı kesicilerde çapak yüksekliği daha fazla oluşmuştur. Kesme hızlarının artması ile çapak yükseklik değerlerinde bir azalma olduğu görülmektedir. Düşük kesme hızında (18 m/dak) ve yüksek ilerleme hızında (0,1 mm/dev) çapak yüksekliği en fazla olmuştur. 34 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızında çapak yüksekliğinin en az olduğu gözlenmiştir. Kesme bölgesinde, yüksek kesme hızından dolayı yüksek delme sıcaklıkları oluşmaktadır. Oluşan bu yüksek delme sıcaklıkları talaş akışını kolaylaştırmaktadır [43]. Dolayısı ile bu talaş akışının kolaylaşması çapak yüksekliğinin azalmasına neden olmaktadır.

3.1. Sonuçların Gri İlişkisel Analizi ile Değerlendirilmesi (Evaluation of Results with Gray Relational Analysis)

Gri ilişkisel analiz yöntemine göre yapılan değerlendirmeler tablolarda sunulmuştur. Çalışmada kullanılan çıktılar (çap değişimi ve çapak yüksekliği) için en ideal değerler en küçük değerlerdir. Delik delme işlemi esnasında çap değişimi ve çapak yüksekliği değerinin düşük olması istenen bir durumdur. Bu durumdan ötürü gri ilişkisel analiz yöntemine göre referans serisi oluşturulurken en düşük değerler dikkate alınır ve normalizasyon işlemi sırasında “daha düşük daha iyi” yaklaşımına göre değerlendirilir ve eşitlik 2’deki formülle hesaplanır. Sonuçların normalizasyonu Tablo 7’de verilmiştir. Normalizasyon işleminden sonra sonuçlar referans serisinden çıkarılarak katsayı matrisi için gerekli olan uzaklık matrisi elde edilmiş olur. Hesaplanan uzaklık matrisleri de Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Normalizasyon ve uzaklık matrisi değerleri

Deney no	Normalizasyon		Uzaklık matrisi	
	Çap değişimi (mm)	Çapak yüksekliği (mm)	Çap değişimi (mm)	Çapak yüksekliği (mm)
Referans serisi	1	1	1	1
1	1	0,6984	0	0,3015
2	0,9545	0,8571	0,0454	0,1428
3	0,9090	1	0,0909	0
4	0,6363	0,5873	0,3636	0,4126
5	0,5454	0,6666	0,4545	0,3333
6	0,8454	0,8095	0,1545	0,1904
7	0,3636	0,4603	0,6363	0,5396
8	0,1818	0,4920	0,8181	0,5079
9	0,3636	0,6190	0,6363	0,3809
10	0,7272	0,3492	0,2727	0,6507
11	0,4545	0,4603	0,5454	0,5396
12	0,7272	0,5952	0,2727	0,4047
13	0,3636	0,1587	0,6363	0,8412
14	0,0909	0,3174	0,9090	0,6825
15	0,1818	0,4603	0,8181	0,5396
16	0,0909	0	0,9090	1
17	0,0454	0,0476	0,9545	0,9523
18	0	0,3968	1	0,6031

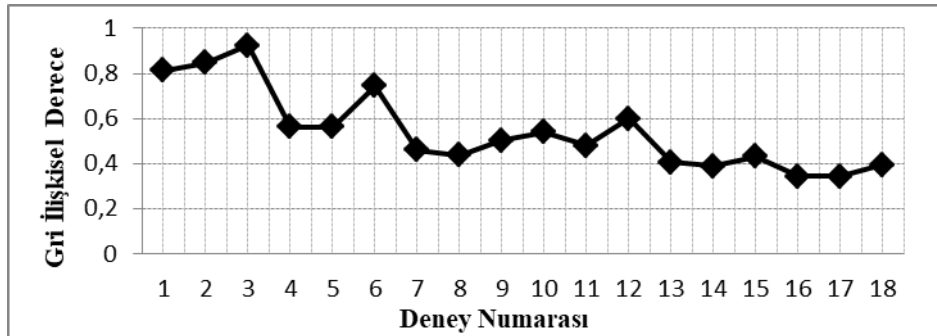
Her bir deney kombinasyonu için gri ilişkisel katsayısı eşitlik 4’deki formüle göre hesaplanmış ve Tablo 8’deki gri ilişkisel katsayı matrisi oluşturulmuştur. Katsayı matrisleri hesaplandıktan sonra eşitlik 8 ile gri

ilişkisel dereceleri bulunur. Bütün deneyler için gri dereceler ve gri ilişkisel derece büyüklük sıralaması Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Katsayı matrisi, gri ilişkisel derece ve sıralaması

