

TAGUCHİ OPTİMİZASYON METODUNUN İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA KULLANIMI: MINİTAB ÖRNEĞİ

Erman AYDIN *

Alınma: 15.06.2023; kabul: 26.10.2023

Öz: Bu çalışmada, bir çok mühendislik alanında toplam kalite yönetimi kapsamında kullanılmakta olan Taguchi optimizasyon metodu, deney tasarımı ve ANOVA'nın imalat mühendisliği alanında kullanımı üzerinde durulmuştur. İmalat süreçlerinde (tornalama, frezeleme, delme vb.) kullanılan kesme hızı (V_c), ilerleme değeri (f), kesme derinliği (a), kesici takım uç açıları ve diğer birçok faktör imalat aşamasında doğru saptanması gereken önemli faktörlerdir. Bu sebepten dolayı, deneysel tasarım süreçleri kullanılarak en az deney sayısı ile sonuçlar elde edilmesi ve bu sonuçların doğrulama deneyleri ile kıyaslanmasının ardından optimum faktör seviyelerinin belirlenmesi hedeflenmektedir. Hem sanayi kuruluşlarındaki Ar-Ge birimlerine hem de yüksek lisans ve doktora öğrencilerinin akademik çalışmalarına bir rehber niteliğinde olması amacıyla, imalat mühendisliği alanında Taguchi optimizasyon metodu ile yapılan çalışmalar incelenmiş, imalat alanında kullanım örnekleri ile ele alınarak Minitab 18 paket programı aracılığıyla sade bir şekilde açıklanmıştır. Sonuç olarak, yeni araştırmacılar için Taguchi optimizasyon metodunu, deney tasarımı ve ANOVA'yı en efektif şekilde nasıl kullanabilecekleri hakkında rehber niteliğinde örnek bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Taguchi metodu, Deney tasarımı, İmalatta optimizasyon, Minitab 18

Use of Taguchi Optimization Method in Manufacturing Engineering: The Minitab Example

Abstract: In this study, the Taguchi optimization method, which is used within the scope of total quality management in many engineering fields, experimental design and the use of ANOVA in the field of manufacturing engineering are emphasized. Cutting speed (V_c), feed rate (f), depth of cut (a), cutting tool tip angles and many other factors used in manufacturing processes (turning, milling, drilling, etc.) are important factors that must be determined correctly during the manufacturing phase. For this reason, it is aimed to obtain results with the least number of experiments by using experimental design processes and to determine the optimum factor levels after comparing these results with validation experiments. In order to be a guide for both the R&D units and the academic studies of postgraduate students, the studies carried out with the Taguchi optimization method in the field of manufacturing engineering have been examined and explained in a simple way through the Minitab 18 package program by dealing with examples of use in the field of manufacturing. As a result, a sample study was conducted as a guide for new researchers on how to use the Taguchi optimization method, experimental design and ANOVA in the most effective way.

Keywords: Taguchi method, Experiment design, Optimization in manufacturing, Minitab 18

* Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Söke Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, 09200, Söke, AYDIN

İletişim Yazarı: Erman Aydın (erman.aydin@adu.edu.tr)

1. GİRİŞ

Taguchi metodu 1960'lı yıllarda Japonya'da Genichi Taguchi tarafından ortaya atılmış, ardından 1980'li yıllarda ABD'de kullanılmış ve endüstri alanında büyük bir sıçrayış meydana gelmesine imkân sağlamıştır. Bu sürecin temelinde, ürünlerin elde edilmesinin ardından gerçekleştirilecek olan kalite kontrol işlemlerinin çok yüksek maliyetlere sebep olmasından dolayı, daha işlemlere başlamadan önce, yapılacak çalışmaların en doğru parametreler ile gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır (Hamzaçebi ve Kutay, 2003; Khan ve Sahai, 2012). Aksi takdirde, günümüz şartlarındaki yoğun rekabetçi ortamda ürünün hem imalat süreci öncesinde hem de imalat süreci sonrasında kaliteyi arttırmaya yönelik çalışmalar firmalar için ekonomik kayıp olarak karşılına çıkacaktır. Bu sebeple daha üretim sürecinin başında, süreci etkileyen temel faktör ve bu faktörlerin seviyelerinin doğru analiz edilerek uygulamaya koyulması büyük bir önem arz etmektedir (Balaji ve ark., 2016; Y. T. İç ve Yıldırım, 2012; Önal ve ark., 2021).

Temel olarak toplam kalite yönetiminin bir ana unsuru olarak ortaya çıkan optimizasyon yöntemleri ve deneysel tasarımlar, günümüzde otomotiv endüstrisinden, maden sanayisine, bilişim endüstrisine, sağlık sektörüne ve daha bir çok alana uygun olarak verimliliği arttırmak, maliyetleri en aza indirmek ve imalat süreçlerini doğru tasarlamak amacıyla yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu optimizasyon yöntemlerinden Taguchi optimizasyon metodu, özellikle makine imalat alanında, parçaların üretimlerinin gerçekleştirilmesinde ya da bu üretimlerin süreçlerinde, proses aşamalarında, kontrol edilebilen faktörler ile kontrol edilemeyen faktörlerin imalat üzerindeki etkilerinin saptanması ve kıyaslanması amacıyla kullanılmaktadır. Böylece meydana gelen değişkenliklerin en aza indirilmesi sağlanmaktadır (Canıyılmaz ve Kutay, 2003). Taguchi optimizasyon metodunun kullanımının ardından elde edilen optimum faktör seviyeleri bir sonraki işlem olarak ANOVA ya tabi tutulmaktadır. ANOVA yani varyans analizi; çalışmadaki faktörlerin deney sonucuna etkileri arasında anlamlı bir fark olup olmadığının belirlenmesi için kullanılmaktadır (İ. Erdem, 2017; Tabachnick ve ark., 2015). Böylece, optimum parametrelerin saptanması sağlanmaktadır.

Bu çalışmada, Taguchi optimizasyon metodunun İmalat Mühendisliği alanında kullanımı akademik çalışmalar üzerinden uygulamalı olarak ele alınmış ve yeni çalışma yapacak araştırmacılar için Minitab 18 kullanılarak, Taguchi optimizasyon metodu, deney tasarımı ve ANOVA uygulaması gösterilmiştir. Böylece, yeni çalışmalar yapacak araştırmacılar için rehber niteliğinde bir çalışma oluşturularak literatürdeki alan yazına katkıda bulunulmuştur.

2. DENEY TASARIMI

Deney tasarımı tabiri, elde edilmek istenen ürün için göz önünde bulundurulması gereken sistem değişkenlerinin belirli bir düzen içerisinde değerlendirilmesi ve bu doğrultuda işlenmesini ifade etmektedir. Bu süreç, sisteme girecek olan değişkenlerin sayısına bağlı olarak, üretimde zaman ve maliyet faktörlerinin de göz önünde bulundurulmasıyla çok fazla deneysel çalışmaya sebep olabilmektedir (Gökçe ve Taşgetiren, 2009). Gerçekleştirilen bu çalışmalarda istenen sonuçların elde edilmesi çok fazla zaman alabilmekte ve çok sayıda ürünün ıskartaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Bu durumlar, her aşamada firma için ekstra maliyet oluşturmakta ve kaliteli bir ürün elde etme sürecini uzatmaktadır. Bu sebeple, üretim sürecindeki değişkenlerin doğru tayin edilmesinin ardından, gerçekleştirilecek deneylerin minimize edilerek uygulanması ve ardından bu sonuçların test edilmesi ile kaliteli bir sonuca varılması hem daha kolay hem de daha az maliyetli olmaktadır (Hamzaçebi ve Kutay, 2003; Nalbant ve ark., 2007).

Deney tasarımının tarihsel gelişimine bakıldığında ilk olarak tarım alanında uygulandığı görülmektedir. Uygulamada sulama ve gübre miktarlarının ürünlere olan etkileri araştırılmıştır. Bu uygulama İngiliz bilim insanı Sir Ronald Fisher tarafından bulunmuştur ve ayrıca Sir Ronald

Fisher günümüzde ANOVA (Analyses of Variance) olarak adlandırılan varyans analizinin de temelini atmıştır. Tarım alanından sonra kimya ve ilaç sektörlerinde kullanımları gerçekleşmiştir. Ancak makine imalat sanayinde kullanımları aynı paralellikte ilerlememiştir. Deney tasarımı sürecinin imalat sektöründe kullanımı 1970'li yılları bulmuştur. Bu sürenin ardından, imalat aşamasında tüm faktörlerin göz önüne alınması ile gerçekleştirilen imalatların ve ürün elde edildikten sonra yapılan kalite kontrol çalışmalarının ne denli maliyetli olduğu anlaşılmıştır. Bu duruma istinaden, imalatı etkileyen değişkenlerin daha önceden uygun deney tasarımları ile bir süzgeçten geçirilmesinin, maliyetlerde önemli bir kazanım oluşturduğunu görmüşlerdir (Şirvancı, 1997; Taylan, 2009).

Deney tasarımlarında öncelikli olarak deneye etki eden değişkenlerin sayıları belirlenmektedir. Buradaki değişkenler faktör ve düzey olarak adlandırılan gruplar içerisinde dağıtılmaktadır. Faktör, A-B-C gibi büyük harfler ile ifade edilen temel değişkenlerin isimlerine karşılık gelmektedir. Düzey/seviler ise faktörlerin alt değişkenlerini ifade etmektedir. Örneğin, makine imalat alanında kesme hızı (V_c) değeri bir faktör olarak karşımıza çıkarken, 50m/dak - 60m/dak - 70m/dak değerleri ise kesme hızı (V_c) faktörünün düzey/sevilerini ifade etmektedir. Burada belirtilen değerler üretim aşamasına etki eden durumlara bağlı olarak arttırılabilir ya da azaltılabilir. Makine imalat sektöründe, delme, frezeleme, tornalama, broşlama ya da azdırma ile dış açma gibi sektörün hitap ettiği her alandaki değişkenler, birer faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Yine makine imalat sektörü için faktörleri çeşitlendirecek olursak özellikle torna, freze ve matkap işlemleri için ilerleme değeri (f), kesme derinliği (a), takım kaplama türleri, takım uç yarıçapları (r), matkap çapları (d), matkap uç açıları, kesici takım kaplama kalınlıkları, delme türleri gibi birçok faktör imalat aşamasında ürünün kalitesini etkileyici temel unsurlar durumundadır. Bu faktörlerin etkilediği ve sonuç olarak görmek istediğimiz değişkenler ise "respons" yani kalite değişkeni olarak adlandırılmaktadır. Buradaki kalite değişkeni, deneysel tasarımın yapılmasını gerekli kılan ana sonuç faktörüdür.

