

## Taguchi DeneY Tasarımı ile Fiber Optik Kablo Üretimi Proses Optimizasyonu

İlker KARADAĞ<sup>1\*</sup>, Sinan DÜNDAR<sup>2</sup>, Ömer Faruk GÜRCAN<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye

\*<sup>1</sup> ilkerkaradag@cumhuriyet.edu.tr, <sup>2</sup> sinandundar@cumhuriyet.edu.tr, <sup>3</sup> ofgurcan@cumhuriyet.edu.tr

(Geliş/Received: 12/02/2024;

Kabul/Accepted: 07/08/2024)

**Öz:** İnternetin, Dünya’da iletişim ve bilgiye anında erişimde insanlık tarihinin en önemli keşfi olduğu yadsınamaz bir gerçekliktir. Günümüzde internetin tüm Dünya’da yaygın bir teknoloji olmasında kullanılan araç, fiber optik kablolardır. Fiber optik kabloların bu bakımdan önemi, üretiminin nasıl gerçekleştirilmekte olduğu merakını doğurmaktadır. Fiber optik kablo üretiminde, özellikle fiberlerin zayıflama değerleri kablunun optik özellikleri açısından önemli bir faktördür. Zayıflama değerleri belirli bir değerin üzerinde olan kablolar atıl ürün olarak üretimden ayrılmaktadır. Bu durum işletme verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Bu çalışma, Türkiye’nin en önemli fiber optik kablo üreticilerinden birinde fiber optik kablo üretimine ait özellikleri incelemektedir ve Taguchi deneY tasarımı yöntemiyle en uygun çalışma faktörlerine karar vermektedir. Fiber optik kablunun üretiminde zayıflamaya etkisi düşünülen çalışma faktörleri beyin fırtınası tekniği ile ilgili uzman ve akademisyenlerden oluşan bir ekip tarafından belirlenmiştir. Optimal çalışma koşullarını belirlemek için L27 (37) ortogonal matris kullanılmış ve gerçekleştirilen deneyler ile tespit edilen parametrelerin zayıflama değeri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca her proses parametresinin zayıflama üzerindeki önemi Varyans Analizi (ANOVA) testi ile belirlenmiştir. Analiz sonuçları tartışılmış ve şirket için optimum çalışma koşulları, 18 °C Ortam Sıcaklığı, 3,0-6,0 mm Excess Uzunluğu, Orta kalite PBT, Yüksek Kalite Thixojel, 80 mm Hatve Uzunluğu, 185-190 °C Extruder Sıcaklığı, 1,0-1,5 bar Çekme Kuvveti olarak belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Taguchi yöntemi, optik fiber, fiber optik kablo.

### Fiber Optic Cable Production Process Optimization with Taguchi Experimental Design

**Abstract:** It is an undeniable fact that the Internet is the most significant discovery in the history of mankind in terms of instant access to communication and information worldwide. Today, the widespread technology enabling the Internet across the globe relies heavily on fiber optic cables. Consequently, the importance of fiber optic cables raises curiosity about how they are manufactured. In the production of fiber optic cables, the attenuation values of fibers are particularly crucial factors for the optical properties of the cable. Cables with attenuation values above a certain threshold are separated from production as defective products, negatively impacting operational efficiency. This study examines the characteristics of fiber optic cable production at one of Turkey’s major fiber optic cable manufacturers and determines the most suitable operational factors using the Taguchi experimental design method. The operational factors considered to affect attenuation in fiber optic cable production are determined by a team of experts and academicians using brainstorming techniques. An L27(37) orthogonal matrix is employed to determine optimal operating conditions, and the impact of the identified parameters on attenuation is investigated through conducted experiments. Furthermore, the importance of each process parameter on attenuation is determined using Analysis of Variance (ANOVA) tests. The analysis results are discussed, and the optimum operating conditions for the company are determined as follows: Ambient Temperature of 18°C, Excess Length of 3.0-6.0 mm, Medium Quality PBT, High-Quality Thixojel, Line Length of 80 mm, Extruder Temperature of 185-190°C, and Pulling Force of 2.0-2.5 bar.

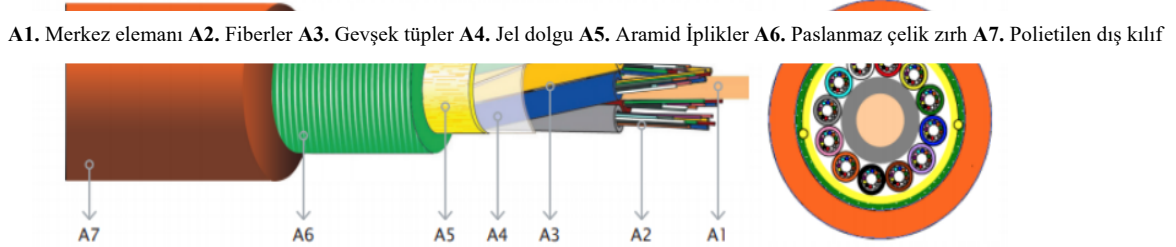
**Key words:** Taguchi method, optic fiber, fiber optic cable.