Deney no	Katsayı matrisi		Gri ilişkisel derece ve sıralama	
	Çap değişimi (mm)	Çapak yüksekliği (mm)	Gri derece	Sıra no
Referans serisi	1	1		
1	1	0,6237	0,8118	3
2	0,9166	0,7777	0,8472	2
3	0,8461	1	0,9230	1
4	0,5789	0,5478	0,5633	6
5	0,5238	0,6000	0,5619	7
6	0,7638	0,7241	0,7440	4
7	0,4400	0,4809	0,4604	11
8	0,3793	0,4960	0,4376	12
9	0,4400	0,5675	0,5037	9
10	0,6470	0,4344	0,5407	8
11	0,4782	0,4809	0,4795	10
12	0,6470	0,5526	0,5998	5
13	0,4400	0,3727	0,4063	14
14	0,3548	0,4228	0,3888	16
15	0,3793	0,4809	0,4301	13
16	0,3548	0,3333	0,3441	17
17	0,3437	0,3442	0,3440	18
18	0,3333	0,4532	0,3932	15

Tablo 8'de ve şekil 3'de verilen minimum çap değişimi ve çapak yüksekliği için gri ilişkisel derecede en yüksek değer 3 numaralı deneyden elde edilmiştir. Böylece minimum çap değişimi ve çapak yüksekliği değerini elde etmek için kullanılacak en ideal parametrelerin 3 numaralı deneyde olduğu görülmektedir.



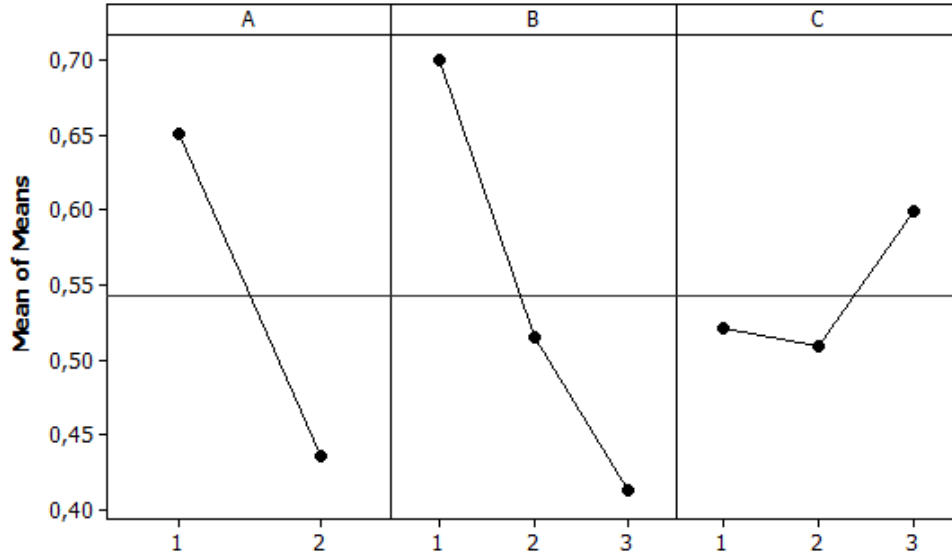
Şekil 3. Minimum çap değişimi ve çapak yüksekliği için gri ilişkisel derece

Tablo 8'deki gri derece verileri, faktör seviyelerinin aynı olduğu durumlar için gruplanmış ve bu gruplar içerisinde yer alan değerlerin ortalamaları alınarak faktör etkileri belirlenmiştir.

Tablo 9. Faktör seviyeleri için gri ilişkisel dereceleri

Sembol	Parametre	Faktör seviyesine göre ortalama gri ilişkisel derece			
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Max-Min
A	Takım	0,650*	0,436	-	0,214
B	İlerleme (mm/dev)	0,700*	0,516	0,414	0,287
C	Kesme hızı (m/dak)	0,521	0,510	0,599*	0,089