Örnek olarak bir tornalama işleminde, kesme hızı – ilerleme – kesme derinliği değerleri faktörleri oluştururken, bu değişkenler neticesinde elde edilmek istenen ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a), deneysel çalışmada respons'u yani kalite değişkenini oluşturmaktadır. Deneysel çalışma neticesinde elde edilecek olan ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri, $R_a:0.25\mu$, $R_a:0.35\mu$, $R_a:0.45\mu$ şeklinde karşımıza çıkarak, deneysel çalışmanın sonuçlarını oluşturacaktır. Bu sebeple, istenilen ürün kalitesinin elde edilebilmesi için, bu faktörlerin her bir düzey/seviye için ayrı ayrı deneysel çalışma yapılması gerekecektir. Faktör ve düzey sayısına bağlı olarak, bazı zamanlar tüm değişkenler deneysel çalışmalara tabii tutulurken bazı durumlarda tüm değişkenler üzerinde deneysel çalışma yapılmamaktadır. Eğer tüm değişkenler deneysel çalışmalara tabii tutulursa, bu durum üretim maliyetlerini aşırı derece arttıracak ve ayrıca işletmeye çok büyük zaman kaybı yaşatacaktır. Ayrıca, her faktörün sisteme etkilerinin ayrı ayrı incelenebileceği bir durum da karşımıza çıkmaktadır. Bu durumda faktörlerin bir birleri ile olan ilişkisinin yarattığı etkileşimli sonuçlar göz ardı edilmiş olmaktadır. Neticesinde elde edilen veriler performans iyileşmesine verimli bir etkide bulunamayacaktır (Şavaşkan ve Taptık, 2004). Bu sebeplerden dolayı, uygun deney tasarımları yapılarak faktörler ve düzeyler arasında seçimler yapılması ve bu deneylerin gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır.

Deney tasarımında faktör sayıları k harfi ile $k=3$, $k=4$, $k=5$ şeklinde ifade edilmektedir. Düzeyler ise a, b, c şeklinde küçük harfler ile gösterilmektedir. Burada $k=3$ ve $a=2$ olduğu bir deney tasarımında, toplam deney sayısı $n=2^3=L8$ şeklinde ifade edilebilmektedir. Faktör sayısının 4, düzey sayısının 2 olduğu bir deney tasarımında $n=2^4=L16$ ile ifade edilmektedir. Buradaki L8 ve L16 ifadeleri, gerçekleştirilecek deney sayılarını göstermektedir. Eğer belirtilen tüm deneyler gerçekleştirilir ise, bu tür deneylere tam faktöriyel ya da tam eşlendirmeli deney denilmektedir. Burada gerçekleştirilecek deney sayıları Eşt. 1'de belirtildiği üzere;

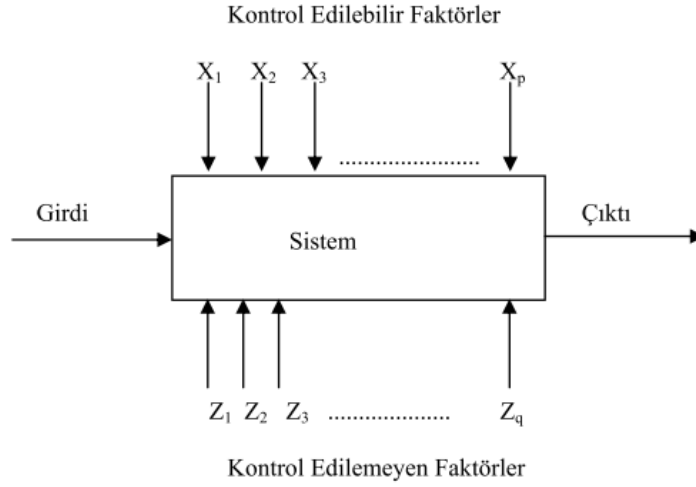
$$n = a^k \quad (1)$$

Formülü kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada n =deney sayısını, a =Faktörün düzey/seviye sayısını ve k ise bilindiği üzere faktör sayısını ifade etmektedir (Taylan, 2009). Burada faktörlerin tüm düzeyleri için gerçekleşen eşlendirmeler en az 1 kez denenmektedir. Deneme sayısı ise r ile ifade edilmektedir. Bir defa gerçekleştirilen deneysel çalışmalar tekrarsız deneyler olarak adlandırılmaktadır. Her faktör düzey eşleştirmesi istenilen r sayısı kadar tekrarlanabilmekte ve r sayısına bağlı olarak deneysel çalışmanın güvenilirliği istatistiksel olarak artmaktadır. Ancak, bir deneyin birden fazla gerçekleştirilmesi hem maliyet hem de zaman bakımından mümkün olmadığında, tüm eşleşmelerin denenmesinin yerine belirli bir bölümü denenmektedir. Bu şekilde eşleşmelerin belirli bir bölümünün denendiği deneylere ise kesirli deneyler denilmektedir. Bu deneylerin ardından çıkan veriler doğrultusunda doğrulama deneyleri yapılarak, elde edilen verilerin örtüşme oranları saptanmaktadır.

3, 4 ya da 5 faktörlü deney tasarımında, iki düzeyli değişkenin olması durumunda, eğer tam faktöriyel bir çalışma yapılacaksa $n=2^5=L64$ olacaktır. Bu durumda 64 adet gözlem yapılması gereken deney karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca bu deneysel çalışma 4 kez tekrar edilecek olursa, $64 \times 4=256$ adet deney yapılması gerekecektir (Gökçe ve Taşgetiren, 2009). Maliyet açısından düşünüldüğünde 64 adet ya da 256 adet deney yapılması, özellikle imalat sanayisinde kaçınılan bir durumdur. Buna benzer şekilde, faktör sayısının artışı ile orantılı olarak gerçekleştirilmesi gereken deney sayısı artacaktır. Faktör sayısı $k=7$ ve 2 düzeyli bir deney tasarımını ele alacak olursak, gerçekleştirilmesi gereken tam faktöriyel deney sayısı $2^7=128$ olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durumda 128 adet deney yapmanın maliyeti sebebiyle, $n=128$ olan deney sayısı, n değerinin tam bölünebildiği bir kesir değeri ile sadeleştirilerek, deney sayısı orantılı olarak azaltılabilmektedir. Orantılı olarak yapılan bu sadeleştirme işlemi kesirli deney tasarımı olarak adlandırılmaktadır. $N=128$ için baktığımızda, $1/2$ için $n=64$ değeri, $1/4$ için $n=32$ değeri, $1/8$ için $n=16$ ve en son olarak da $1/16$ için $n=8$ deney sayısı karşımıza çıkmaktadır. Burada 128 deney ile gerçekleştirilecek bir çalışma $L16$ deney tasarımı ile gerçekleştirilebilir bir yapıya kavuşturulmuştur. Ancak, deney sayısının ($n=128$) tam olarak bölünmesi ile elde edilen daha az deney sayıları ($n=8$) her zaman istenen sonucu vermeyebilirler. Çünkü $k=7$ faktörlü bir deneyde, $n=8$ olması durumunda, $n-1=7$ etki hesap edilebileceği için $1/16$ kesirli deneyi ile elde edilen $L8$ deney tasarımı uygun olmayacaktır. Bu sebeple faktör ve düzey sayılarına uygun olan sadeleştirme işlemi yapılmalıdır. Bu yöntem birçok alanda deney sayılarının minimum seviyeye düşürülebilmesi için uygulanmaktadır (V. Erdem ve ark., 2010; Şirvancı, 1997).

3. TAGUCHI OPTİMİZASYON METODU

Taguchi geliştirmiş olduğu kalite yönetiminde, kalitenin ürünün sahaya çıktıktan sonraki kullanıcı geri dönüşlerinden ziyade, daha üretim süreci başlamadan önce tasarım sürecinde olması gerektiğini belirtmiş ve çalışmalarını bu prensip üzerinden sürdürmüştür. Taguchi, sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı gibi farklı değişkenler üzerinde en iyi ürün kalitesini elde etmek amacıyla çalışmalar gerçekleştirmiştir (T. İç ve ark., 2016). Şekil 1'de süreç ya da sistem tasarımına ait genel gösterim verilmiştir.



Şekil 1:

Sistem/Süreç Genel Gösterimi (Gökçe ve Taşgetiren, 2009; Hamzaçebi ve Kutay, 2003; Khan ve Sahai, 2012; Taylan, 2009)

Taguchi'nin kalite sisteminde iki farklı kalite kontrol türü bulunmaktadır. Bunlardan ilki, Off-Line kalite kontrol olarak adlandırılmaktadır. Off-Line kalite kontrolde üretim başlamadan önce ürün ve süreç üzerinde yapılan geliştirmeler ön plana çıkmaktadır. On-Line kalite kontrol sisteminde ise artık ürünün imal edilme süreci ve imal edildikten sonraki süreçler önem kazanmaktadır. Buna örnek olarak ürünün servis işlemleri gösterilebilmektedir (Şirvancı, 1997).

Taguchi Optimizasyon metodu birçok alandan kullanılmaktadır. Bu alanlardan biri, 1953 yılında Japonya da bir seramik üretim fabrikasında görülebilmektedir. Seramiklerde ısı değişimlere bağlı olarak meydana gelen boyutsal farklılıklar, çözülmesi gereken bir sorun olarak görülmüştür. Bu durumda farklı ısı şartlarında seramik üretiminin gerçekleştirilmesi çok yüksek maliyetler meydana getirmiştir. Bu duruma karşın seramik içerisindeki malzeme oranları üzerinde değişiklik yapacak bir metod uygulamışlardır. Böylece, boyut sorunu üzerinde etkili bir çözüm bulmuşlardır. Burada asıl önemli noktanın, imalat süreçleri içerisinde yapılan değişikliklerin çok daha maliyetli ve uzun zaman aldığına anlaşılması ve süreç üzerinde yani parametre tasarımının daha uygun maliyetli olduğunun anlaşılması olmuştur (Kackar, 1985). Bununla birlikte, uygulamadaki değişken sayılarından dolayı gerçekleştirilmesi gereken deney sayıları da artış göstermektedir.

Taguchi deneysel tasarım işleminde ilk olarak en basit olan iki düzeyli deneyler ön plana çıkmaktadır. Birden çok faktörün 2'li düzeylerinin kullanılması ile çok sayıda değişkenin aynı anda incelenmesi mümkün olmaktadır. Bu deney düzenekleri L8, L16, L32, L_n şeklinde ifade edilmektedir. Burada L8, L16 ya da L32 ile Taguchi tekniğinin uygulama metodolojisi gösterilmektedir. Taguchi optimum olarak ayarlanmış kontrol parametreleri ile gerçekleştirilen deneyleri ortogonal dizin (L8, L16, L32, ..., L_n) ile ifade etmektedir. Bu ortogonal dizilere bağlı olarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen veriler ile sinyal gürültü oranı olarak adlandırdığı (S/N) fonksiyonu kullanarak, parametrelerin önem seviyelerini saptamaktadır (Khan ve Sahai, 2012).

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler analiz edildiğinde, Taguchi yönteminde ilk karar mekanizmasını oluşturan S/N grafikleri/tablolari elde edilmektedir. Buradaki S/N ifadesindeki S=Signal ve N=Noise anlamına gelmektedir. S/N oranındaki

değişimlere göre, elde edilen sonuçların yorumlanması yapılmaktadır. Temelde 3 adet S/N oranına göre gerçekleştirilen etkileşim yorumu bulunmaktadır. Bunlardan şu şekilde sıralanabilir;

En büyük en iyi: Elde edilen S/N oranına göre sonuç değişkeninde istenen en büyük değer elde edilmesi tercih ediliyorsa en büyük en iyi denklemi seçilmektedir. Örnek olarak bir tornalama işleminde takım ömrünün hesaplanmasında, takım ömrü değerinin en yüksek çıkması istendiği durum, en büyük en iyi S/N oranının seçimini gerekli kılmaktadır. Eş.2'de en büyük en iyi S/N oranı formülü verilmiştir (T. İç ve ark., 2016; Y. T. İç ve Yıldırım, 2012).

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

En küçük en iyi: Elde edilen S/N oranına göre sonuç değişkeninde istenen en küçük değer elde edilmesi tercih ediliyorsa en küçük en iyi denklemi seçilmektedir. Örnek olarak bir delik delme işleminde, delik yüzey pürüzlülüğünün en küçük değerde olması en iyi sonuç olarak kabul ediliyorsa, en küçük en iyi S/N oranı seçimi yapılmalıdır. Eş.3'te en küçük en iyi S/N oranı formülü verilmiştir.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

Hedef değer en iyi: Elde edilen S/N oranına göre sonuç değişkeninde istenen nominal değer elde edilmesi tercih ediliyorsa hedef değer en iyi denklemi seçilmektedir. Örnek olarak bir frezeleme ya da delme işleminde, iş parçasının ölçü tamlığı 35mm olarak hedeflenmiş ise (toleranslar doğrultusunda) değişkenlere göre elde edilecek olan 34,95mm ya da 35,05mm ölçüleri en iyi sonuçlar olarak değerlendirilebilecektir. Bu durumda hedef değer en iyi S/N oranı seçimi yapılmalıdır. Eş.4'te hedef değer en iyi S/N oranı formülü verilmiştir.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad (4)$$

Belirtilen formüllerde kullanılan y_i = i.gözlem değerini, n=deneysel sayısını, \bar{y} = ortalama değeri, S^2 = varyans'ı ifade etmektedir. Eş.5'te ve Eş.6'da sırasıyla \bar{y} 'nin, ve S^2 'e ait formüller belirtilmiştir.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (5)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (6)$$

Bunların neticesinde Taguchi'nin geliştirmiş olduğu deney tasarım yöntemi, imalata etki eden farklı faktörlerin farklı seviyelerinin arasında bulunan ilişkiyi optimum seviyede elde etmek adına çok verimli bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Gökçe ve Taşgetiren, 2009). Elde edilen S/N grafiklerinde her faktör içerisinde elde edilen en büyük S/N değeri, optimum faktör seviyesini ifade etmektedir (Şavaşkan ve Taptık, 2004). Böylece, deneysel çalışmada kullanılan faktörlerin hangi seviyesinde en optimum değer olduğu ve istenen sonuca ulaşmak için hangi faktör ve seviyelerinin kullanılması gerektiği sonucu elde edilebilmektedir.

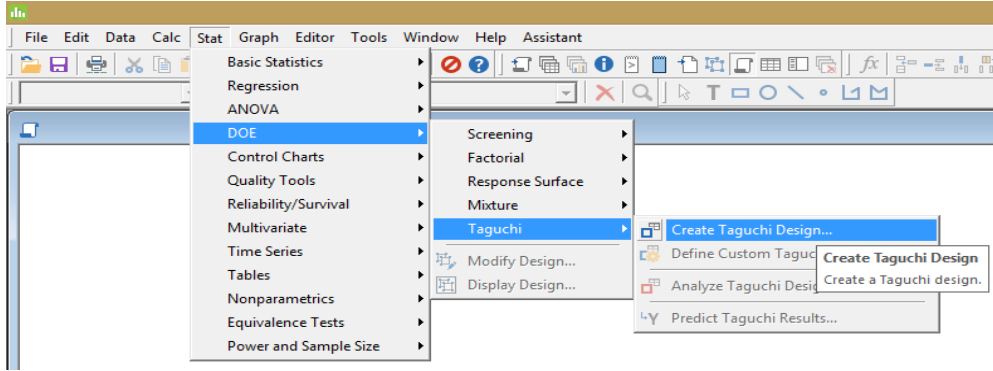
4. İMALATTA DENEY TASARIMI VE TAGUCHİ OPTİMİZASYON METODU

Birçok uygulama alanı olmasına karşın makine imalat sektöründe Taguchi optimizasyon metodu ile deney tasarımlarının uygulanması, günümüz toplam kalite şartlarında kaçınılmaz bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple, bir milin tornalanmasından, en basit delik delme işlemine kadar her türlü imalat sürecinde, işleme etki eden faktörler göz önünde bulundurularak, en iyi sonuçlar en düşük maliyet ve en yüksek kalite ile elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu bağlamda, Nalbant ve diğerleri (Nalbant ve ark., 2007) tornalamada kesme parametrelerinin belirli bir kombinasyonu ile optimum yüzey pürüzlülüğü değerinin belirlenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında AISI 1030 çeliğini P-20 derece TiN kaplamalı bir takım ile işlemişlerdir. Deney tasarımlarında 3 faktör ve her bir faktör için 3 seviye belirlemişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları bu faktörler kesici takım uç radyüsü (mm), kesme derinliği (mm) ve ilerleme değerini (mm/dev) olmak üzere, faktör ve seviyeleri Tablo 1’de belirtilmiştir.

Tablo 1. AISI 1030 Tornalama faktör ve seviye değerleri

Sembol	Kesme parametresi	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Uç radyüsü (mm)	0,4	0,8	1,2
B	Kesme derinliği (mm)	0,5	1,5	2,5
C	İlerleme değeri (mm/dev)	0,15	0,25	0,35

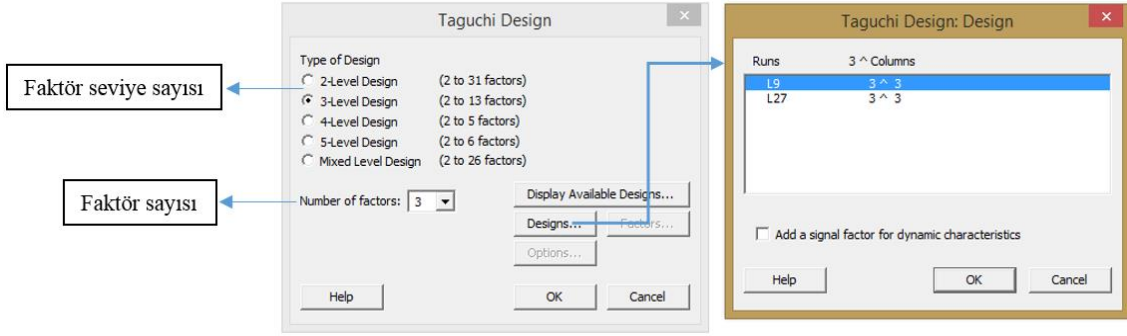
Deneyisel çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için verilerin Minitab programına girilmesi ve hangi deneylerin yapılacağına saptanması gerekmektedir. Şekil 2’de faktörlerin ve faktörlere ait seviyelerin Minitab programına girilmesi ile Taguchi deney tasarımının oluşturulma aşamaları görülmektedir. Minitab uygulaması üzerinden sırasıyla Stat→DOE→Taguchi ve son olarak Create Taguchi Design sekmesine tıklanarak deney tasarımı sayfasına giriş yapılmaktadır.



Şekil 2:

Minitab programında Taguchi Deney tasarımı oluşturma

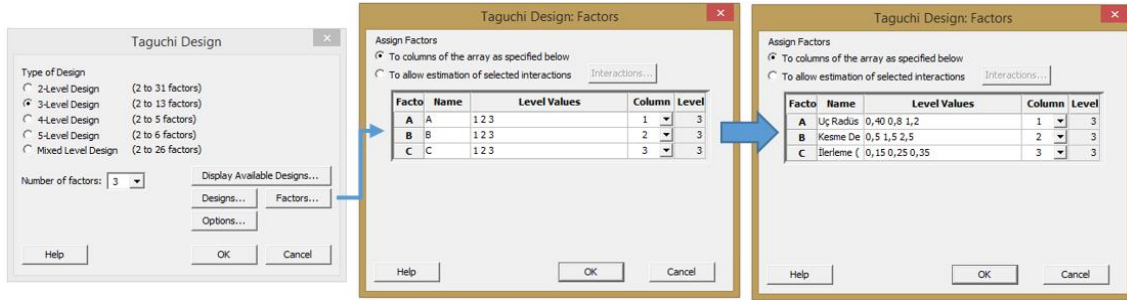
Ardından Şekil 3’te belirtilen Taguchi Tasarımına ait faktör ve seviyelerin belirlendiği pencere karşımıza gelmektedir. Burada deneysel çalışmamızı oluşturan faktör sayıları ve faktörlerin seviyeleri seçildikten sonra Design sekmesine tıklanarak, gerçekleştirilmek istenen deney tasarımı seçilmektedir. Örnekteki verilerimiz doğrultusunda parametrelere uygun olarak L9 Taguchi ortogonal dizisi kullanılmıştır. Normal şartlarda tam faktöriyel bir deney tasarımı kullanılması durumunda L27 yani, $3^3 = 27$ adet deney uygulanması gerekecektir. Ancak, kesirli deney tasarımı ve Taguchi L9 ortogonal dizisinin kullanımı ile deney sayısı 9’a düşürülerek çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 3:

Faktör ve seviyelerin belirlenmesi

L9 deney tasarımının seçilerek OK butonuna basılmasının ardından, daha önce aktif olmayan Factor ve Options butonları da aktif hale gelmektedir. Ardından, Factors butonuna basılması ile birlikte Şekil 4’de görünen “Taguchi Design: Factors” penceresi açılmaktadır. Burada, daha önce belirtildiği gibi A, B, C şeklinde büyük harfler ile görülen değişkenler faktörleri belirtmektedir. Yan sütunda görülen “Level Values” sekmesi ise bu faktörlere ait seviyeleri belirtmektedir. Buradaki A, B ve C kısımlarına sırasıyla faktörleri tanımlayan Uç Radyüsü, Kesme Derinliği ve İlerleme değeri yazılarak, ardından bu faktörlere ait seviyeler sütununa geçiş yapılmaktadır. Burada da faktörlerin seviyeleri yazılarak OK butonuna basılmasının ardından deney tasarımının elde edilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 4:

Faktör ve seviyelerin Minitab’a girişi

Faktör ve seviye girişlerinin ardından Şekil 5.a’da gerçekleştirilmesi gereken deney tasarımı oluşmaktadır. Bu doğrultuda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 5.b’de belirtildiği üzere, C4 ile isimlendirilmiş olan yan sütuna girilmektedir.