A1B1C3



Şekil 4. Delme parametrelerinin etki dereceleri

Tablo 9 değerlendirildiğinde, kesici takım faktörünün 1. seviyesi (A1), ilerleme faktörünün 1. seviyesi (B1) ve kesme hızı faktörünün 3. seviyesi (C3) değerlerinde, ortalama gri ilişki derecesinin en yüksek değeri aldığı görülmektedir. Dolayısıyla A1B1C3 (Kaplamaşız takım, 0,05 mm/ dev ilerleme ve 34 m/dak kesme hızı) faktör seviyeleri kombinasyonu, HSLA çeliğinin delinmelerinde optimum delme şartları olarak tespit edilmiştir. Bu değerler de en düşük ilerleme ve en yüksek kesme hızı değerleridir. Tablo 9'un son sütununda ayrıca gri ilişki derecelerinin her bir faktör için maksimum ve minimum değerleri arasındaki farklar verilmiştir. Bu farkın büyük olması, bir faktörün işlem üzerindeki etkinlik derecesinin daha fazla olduğunu göstermektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında, ilerlemenin çap değişimi ve çapak yüksekliği üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu; bunu sırasıyla kesici takım ve kesme hızı faktörlerinin takip ettiği görülmektedir. Faktör seviyelerine bağlı olarak Taguchi ile "en küçük en iyi" yaklaşımına göre sonuçların optimizasyonu yapılarak Şekil 4 oluşmuştur.

3.2. Çap Değişimi ve Çapak Yüksekliği için Anova Sonuçları (Anova Results for Diameter Change and Burr Height)

Varyans analizinde amaç çap değişimi ve çapak yüksekliği üzerinde faktörlerin ve seviyelerinin işlem üzerinde ne kadar etkili olduğunun belirlenmesidir. Çap değişimi ve çapak yüksekliği çıktılarının bir arada değerlendirildiği gri ilişkisel analize bağlantılı olarak yapılan anova analizinde (Tablo 10) en etkili faktörler sırasıyla; %47,09 ile ilerleme, %38,86 ile takım ve bu değerlerinin oluşumuna etkisi en az olan faktör ise % 2,61'lik oran ile kesme hızı olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 10. Çap değişimi ve çapak yüksekliği için Anova sonuçları

Faktör	SD	KT	KO	F	P	%PCR
A	1	0,20619	0,206189	53,37	0	38,86
B	2	0,25311	0,126557	32,76	0	47,09
C	2	0,02827	0,014136	3,66	0,057	2,61
Hata	12	0,04636	0,003863			11,50
Toplam	17	0,55717				

3.3. Doğrulama Deneyleri Sonuçları (Verification Testing Results)

Taguchi metodu ile optimizasyon işleminde son olarak doğrulama deneyleri yapılmaktadır. Önceden belirlemiş olduğumuz çap değişimi ve çapak yüksekliği parametreleri (A1B1C3) kullanılarak, üç adet doğrulama deneyi sonucunda elde edilen verilerin ortalaması alınarak sonuçların güvenilirliği araştırılmıştır. Optimize edilmiş kesme parametreleri Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. Doğrulama deneyi sonuçları

	Başlangıç Kesme Parametreleri	Optimum Kesme Parametreleri	
		Tahmini	Deneysel
Seviye	A1B1C2	A1B1C3	A1B1C3
Çap değişimi (mm)	8,11		8,08
Çapak yüksekliği (mm)	0,82		0,56
GİA	0,789	0,859	0,423
GİA'deki gelişme: 0,366			

A1B1C2 kombinasyonu, başlangıç kombinasyonu olarak 18 adet deneyin ortalamasına (0,789 mm) göre oluşmuştur. Tablo 11'e göre çap değişimi ve çapak yüksekliği değeri 0,789 mm'den 0,423 mm'ye düşürülmüş ve % 46,39 $((0,789-0,423)/0,789)$ oranında iyileşme sağlanmıştır.

SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, HSLA çeliğinin delinmesinde kesici takım, ilerleme ve kesme hızı faktörlerinin çap değişimi ve çapak yüksekliği üzerindeki etkileri gri ilişkisel analiz yöntemiyle incelenmiştir. Buna göre, çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- ✓ Kaplamasız takımlarda çap değişimi ve çapak yüksekliği değerlerinin TiAlN kaplamalı matkaplara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ HSLA malzemesinin delinmesinde optimum seviyelerin A1B1C3 olduğu görülmüştür. Bunlarda, kaplamasız matkaplar, en düşük ilerleme hızı (0,05 mm/dev) ve en yüksek kesme hızı (34 m/dak) parametreleridir.
- ✓ Deneysel sonuçlarına uygulanan varyans analizine göre değişkenlerin çap değişimi ve çapak yüksekliği üzerindeki etki oranları, %47,09 ile ilerleme, %38,86 ile matkap ve %2,61'lik oran ile kesme hızı olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ HSLA malzemesinin HSS matkaplarla delinmesinde gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılarak çap değişimi ve çapak yüksekliği için optimum delme parametreleri ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] N. Z. Khan, Z. A. Khan, A. N. Siddiquee, A. K. Chanda, Investigations on the effect of wire EDM process parameters on surface integrity of HSLA: A multi-performance characteristics optimization. *Production & Manufacturing Research*, 2:1 (2014) 501-518.
- [2] J. L. Lin, K. S. Wang, B. H. Yan, Y. S. Tarn, Optimization of the electrical discharge machining process based on the taguchi method with fuzzy logics. *Journal of Materials Processing Technology*, 102:1-3 (2000) 48-55.
- [3] E. Kılıçkap, M. Hüseyinoğlu, Tepki Yüzey Modeli ve Genetik Algoritma Kullanılarak AISI 316'nın Delinmesinde Oluşan Çapak Yüksekliğinin Modellenmesi ve Optimizasyonu. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 1:1 (2010) 3-9.
- [4] K. Subramanian, N. H. Cook, Sensing of drill wear and prediction of drill life. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 99:4 (1977) 295-301.
- [5] F. J. Da silva, D. D. Franco, A. R. Machado, E.O. Ezugwu, A.M. Souza Jr, Performance of cryogenically treated HSS tools. *Wear*, 261 (2006) 674-685.