#	C1	C2	C3	C4	#	C1	C2	C3	C4
	Uç Radyüsü (mm)	Kesme Derinliği (mm)	İlerleme oranı (mm/dev)			Uç Radyüsü (mm)	Kesme Derinliği (mm)	İlerleme oranı (mm/dev)	Ölçülen Yüzey Pürüzlülüğü
1	0,4	0,5	0,15		1	0,4	0,5	0,15	2,170
2	0,4	1,5	0,25		2	0,4	1,5	0,25	6,385
3	0,4	2,5	0,35		3	0,4	2,5	0,35	13,630
4	0,8	0,5	0,25		4	0,8	0,5	0,25	2,435
5	0,8	1,5	0,35		5	0,8	1,5	0,35	5,215
6	0,8	2,5	0,15		6	0,8	2,5	0,15	1,800
7	1,2	0,5	0,35		7	1,2	0,5	0,35	2,535
8	1,2	1,5	0,15		8	1,2	1,5	0,15	0,875
9	1,2	2,5	0,25		9	1,2	2,5	0,25	1,515

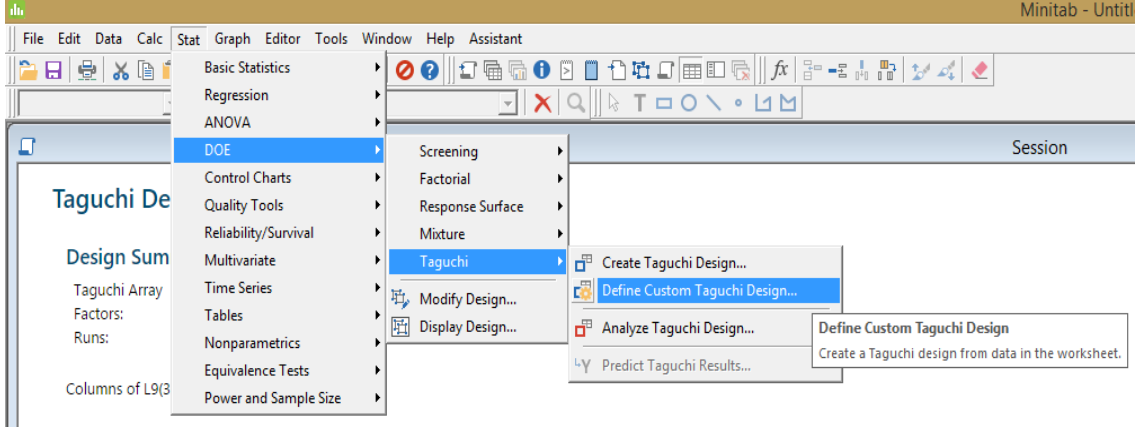
(a)

(b)

Şekil 5:

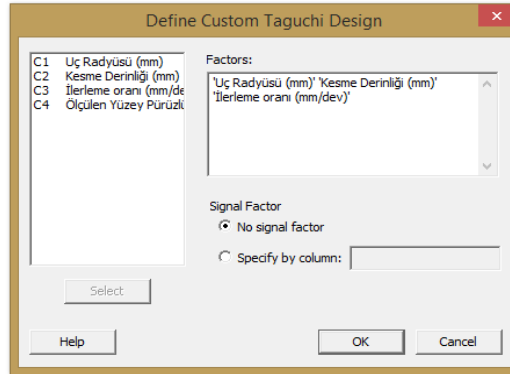
L9 deney tasarımı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri (a) Deney tasarımı (b) Deney sonuçları

Ardından Şekil 6’da gösterildiği üzere, Stat→DOE→Taguchi ve son olarak Define Custom Taguchi Design sekmesine tıklanarak, çalışma sayfasındaki veriler doğrultusunda Taguchi tasarımının tanımlama aşamasına giriş yapılmaktadır.



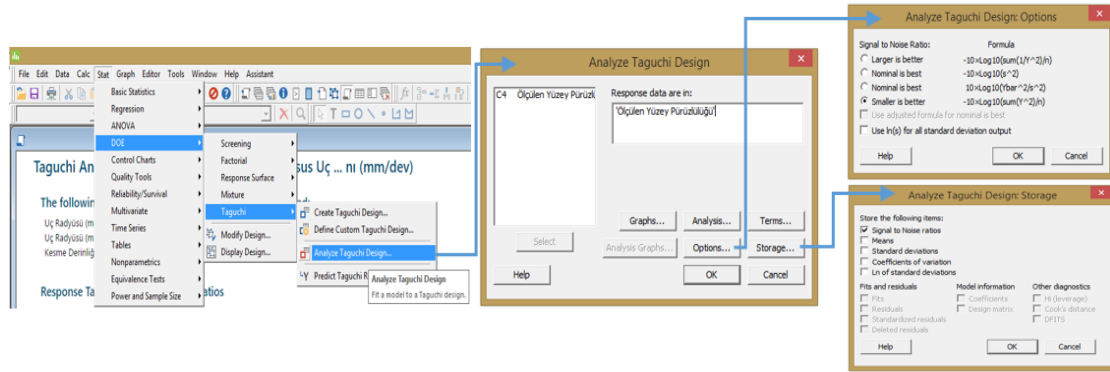
Şekil 6:
Tasarım verilerinin tanımlanması

Bu aşamada Şekil 7’de belirtilen faktör tanımlama penceresi açılmaktadır. Burada sütun numaraları C1, C2 ve C3 ile belirtilen faktörler seçilerek OK butonuna basılmasıyla faktör tanımlama işlemi gerçekleştirilmiş olmaktadır.



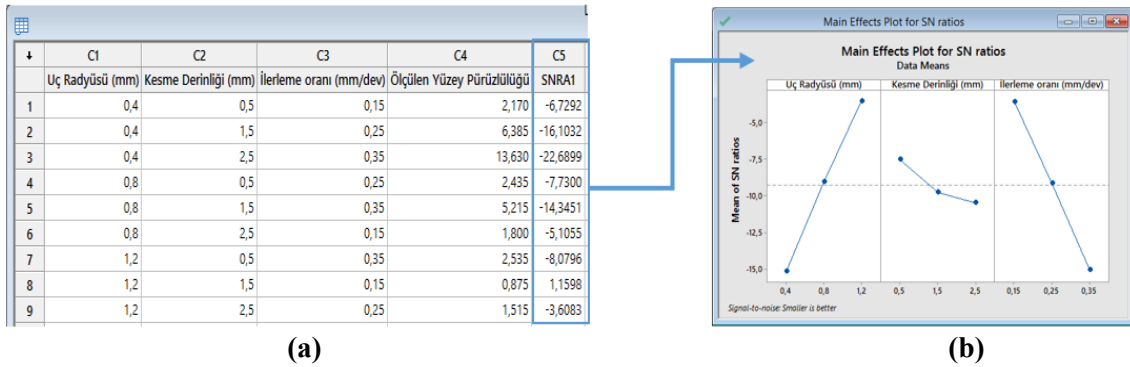
Şekil 7:
Faktörlerin tanımlanması

Faktör tanımlamaları ardından elde edilen deney tasarımına göre gerçekleştirilen deneysel çalışmanın sonucunu oluşturan verilerin girilmesi gerekmektedir. Örnek çalışmada, yüzey pürüzlülüğünde yanıt verisini oluşturmaktadır. Bunun için, Şekil 8’de belirtildiği üzere Stat→DOE→Taguchi ve ardından Analyze Taguchi Design sekmesine tıklanarak gelen pencereden C4 sütununda belirtilen “Ölçülen Yüzey Pürüzlülüğü” değeri seçilir. Çalışmada, elde edilecek yüzey pürüzlülüğünün en düşük seviyede olması hedeflendiğinden dolayı, Options seçeneğinden en küçük en iyi “Smaller is better” seçimi yapılmaktadır. Parametrelerin değerlendirilmesinde S/N (sinyal gürültü) oranı kullanılacağı için, elde edilecek S/N oranlarının çalışma sayfasında yeni bir sütuna yazılması için “Storage” sekmesinden “Signal to Noise Ratios” kutucuğu işaretlenmiştir. Böylece, elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerine göre, uç açısı-kesme derinliği ve ilerleme oranı seviyelerinden hangisinin optimum değerler olduğunu sonucu elde edilebilmektedir.



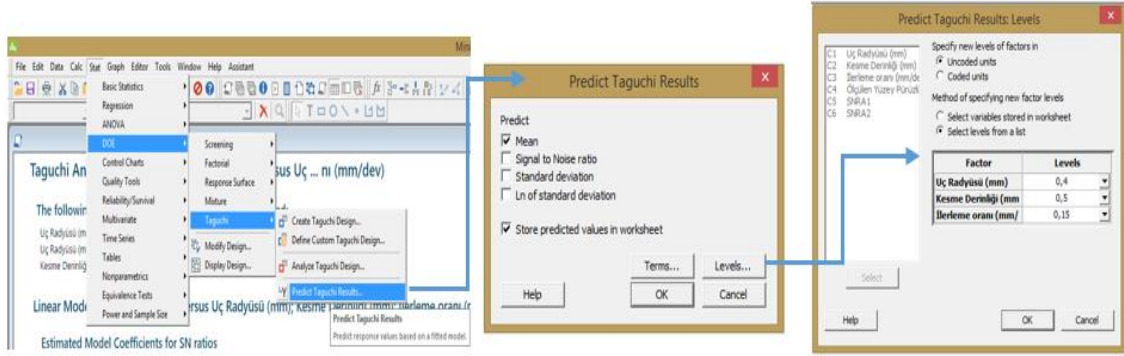
Şekil 8:
Taguchi deney tasarımının analizi.

Deney tasarımı analiz işlemi ardından Şekil 9.a'da C5 sütununda elde edilen S/N oranı değerleri görülmektedir. Şekil 9.b'de ise S/N oranı grafiği verilmiştir. S/N grafiğinde en büyük değeri veren nokta, en optimum seviye olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple uç radyüsü için 1,2mm, kesme derinliği için 0,5mm ve ilerleme değeri olarak 0,15mm/dev seviyeleri (A3B1C1) taguchi optimizasyon metoduna göre en optimum faktör seviyelerini oluşturmuştur. Şekil 4.a'da belirtilen deneysel çalışmalar arasında A3B1C1 deneyi bulunmadığı görülmektedir. Bu durum bize, elde edilen sonuçların gerçekleştirilen deneylerden biri olabileceği gibi, her zaman uygulanan deneyler arasında (A3B1C1) olmayacağını göstermektedir (Meral ve ark., 2011).



Şekil 9:
Deney tasarımı analizi (a) C5 S/N oranı değerleri (b) S/N grafiği

A3B1C1 deneyi L9 ortogonal dizininde bulunmayan bir deney olduğu için bu deneyin ilk olarak Minitab programında tahmini sonuç verecek şekilde gerçekleştirilmesi, ardından doğrulama deneyleri yapılarak, sonucun geçerliliğinin test edilmesi gerekmektedir. Şekil 10'da gösterildiği üzere Stat→DOE→Taguchi ve ardından Predict Taguchi Results sekmesine tıklanarak gelen pencereden Mean kutucuğu aktif edilerek Levels butonuna basılır. Gelen pencereden Factor ve Levels kısmından, yan okların yardımı ile A3B1C1 (Uç radyüsü 0,4mm, kesme derinliği 0,5mm, ilerleme değeri 0,15mm/dev) faktör seviyeleri seçilir.



Şekil 10:

Tahmini Taguchi sonuçlarının belirlenmesi

Ardından OK'e basılarak, eğer deneyler içerisinde A3B1C1 deneyi de bulunmuş olsaydı, bu deney sonucuna göre elde edilecek tahmini bir R_a değeri tarafımıza verilmiş olmaktadır. Meral ve arkadaşlarının (Meral ve ark., 2011) yaptıkları çalışma üzerinden hem tahmini Taguchi hem de Anova işlemlerini örneklendirecek olursak ilk olarak Tablo 2'de belirtilen faktör ve seviyelerin Minitab programına Şekil 3 ve Şekil 4'de belirtildiği üzere girilmesi gerekmektedir. Çalışmada kaplamasız HSS matkaplar ve TiN kaplamalı HSS matkaplar ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda F kuvveti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerine matkap çapı, kesme hızı ve ilerleme değerinin etkilerini incelenmişlerdir.

Tablo 2. Deney tasarımı faktör ve seviyeleri

Sembol	Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Matkap Çapı (mm)	6	8	10
B	Kesme Hızı (m/dak)	20	30	40
C	İlerleme (mm/dev)	0,05	0,10	0,15

L9 Deney tasarımındaki deneyler gerçekleştirilerek, deneylerin sonuçları Şekil 11'de belirtildiği gibi C4-C5-C6-C7 sütunlarına girilmektedir.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	Matkap Çapı	Kesme Hızı	İlerleme	Kaplamasız F	Kaplamasız Ra	TiN F	TiN Ra
1	6	20	0,05	548	1,876	329	1,745
2	6	30	0,10	884	1,962	512	1,824
3	6	40	0,15	1391	1,944	889	1,822
4	8	20	0,10	1118	2,243	905	1,924
5	8	30	0,15	1350	2,192	1070	1,914
6	8	40	0,05	786	1,912	509	1,704
7	10	20	0,15	1770	2,358	1458	2,289
8	10	30	0,05	943	2,188	857	1,972
9	10	40	0,10	1566	2,104	1083	1,963

Şekil 11:

Deney sonuçlarının girilmesi

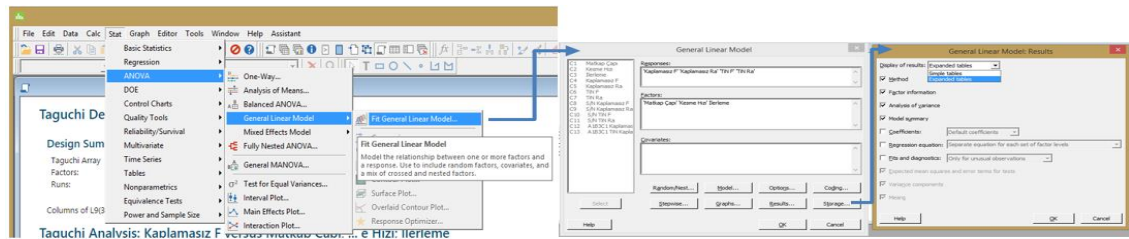
Deney sonuçlarına göre Şekil 8'de belirtilen aşamalar gerçekleştirilerek S/N oranları hesaplandığında, kesme kuvvetleri için A1B1C1, yüzey pürüzlülüğü değerleri için ise A1B3C1'i optimum faktör seviyeleri olarak elde etmişlerdir. Bundan sonraki aşamada, A1B1C1 mevcut deneylerde bulunması sebebiyle doğrudan deney sonucuna ulaşmak mümkün olmuştur. Ancak A1B3C1 seviyesindeki deney gerçekleştirilmemiş bir deneydir. Bu sebeple ilk olarak kaplamasız

matkap Ra değerine ait S/N gürültü oranının belirlenmesi gerekmektedir. Ardından Şekil 10’da belirtildiği üzere Factor ve Levels kutucuklarına A1B3C1 (matkap çapı 6mm, kesme hızı 0,15m/dak, ilerleme 0,05mm/dev) değerleri seçilerek OK’e basılarak onaylanmalıdır. Böylece kaplamasız matkap ile elde edilecek olan R_a değerine ait olan tahmini Taguchi sonucu elde edilmiş olacaktır. Ardından kaplamalı matkap Ra değerine ait S/N gürültü oranının belirlenmesi ve sonrasında yine Şekil 10’a uygun olarak Factor ve Levels kutucuklarına A1B3C1 değerleri seçilerek kaplamalı matkap R_a için tahmini Taguchi değerinin belirlenmesi sağlanmalıdır. Bir sonraki işlem olarak gerçekleştirilecek doğrulama deneyleri ile tahmini Taguchi değeri arasındaki tutarlılık karşılaştırılacaktır. Tahmini Taguchi değerleri Şekil 12’de C12 ve C13 sütunlarında gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde Meral ve arkadaşlarının elde ettiği veriler ile aynı oldukları görülebilmektedir.

Worksheet 1 ***													
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
	Matkap Çapı	Kesme Hızı	İlerleme	Kaplamasız F	Kaplamasız Ra	TiN F	TiN Ra	S/N Kaplamasız F	S/N Kaplamasız Ra	S/N TiN F	S/N TiN Ra	A1B3C1 Kaplamasız Matkap Ra	A1B3C1 TiN Kaplamalı Matkap Ra
1	6	20	0,05	548	1,876	329	1,745	-54,7756	-5,46466	-50,3439	-4,83591	1,733	1,621
2	6	30	0,10	884	1,962	512	1,824	-58,9290	-5,85398	-54,1854	-5,22050		
3	6	40	0,15	1391	1,944	889	1,822	-62,8665	-5,77393	-58,9780	-5,21097		
4	8	20	0,10	1118	2,243	905	1,924	-60,9688	-7,01659	-59,1330	-5,68410		
5	8	30	0,15	1350	2,192	1070	1,914	-62,6067	-6,81681	-60,5877	-5,63884		
6	8	40	0,05	786	1,912	509	1,704	-57,9085	-5,62976	-54,1344	-4,62939		
7	10	20	0,15	1770	2,358	1458	2,289	-64,9595	-7,45088	-63,2752	-7,19292		
8	10	30	0,05	943	2,188	857	1,972	-59,4902	-6,80095	-58,6596	-5,89814		
9	10	40	0,10	1566	2,104	1083	1,963	-63,8958	-6,46091	-60,6926	-5,85841		

Şekil 12:
Tahmini Taguchi değeri

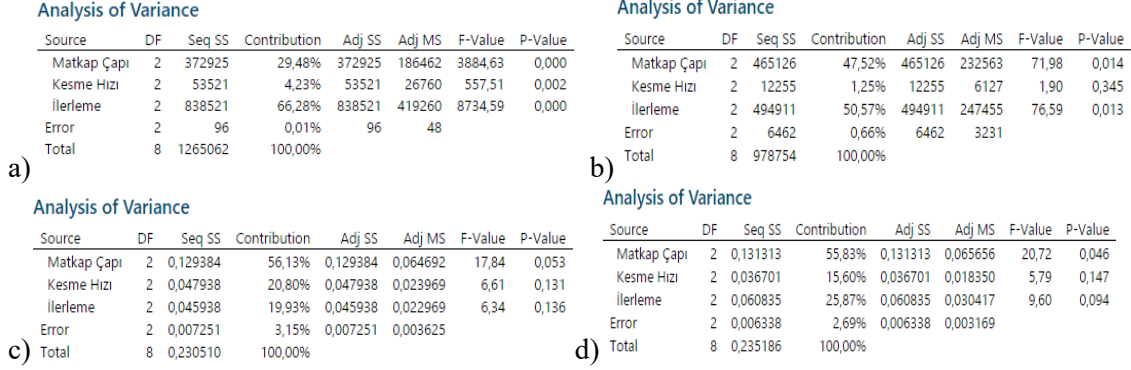
Tahmini taguchi değerlerinin ardından gerçekleştirdikleri doğrulama deneylerinde, A1B3C1 seviyesinde delik yüzey pürüzlülüğü değerlerini kaplamasız matkapta $R_a=1,722\mu$, TiN kaplamalı matkapta $R_a=1,686\mu$ olarak ölçmüşlerdir. Çıkan sonuçları tahmini Taguchi değerleri ile kıyasladıklarında gerçekleştirilen deney tasarımının güvenilir olduğunu ortaya koymuşlardır. Bir sonraki aşamada deney tasarımındaki faktörlerden hangisinin F_z kuvveti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü R_a üzerinde en etkili faktör olduğunun tespitine geçilmiştir. Bunun için Şekil 13’te belirtildiği üzere Stat→ANOVA→General Linear Model son olarak Fit General Linear Model sekmesine tıklanarak ANOVA penceresi açılmaktadır. Açılan pencerede Responses kısmına, etkilenen değişkenler seçilmektedir. Bu çalışma için “Kaplamasız F, Kaplamasız R_a , TiN F, TiN R_a ” ile belirtilen değerler, deneysel çalışma sonucunda etkilenen verileri oluşturmaktadır. Ardından, Factors kısmına çalışmadaki faktörler eklenmektedir. Bir sonraki aşamada standart olarak %95 güven aralığında gerçekleştirilecek olan ANOVA için Storage butonuna basılarak Expanden Tables sekmesi aktif edilmelidir. Böylece faktörlerin yüzdelik olarak etkileri görülebilmektedir. Gerekli veri girişlerinin yapılmasının ardından OK butonuna basılarak ANOVA işleminin gerçekleşmesi sağlanmaktadır.