- [6] T. Kıvak, G. Samtaş, A. Çiçek, Taguchi method based optimisation of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drills. *Measurement*, 45:6 (2012) 1547-1557.
- [7] D. K. Lee, S. H. Lee, J. J. Lee, The structure and mechanical properties of multilayer $\text{Ti}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{N}$ coatings deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition. *Surface and Coatings Technology*, 169 (2003) 433-437.
- [8] Y. H. Cheng, T. Browne, B. Heckerman, C. Bowman, V. Gorokhovskiy, E. I. Meletis, Mechanical and tribological properties of TiN/Ti multilayer coating. *Surface and Coatings Technology* 205:1 (2010) 146-151.
- [9] A. Escudeiro Santana, V.H. Derflinger, A. Schutze, Relating Hardness-curve shapes with deformation mechanisms in TiAlN thin films enduring indentation. *Materials Science and Engineering, A* 406:1-2 (2005) 11-18.
- [10] L. W. Ma, J. M. Cairney, M.J. Hoffman, P.R. Munroe, Deformation and fracture of TiN and TiAlN coatings on a steel substrate during nanoindentation. *Surface and Coatings Technology* 200:11 (2006) 3518-3526.
- [11] D. Yu, C. Wang, X. Cheng, F. Zhang, Optimization of hybrid PVD process of TiAlN coatings by Taguchi method. *Applied Surface Science* 255:5 (2008) 1865-1869.
- [12] J. M. Castanho, M. T. Vieira, Effect of ductile layers in mechanical behaviour of TiAlN thin coatings. *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144:20 (2003) 352-357.
- [13] K. Ahmadi, Y. Altintas, Stability of lateral, torsional and axial vibration in drilling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 68 (2013) 63-74.
- [14] K. Yaman, N. Biçakçı, A. Özgedik, Matkap Boyunun Delik Toleranslarına Etkisinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 20:4 (2017) 765-775.
- [15] E. Bahçe, E. Kılıçkap, Ö. Cihan, Al-5005'in Delinmesinde Delme Parametrelerinin Çapak Oluşumuna Etkisinin Araştırılması. 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, (2010) 242-250.
- [16] T. Kıvak, A. Çiçek, İ. Uygur, N.A. Özbek, AISI 316 Östenik Paslanmaz Çeliğin Delinmesinde Tek Katlı ve Çok Katlı Kaplamaların Delik Kalitesi Üzerindeki Etkileri. 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu Ankara, (2012) 28-33.
- [17] A. A. Rahman, A. Mamat, Effect of machining parameters on hole quality of micro drilling for brass. *Modern Applied Science*, (2009) 221-229.
- [18] J. P. Kumar, P. Packiaraj, Effect of drilling parameters on surface roughness, tool wear, material removal rate and hole diameter error in drilling of OHNS. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, (2012) 150-154.
- [19] A. Mavi, Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Delinmesinde Yüzey Form Özelliklerini Etkileyen Optimum Kesme Parametrelerinin Belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6:3 (2018) 634-643.
- [20] T. Kıvak, K. Habalı, U. Şeker, The effect of cutting parameters on the hole quality and tool wear during the drilling of Inconel 718. *Journal of Science*, 25:2 (2012) 533-540.

- [21] C. C. Tsao, H. Hocheng, Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44:10 (2004) 1085-1090.
- [22] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, B. T. Achyutha, B. Siddeswarappa, Genetic algorithm-based burr size minimization in drilling of AISI 316L stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 197:1-3 (2008) 225-236.
- [23] Y. Kaplan, M. Nalbant, H. Gökkaya, AISI D2 ve AISI D3 Soğuk İş Çeliklerinin Delinmesinde İşleme Parametrelerinin Çapak Oluşumuna Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Karaelmas Fen ve Edebiyat Dergisi*, 1:1 (2011) 37-46.
- [24] N. Tosun, Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in drilling by using grey relational analysis. *Int J Adv Manuf Technol*, 28:5-6 (2006) 450-455.
- [25] E. Kılıçkap, M. Hüseyinoğlu, Selection of optimum drilling parameters on burr height using response surface methodology and genetic algorithm in drilling of AISI 304 stainless steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 25 (2010) 1068-1076.
- [26] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, Minimizing burr size in drilling using artificial neural network (ANN)-particle swarm optimization (PSO) approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23:5 (2012) 1783-1793.
- [27] S. Yağmur, R. Çakıroğlu, A. Acır, U. Şeker, AISI 1050 Çeliğinin Delinmesinde Kesme Kuvvetlerinin Taguchi Metodu İle Optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5:2 (2017) 241-246.
- [28] N. A. Raof, J. A. Ghani, C. H. C. Haron, Machining-induced grain refinement of AISI 4340 alloy steel under dry and cryogenic conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, 8:5 (2019) 4347-4353.
- [29] S. R. Das, A. Panda, D. Dhupal, Hard turning of AISI 4340 steel using coated carbide insert: Surface roughness, tool wear, chip morphology and cost estimation. *Materials Today: Proceedings*, 5:2 (2018) 6560-6569.
- [30] P. L. Khan, S. V. Bhivsane, Experimental analysis and investigation of machining parameters in finish hard turning of AISI 4340 steel. *Procedia Manufacturing*, 20 (2018) 265-270.
- [31] M. Muaz, S.K. Choudhury, Experimental investigations and multi-objective optimization of MQL-assisted milling process for finishing of AISI 4340 steel. *Measurement*, 138 (2019) 557-569.
- [32] P. Gopikrishnan, A. Akbar, A. Asokan, B. Bhaskar, C.S. Sumesh, Numerical modelling and optimization of surface finish during peripheral milling of AISI 4340 steel using RSM. *Materials Today: Proceedings*, 5:11 (2018) 24612-24621.
- [33] P. Chakraborty, S. Asfour, S. Cho, A. Onar, M. Lynn, Modeling tool wear progression by using mixed effects modeling technique when end-milling AISI 4340 steel. *Journal of materials processing technology*, 205:1-3 (2008) 190-202.
- [34] H. Alipooramirabad, A. Paradowska, R. Ghomashchi, M. Reid, Investigating the effects of welding process on residual stresses, microstructure and mechanical properties in HSLA steel welds. *Journal of Manufacturing Processes*, 28 (2017) 70-81.
- [35] M. Saadati, A.K.E. Nobarzad, M. Jahazi, On the hot cracking of HSLA steel welds: Role of epitaxial growth and HAZ grain size. *Journal of Manufacturing Processes*, 41 (2019) 242-251.

- [36] L. de Jesus Jorge, V.S. Cândido, A.C.R. da Silva, F. da Costa Garcia Filho, A.C. Pereira, F.S. da Luz, S.N. Monteiro, Mechanical properties and microstructure of SMAW welded and thermically treated HSLA-80 steel. *Journal of materials research and technology*, 7:4 (2018) 598-605.
- [37] R. Pamnani, T. Jayakumar, M. Vasudevan, T. Sakthivel, Investigations on the impact toughness of HSLA steel arc welded joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 21 (2016) 75-86.
- [38] Wen, K. L. The grey system analysis and its application in gas breakdown and var compensator finding. *International Journal of Computational Computing*, 2:1 (2004) 21-44.
- [39] Palanikumar, K. Rubio, J. C. Abrao, A. M. Correia, A. E. Davim, J. P. Influence of drill point angle in high speed drilling of glass fiber reinforced plastics. *Journal Composite Materials*, 42 (2008) 2585–2597.
- [40] T. Kıvak, Inconel 718'in Delinebilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2007) 55,74,78,82.
- [41] M. Kurt, Y. Kaynak, E. Bağcı, Evaluation of drilled hole quality in Al 2024 alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 37 (2008) 1051-1060.
- [42] Ş. Bayraktar, Karbon Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Frezeleme İşleminde İşlenebilirliğinin Deneysel Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2011) 80.
- [43] M. Bakkal, Shih, J. Albert, Samuel B. McSpadden, C.T. Liu, Ronald O. Scattergood, Light emission, chip morphology, and burr formationin drilling the bulk metallic glass. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005) 741–752.