Şekil 13:
Deney verilerinin Anova ile etki seviyelerinin belirlenmesi

Varyans analizi işleminin onaylanmasının ardından Minitab ekranında Şekil 14’de belirtilen değerler oluşmaktadır. Şekil 14-a,b,c,d,e’de sırasıyla kaplamasız matkap F, kaplamalı matkap F,

kaplamasız matkap R_a ve kaplamalı matkap R_a değerlerine göre elde edilen varyans analizleri verilmiştir. Değerler incelendiğinde Meral ve arkadaşlarının çalışmasındaki değerler ile aynı oldukları görülebilmektedir.

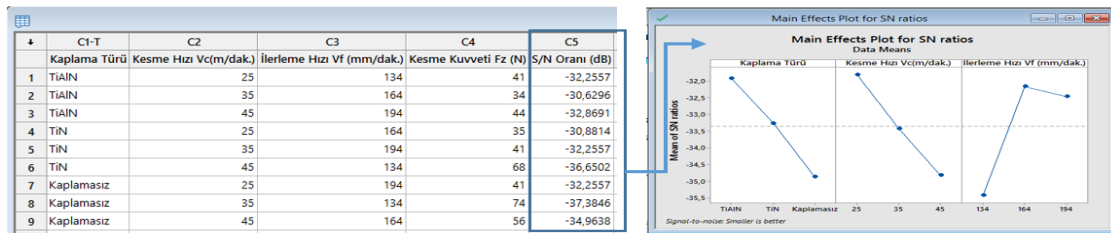


Şekil 14:

Varyans analizleri (a) kaplamasız matkap F (b) kaplamalı matkap F (c) kaplamasız matkap R_a (d) kaplamalı matkap R_a

Şekil 14'teki varyans analizleri incelendiğinde kaplamasız matkaplar ile gerçekleştirilen deneysel çalışmada F kuvveti üzerine en etkili parametrenin %66,28 ile ilerleme değeri olduğu, kaplamalı matkaplarda ise %50,57 ile yine ilerleme değerinin en önemli parametre olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlüğü üzerine yapılan varyans analizlerinde, kaplamasız matkapta %56,13 kaplamalı matkapta %55,83 ile matkap çapının en etkili parametre olduğu görülmüştür.

Bir diğer çalışmada Savaşkan ve diğerleri kaplamasız, TiAlN ve TiN kaplamalı matkaplar kullanarak, 25-35-45 m/dak kesme hızı ve 134-164-194 mm/dak ilerleme değerinin F_z kuvveti üzerine etkilerini inceleyerek optimum faktör seviyelerini elde etmek için Taguchi L9 ortogonal diziliminde deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Oluşan kesme kuvvetlerinin ölçümünü gerçekleştirerek, en düşük kesme kuvveti oluşumu sergileyen seviyelerin en optimum veriler olacağını belirlemişlerdir. Bu bağlamda, en küçük en iyi yaklaşımını kullanmışlardır. Belirtilen faktör ve seviyeleri Minitab programına girildiğinde, Şekil 15'deki C1-C2-C3 sütunları karşımıza çıkmaktadır. Belirtilen tasarıma göre gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen kesme kuvveti değerleri C4 sütununa girilmiştir ve ardından en küçük en iyi yaklaşımı seçilerek Taguchi analizi yapıldığında C5 ile belirtilen sütundaki veriler elde edilmiştir. Veriler doğrultusunda elde edilen S/N grafiği incelendiğinde A1B1C2'nin optimum faktör seviyeleri olduğu görülmüştür. Belirtilen deneylerin gerçekleştirilmesi sonucunda oluşan kesme kuvvetleri neticesinde elde edilen S/N oranlarının Savaşkan ve arkadaşlarının elde ettikleri veriler ile aynı olduğu görülmektedir (Şavaşkan ve Taptık, 2004).



Şekil 15:

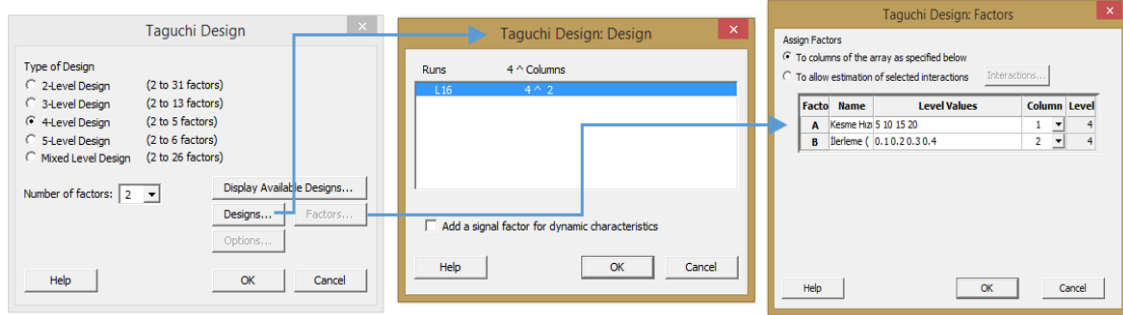
Deney tasarımı ve S/N oranlar

Kilickap GFRP (Glass Fiber Reinforced Polimer) malzemenin delinmesi esnasında meydana gelen delaminasyon üzerine kesme parametrelerinin optimizasyonunu Taguchi yöntemini kullanarak gerçekleştirmiştir. Kesme hızı ve ilerleme faktörlerinin Tablo 3'te görüldüğü üzere 4 farklı seviyesinde çalışmışlardır.

Tablo 3. Faktör ve seviye değerleri

Sembol	Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
A	Kesme Hızı (m/dak)	5	10	15	20
B	İlerleme (mm/dev)	0,1	0,2	0,3	0,4

Tablo 3'te de görüleceği üzere, tüm çalışmalarda faktör ve seviyeleri aynı sayıda olmayabilmektedir. Yukarıdaki örneklerde 3'er faktör ve bu faktörlere ait 3'er adet seviye olduğu görülebilmektedir. Bu sebeple her iki deneysel çalışma da tam faktöriyel olarak L27, kesirli olarak ise sadece L9 ortogonal dizinine uygun olarak gerçekleştirilebilmektedir. Kilickap'ın (Kilickap, 2010) gerçekleştirdiği çalışmada ise, 2 faktör ve her faktör için 4 seviye bulunmaktadır. Burada Şekil 16'da belirtilen Taguchi tasarımı oluşturulduğunda gerçekleştirilecek deney sayısı $2^4 = 16$ olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 16:

2 Faktör 4 seviye Taguchi deney tasarımı dizaynı

Deney tasarımını matkap uç açısı 118° ve 135° olan matkaplarda gerçekleştirerek, delik giriş ve çıkışlarında elde ettikleri delaminasyon oranlarını hesaplamışlardır. Ardından, en küçük en iyi yaklaşımını kullanarak deney sonuçlarına göre Şekil 17'de belirtilen S/N oranlarını elde etmişlerdir. C7-C8-C9-C10 sütunlarında elde edilen verilerin, Kilickap'ın elde ettiği veriler ile aynı olduğu görülmektedir.

	C1	C2-T	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	Kesme Hızı (m/min)	İlerleme (mm/rev)	Uç açısı 118 Delik Giriş	Uç açısı 118 Delik Çıkış	Uç açısı 135 Delik Giriş	Uç açısı 135 Delik Çıkış	S/N 118 Giriş	S/N 118 Çıkış	S/N 135 Giriş	S/N 135 Çıkış
1	5 0.1	1.20	1.20	1.35	1.11	1.21	-1.58	-2.61	-0.91	-1.66
2	5 0.2	1.23	1.42	1.20	1.33	1.33	-1.80	-3.05	-1.58	-2.48
3	5 0.3	1.33	1.53	1.33	1.35	1.35	-2.48	-3.69	-2.48	-2.61
4	5 0.4	1.44	1.62	1.35	1.50	1.50	-3.17	-4.19	-2.61	-3.52
5	10 0.1	1.21	1.45	1.22	1.40	1.40	-1.66	-3.23	-1.73	-2.92
6	10 0.2	1.23	1.42	1.44	1.35	1.35	-1.80	-3.05	-3.17	-2.61
7	10 0.3	1.42	1.70	1.48	1.40	1.40	-3.05	-4.61	-3.41	-2.92
8	10 0.4	1.49	1.67	1.54	1.48	1.48	-3.46	-4.45	-3.75	-3.41
9	15 0.1	1.22	1.56	1.27	1.50	1.50	-1.73	-3.86	-2.08	-3.52
10	15 0.2	1.27	1.55	1.48	1.60	1.60	-2.08	-3.81	-3.41	-4.08
11	15 0.3	1.43	1.73	1.55	1.61	1.61	-3.11	-4.76	-3.81	-4.14
12	15 0.4	1.50	1.74	1.56	1.68	1.68	-3.52	-4.81	-3.86	-4.51
13	20 0.1	1.24	1.56	1.30	1.70	1.70	-1.87	-3.86	-2.28	-4.61
14	20 0.2	1.29	1.70	1.50	1.73	1.73	-2.21	-4.61	-3.52	-4.76
15	20 0.3	1.49	1.80	1.52	1.78	1.78	-3.46	-5.11	-3.64	-5.01
16	20 0.4	1.52	1.87	1.68	1.80	1.80	-3.64	-5.44	-4.51	-5.11

Şekil 17:

Deney tasarımı ve S/N oranı değerleri

Delik giriş ve çıkışlarında meydana gelen delaminasyonlar, S/N tablolarından değerlendirildiğinde, optimum faktör seviyelerinin A1B1 (Kesme hızı 5 m/dak, ilerleme 0,1 mm/dev) olduğu görülmüştür. Şekil 18’de 118° uç açılı matkapta delik çıkışında meydana gelen delaminasyon oranı kesme hızı ve ilerlemeye göre ANOVA ile incelendiğinde, ilerleme değerinin %52,64, kesme hızı değerinin ise %42,42 oranında etkili olduğu görülmüştür.

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Kesme Hızı (m/min)	3	0,14202	42,42%	0,14202	0,047340	25,73	0,000
İlerleme (mm/rev)	3	0,17622	52,64%	0,17622	0,058740	31,93	0,000
Error	9	0,01656	4,95%	0,01656	0,001840		
Total	15	0,33479	100,00%				

Şekil 18:

118° uç açılı matkapta ANOVA sonuçları

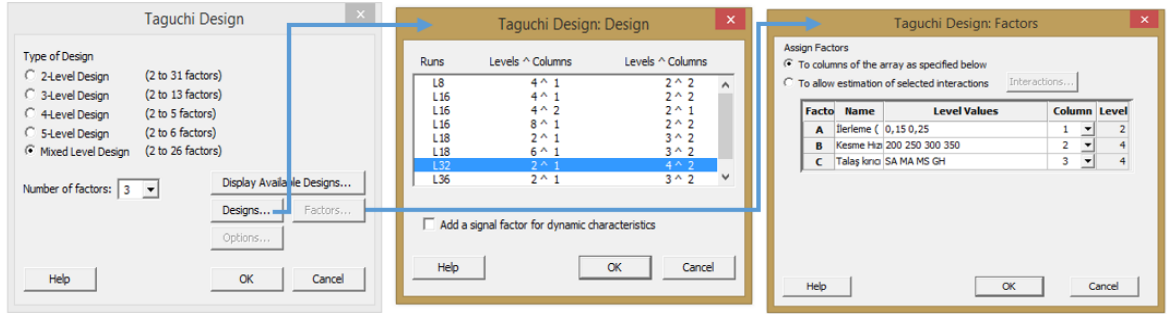
ANOVA işlemi 118° uç açılı matkapta delik girişi, 135° uç açılı matkapta delik girişi ve delik çıkışı delaminasyon değerleri için de gerçekleştirildiğinde, kesme hızı ya da ilerlemenin delaminasyon üzerinde ne derece etkili oldukları da ayrı ayrı görülebilmektedir (Kilickap, 2010).

Tekaüt ve arkadaşları (Tekaüt ve ark., 2011) AISI 1050 malzemenin tornalanmasında dört farklı kesme hızı, iki farklı ilerleme değeri ve dört farklı talaş kırıcı formu ile L32 Taguchi (Mixed Level Design) karma seviye tasarımı kullanarak, değişkenlerin kesme kuvveti üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada diğerlerinden farklı olarak Tablo 4’de de görüleceği üzere, faktörlerin eşit sayıda seviyelere sahip olmadıkları görülmektedir.

Tablo 4. Faktör ve seviyeler

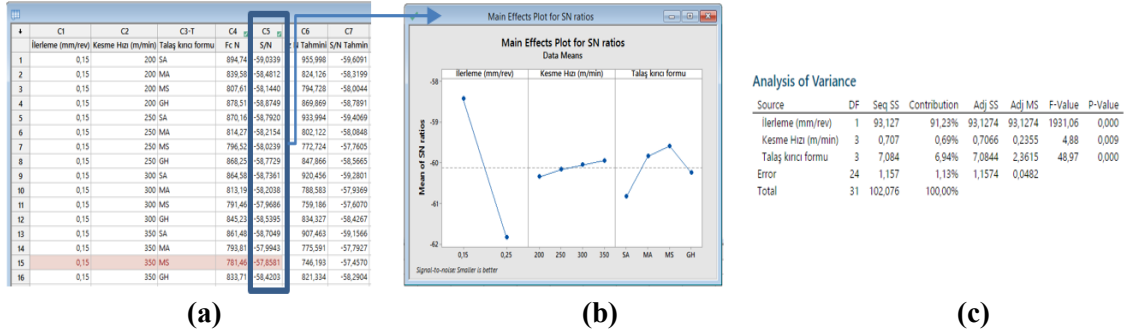
Sembol	Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
A	İlerleme (mm/dev)	0,15	0,25	-----	-----
B	Kesme hızı (m/dak)	200	250	300	350
C	Talaş kırıcı formu	SA	MA	MS	GH

Faktörlerin farklı sayıda seviyelere eşit oldukları durumda, standart deney düzenleri kullanılamamaktadır. Bu sebeple her faktörün seviyelerine uygun olarak Minitab programında Şekil 18’de belirtildiği üzere tanımlanması gerekmektedir. Şekil 19’dan anlaşılacağı üzere, faktör sayısı seçildikten sonra “Mixed Level Design” butonuna basılarak, açılan Design penceresinden deneysel çalışma faktör ve seviyelerine uygun olarak L32 deney tasarımı modeli seçilmiştir. L32’ye karşılık gelen satırda bulunan 2^1 ve 4^2 ifadeleri, $n = a^k$ formülündeki a^k ’yi ifade etmektedir. Burada 2^1 ile 1 faktörün (İlerleme) 2 seviyesinin (0,15 mm/dev - 0,25 mm/dev) bulunduğu, 4^2 ile de 2 faktörün (Kesme Hızı), Talaş kırıcı formu) 4’er seviyesinin (200 m/dak, 250 m/dak, 300 m/dak, 350 m/dak / SA, MA, MS, GH) bulunduğu ifade edilmektedir.



Şekil 19:
Taguchi karma veri girişi

Belirtildiği şekilde deney tasarımı oluşturularak faktörler ve seviyelerin Minitab'a girilmesinin ardından deney düzeneği Şekil 20'de görüldüğü üzere C1-C2-C3 sütunlarında oluşacaktır. Ardından C4 sütununa deneyler sonucunda elde edilen F_c kuvvetlerini girilmiştir. Kuvvet değerleri için en küçük en iyi yaklaşımına göre gerçekleştirilen S/N oranları hesaplaması C5 sütununda, C6 sütununda tahmini Taguchi F_c değerleri ve C7 sütununda tahmini Taguchi F_c değerlerine göre elde edilen S/N oranları verilmiştir. S/N grafiği incelendiğinde optimum kesme kuvveti sonucunun A1B4C3 faktör seviyelerinin seçimi ile elde edileceği sonucuna varmışlardır. Ardından gerçekleştirilen tahmini Taguchi değerleri ile deneysel sonuç verileri kıyaslandığında, birbiri ile örtüşen sonuçlar verdiği görülmüştür. Son olarak verilerin ANOVA ile değerlendirilmesi ile F_c üzerinde en etkili faktörün %93 ile ilerleme değeri olduğunu saptamışlardır. Minitab'da gerçekleştirilecek bu çalışmanın Tekaüt ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışma ile aynı sonuçları verdiği Şekil 19'da görülebilmektedir.



Şekil 20:
Minitab veri girişi (a) Deney tasarımı (b) S/N grafiği (c) ANOVA sonuçları.

Benzer şekilde yapılan bir çok çalışmaya literatürde rastlanabilmektedir (Günay, 2013, Çakıroğlu ve Acır, 2013, Balajı ve ark., 2016, Kara ve ark., 2017, Basmacı ve ark., 2018, Mia ve ark., 2018, Pathak ve ark., 2018, Kahraman ve ark., 2018, Çiftçi ve Gökçe 2018, Samtaş ve Korucu, 2019, Karatas ve ark., 2020, Kumar ve ark., 2020, Yadu Krishnan ve ark., 2021, Mamedov, 2021, Dutta, S., ve Narala, S. K. R., 2021, Akhtar ve ark., 2021, Aman ve ark., 2023). Yapılan çalışmalar incelendiğinde, Taguchi optimizasyon metodunun imalat mühendisliği alanında 1980'li yıllardan günümüze kadar yoğun bir şekilde kullanıldığı görülebilmektedir. İmalat sürecinde bağımlı ya da bağımsız değişkenlerin, istenen sonuç üzerindeki etkilerinin verimli bir şekilde elde edilebilmesi için DOE (Design of Experiment) yani deney tasarımının ve optimizasyon yönteminin olmazsa olmaz olduğu görülebilmektedir. Kesme faktörlerinin ayrı ayrı ya da etkileşimli olarak sonuçlar üzerindeki etkileri tüm faktör seviyeleri için test etmenin yüksek

maliyetli olması sebebiyle, uygun deney tasarımları ile minimum sayıda deneyin gerçekleştirilmesi ve sonuçların bu doğrultuda yorumlanması hem akademik hem de işletmelerin Ar-Ge birimlerine büyük ekonomik katkı sağlamaktadır. Bu durumlar göz önüne alındığında, Minitab 18 programında faktör ve seviyelerine uygun ortogonal dizinler aracılığıyla deney tasarımları kolaylıkla oluşturulabilmektedir. Ardından, deney tasarımına uygun elde edilen sonuçlar (kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması vb) uygun yaklaşımlar ile işlenerek S/N oranları elde edilmesi ile tablolar/grafikler oluşturulmaktadır. Sonuçlara göre ister gerçekleştirilen deneyler arasında olsun ister gerçekleştirilen deneyler arasında olmasın optimum faktör seviyeleri elde edilebilmektedir. Gerçekleştirilen tahmini Taguchi yaklaşımı ile teorik deney sonuçları ve teorik S/N oranları elde edilerek, gerçek deney sonuçları ile karşılaştırılabilmektedir. Böylece teorik ve uygulamalı çalışmanın hem geçerliliği hem de güvenilirliği test edilebilmektedir. Ardından, yeniden Minitab üzerinden gerçekleştirilebilecek olan ANOVA işlemi ile imalat sürecini etkileyen faktörlerin deneysel çalışma üzerindeki etki seviyeleri yüzdeler olarak elde edilebilmektedir.

Bu şekilde imalat sürecinin başlıca türleri olan tornalama, delik delme, frezeleme ya da başka alanlarda ister yüzey pürüzlülüğü, ister takım aşınması, ister kesme kuvveti olsun hedeflenen çalışmaya uygun olarak deney tasarımları gerçekleştirilerek optimum faktör seviyeleri bulunabilmektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, Minitab paket programında Taguchi optimizasyon metodunun imalat mühendisliği alanında kullanımı literatürdeki çalışmalar nezdinde örneklendirilerek okuyuculara sunulmuştur. Böylece, öncelikle yeni araştırmacılara Taguchi optimizasyon metodunun uygulanışı ve Minitab programındaki kullanımına yönelik bir rehber oluşturulmuştur. İncelenen ve örnek olarak sunulan çalışmalar değerlendirildiğinde;

- Deney tasarımı ve Taguchi optimizasyon metodunun imalat mühendisliği alanında yoğun olarak kullanıldığı,
- İster aynı faktör ve seviye sayısına sahip isterse farklı faktör ve parametre seviyelerine sahip bir araştırma olsun, deneysel verilerin Minitab programı aracılığıyla kolay bir şekilde Taguchi optimizasyon metoduna uygulanabildiği,
- Taguchi yönteminin imalat mühendisliği alanında kullanılmakta olan (kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği, kesici takım uç radyüsü vb.) işleme parametrelerinin seviyelerinin optimizasyonu için basit, sistematik ve verimli bir metodoloji olduğu,
- Taguchi optimizasyon metodunun imalat mühendisliği alanında verimlilik, zaman tasarrufu, ürün kalitesi ve uygulanabilirlik açısından çok büyük bir öneme sahip olduğu
- ANOVA işlemlerinin de Minitab programında verimli bir şekilde gerçekleştirilebileceği ve böylece işlem üzerindeki parametrelerin etki seviyelerinin saptanabileceği görülmüştür.

Bundan sonraki çalışmalarda, regresyon analizleri ve üç boyutlu grafik oluşumları ile çalışma genişletilerek detaylandırılabilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Yazar Erman AYDIN tüm çalışmanın kendisine ait olduğunu onaylamaktadır. Çalışmanın son onay ve tam sorumluluğunu Erman AYDIN üstlenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Akhtar, M. N., Sathis, T., Mohanavel, V., Afzal, A., Arul, K., Ravichandran, M., Rahim, I. A., Alhady, S. S. N., Bakar, E. A., ve Saleh, B. (2021). Optimization of process parameters in cnc turning of aluminum 7075 alloy using 127 array-based taguchi method. *Materials*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/ma14164470>
2. Aman, A., Bhardwaj, R., Gahlot, P., ve Kumar Phanden, R. (2023). Selection of cutting tool for desired surface finish in milling Machine using Taguchi optimization methodology. *Materials Today: Proceedings*, 78, 444-448. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.10.253>
3. Balaji, M., Murthy, B. S. N., ve Rao, N. M. (2016). Optimization of Cutting Parameters in Drilling of AISI 304 Stainless Steel Using Taguchi and ANOVA. *Procedia Technology*, 25, 1106-1113. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.217>
4. Basmacı, G., Kırbaş, İ., Ay, M., ve Peker, M. (2018). Karma Taguchi ve yüzey yanıt yöntemi kullanılarak astm b574 (hastelloy c-22)'in tornalanması esnasındaki işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi ve kesme parametrelerinin optimizasyonu. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 761-771. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.353379>
5. Canıyılmaz, E., ve Kutay, F. (2003). Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(3), 51-63.
6. Çakiroğlu, R., ve Acir, A. (2013). Optimization of cutting parameters on drill bit temperature in drilling by Taguchi method. *Measurement*, 46(9), 3525-3531. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.06.046>
7. Çiftçi, İ., ve Gökçe, H. (2018). Molibden alaşımlarının işlenmesinde kesici takım ve kesme parametrelerinin Taguchi Metodu ile optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2018(2018). <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416482>
8. Dutta, S., ve Kumar Reddy Narala, S. (2021). Optimizing turning parameters in the machining of AM alloy using Taguchi methodology. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108340>
9. Erdem, İ. (2017). *Minitab Uygulamalı İstatistik Yöntemler*. Seçkin Yayıncılık. <https://www.bkmkitap.com/minitab-uygulamali-istatistik-yontemler>
10. Erdem, V., Belevi, M., ve Koçhan, C. (2010). Taguchi Metodu İle Plastik Enjeksiyon Parçalarda Çarpılmanın En Aza İndirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 12(2), 17-29.
11. Gökçe, B., ve Taşgetiren, S. (2009). Kalite İçin Deney Tasarımı. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 71-83. <https://www.researchgate.net/publication/260389787>
12. Günay, M. (2013). AISI 316L Çeliğinin İşlenmesinde Takım Radyüsü Ve Kesme Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28(3), 437-444.
13. Hamzaçebi, Ç., ve Kutay, F. (2003). Taguchi Metodu: Bir Uygulama. *Teknoloji*, 6(3-4), 7-17.

14. İç, T., Duran, H., Keçeci, B., İlik, E., ve Bilgiç, B. (2016). Çok Yanıtlı Taguchi Eniyilemesine Yönelik Bir Bilgisayar Uygulamasının Geliştirilmesi. *Journal of Polytechnic*, 19(3), 311-323. <https://doi.org/10.2339/2016.19.3>
15. İç, Y. T., ve Yıldırım, S. (2012). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Birlikte Taguchi Yöntemini Kullanarak Bir Ürünün Tasarımının Geliştirilmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(2), 447-458.
16. Kackar, R. N. (1985). Off-Line Quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Method. *Journal of Quality Technology*, 17(4), 176-188. <https://doi.org/10.1080/00224065.1985.11978964>
17. Kahraman, F., Başar, G., Koçoğlu, Z., ve Yeniyıl, E. (2018). Delik Büyütme İşleminde Kesme Parametrelerinin Çok Yanıtlı Taguchi Deneysel Tasarım Yaklaşımı Kullanılarak Optimizasyonu. *Journal of Polytechnic*, 21(2), 283-290. <https://doi.org/10.2339/politeknik.385921>
18. Kara, F., Özbek, O., Kam, M., ve Saruhan, H. (2017). AISI 4140 Islah Çeliğinin Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğü Ve Titreşimin Taguchi Metodu İle Optimizasyonu. *INTERNATIONAL ACADEMIC RESEARCH CONGRESS*, 1132-1140. www.inescongress.com
19. Karatas, M. A., Gokkaya, H., ve Nalbant, M. (2020). Optimization of machining parameters for abrasive water jet drilling of carbon fiber-reinforced polymer composite material using Taguchi method. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 92(2), 128-138. <https://doi.org/10.1108/AEAT-11-2018-0282>
20. Khan, K., ve Sahai, R. (2012). An Overview on Taguchi Method. *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*, 1, 11-18. <https://www.researchgate.net/publication/265282800>
21. Kilickap, E. (2010). Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite. *Expert Systems with Applications*, 37(8), 6116-6122. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2010.02.023>
22. Kumar, M. V., Meignanamoorthy, M., Sakthivelu, S., Kumar, S. D., Chanakyan, C., ve Alagarsamy, S. V. (2020). Optimization of material removal rate in CNC turning of AA2024 via Taguchi technique. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1163-1167. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.045>
23. Mamedov, A. (2021). Taguchi Yöntemleri Kullanılarak Frezeleme İşleminde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Araştırılması. *Mühendis ve Makina*, 62(703), 321-331. <https://doi.org/10.46399/muhendismakina>
24. Meral, G., Sarikaya, M., ve Dilipak, H. (2011). *Delme işlemlerinde kesme parametrelerinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu The optimization of cutting of parameters in drilling processes by Taguchi method* (C. 27, Sayı 4).
25. Mia, M., Dey, P. R., Hossain, M. S., Arafat, M. T., Asaduzzaman, M., Shoriat Ullah, M., ve Tareq Zobaer, S. M. (2018). Taguchi S/N based optimization of machining parameters for

- surface roughness, tool wear and material removal rate in hard turning under MQL cutting condition. *Measurement*, 122, 380-391. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.016>
26. Nalbant, M., Gökkaya, H., ve Sur, G. (2007). Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials and Design*, 28(4), 1379-1385. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.01.008>
27. Önal, Ş., Bölümü, E. M., Üniversitesi, A. B., Ankara, T., ve Yazar, S. (2021). Taguchi Metodu Kullanılarak Plastik Enjeksiyon Kalıplama Tekniğiyle Üretilen Parçadaki Çekme Probleminde Etkili Parametrelerin Optimizasyonu. *ANKARA SCIENCE UNIVERSITY, RESEARCHER*, 1(1), 48-56. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/researcher/issue/64182/939978>
28. Pathak, A. D., Warghane, R. S., ve Deokar, S. U. (2018). Optimization of cutting parameters in Dry Turning of AISI A2 Tool Steel using Carbide Tool by Taguchi Based Fuzzy Logics. *Materials Today: Proceedings*, 5, 5082-5090. www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings2214-7853
29. Samtaş, G., ve Korucu, S. (2019). Temperlenmiş Alüminyum 5754 Alaşımının Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Taguchi Metodu Kullanılarak Optimizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7, 45-60.
30. Şavaşkan, M., ve Taptık, Y. (2004). Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. *İTÜ Dergisi Seri D: Mühendislik*, 3(6), 117-128.
31. Şirvancı, M. (1997). *Kalite için Deney Tasarımı "Taguchi Yaklaşımı"*. Literatür Yayıncılık. <https://www.kitapyurdu.com/kitap/kalite-icin-deney-tasarimi-taguchi-yaklasimi/22830.html>
32. Tabachnick, B. G., Fidell, L. S. (2015). *Çok değişkenli istatistiklerin kullanımı*. Editör: Baloğlu, M., *Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara*.
33. Taylan, D. (2009). *Taguchi Deney Tasarımı Uygulaması* [Yüksek Lisans]. Süleyman Demirel Üniversitesi.
34. Tekaüt, İ., Günay, M., ve Şeker, U. (2011). Tornalama İşlemlerinde Talaş Kırıcı Formunun ve Kesme Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 127-131.
35. Yadu Krishnan, J., Poorna Sundar, S., Karthikeyan, L., Veera Ajay, C., ve Manisekar, K. (2021). Experimental optimization of cutting parameters in turning of brass alloy using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 42, 377-382. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.09.561>