#### 1. Giriş

Fiber optik teknolojisi, verileri ışık sinyalleriyle taşıyan bir teknolojidir. Veriler silikondan yapılmış ve “fiber” adı verilen mikron ( $\mu\text{m}$ ) ile ölçülebilen boyutlara sahip tüpler vasıtasıyla taşınır [1]. Fiber optik kablo ise, bu fiberlerin çeşitli renklerde akrilik boyalar ile boyanmış hallerinin daha büyük boyutlu tüpler içerisine yerleştirilmiş ve bir merkez mukavemet elemanı etrafında bükülmüş çekirdek, cam elyaf veya mukavemeti yüksek ipler ile koruyucu kılıftan oluşan kablo çeşididir. Fiber optik kablolar bakır iletkenli kablolarla kıyasla, uzun mesafeli iletişimi sağlama (kıtalar arası), yüksek bant genişliği (yüksek miktarda bilgi taşıma), elektromanyetik alanlardan etkilenmeme, radyasyon yaymama, boyut, ağırlık ve esneklik avantajları, kolay kurulum, daha güvenli iletişim sağlama (izlemesi çok zordur) gibi çeşitli avantajlara sahiptir. Günümüzde ses iletimi, görüntü iletimi ve veri iletimi içeren sayısız uygulamada kullanılmaktadır. Fiber optik kabloların tek modlu veya çok modlu, çok

\* Sorumlu yazar: [ilkerkaradag@cumhuriyet.edu.tr](mailto:ilkerkaradag@cumhuriyet.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-7048-8529, <sup>2</sup> 0000-0001-8061-3322, <sup>3</sup> 0000-0002-1256-2751

modlularda havai kablolar [2] ve zırlı kablolar gibi çok çeşitli türleri bulunmaktadır. Şekil 1’de çok modlu 144 fiberli tek kılıflı zırlı bir fiber optik kabloya ait kesit görülmektedir.



Şekil 1. Fiber optik kabloya ait yapısal kesit [3].

Fiber optik kabloların üretiminde en önemli husus fiber zayıflama değeridir. Üretimin her aşamasında fiber zayıflama değerleri kalite kontrol uzmanları tarafından farklı nanometre (nm) dalga boylarında ölçülerek tüm fiber lifleri için tek tek kontrol edilir [4]. Fiber zayıflama değeri, kabloun veri iletiminde yaşadığı veri kaybıdır. Bu değer farklı dalga boylarında kontrol edilir, farklı fiber cinsleri için kabul edilebilir farklı fiber zayıflama değerleri bulunmaktadır. Üretimde amaç fiber zayıflama değerini üretimin ilk aşamasından itibaren tamamlanıncaya kadar minimum seviyede tutarak üretimi tamamlamaktır.

Taguchi yöntemi deney tasarımına farklı bir bakış açısı ile yaklaşarak zaman ve kaynak israfının önüne geçmektedir. Deney tasarımında bağımsız değişken faktör olarak tanımlanırken, bağımsız değişkenin aldığı değerlerde faktör düzeyi olarak tanımlanır. Bu çalışmada Taguchi'nin deneysel tasarım tekniği ile fiber optik kablo üretim sürecindeki faktörlerin nihai ürün üzerindeki olumsuz etkileri minimize edilmiştir. Literatürde Taguchi Yöntemi ile deney tasarımı oldukça fazla sayıda çalışmada kullanılmıştır. Yöntemin bu kadar fazla çalışmada kullanılmasının temel sebebi daha az deney yaparak, tam faktöriyel bir deney tasarımından elde edilmesi beklenen sonuçları elde edebilmektir. Farklı üretim veya hizmet sistemlerindeki süreçleri Taguchi yöntemi ile optimize etmiş son beş yılda Web of Science (WOS) verilerine göre SCI/SCIE indeksli dergilerde yüksek sayıda atıf almış bazı önemli çalışmalara örnekler gösterebiliriz. Viera ve diğ.[5] pirinç kabuğundan elde edilen biyo kömür verimini optimize etmek için Taguchi yöntemi ile deney tasarımı tekniğini kullanmıştır. Hossein ve diğ. [6] tekstil sektöründe pamuklu kumaşın yüksek verimle boyanması için kakao kabuğu ekstratları gibi doğal malzemelerin kullanılıp kullanılmayacağını Taguchi yöntemi ile deney tasarımı tekniği ile çalışmıştır. Özel ve diğ. [7] termal bariyer kaplamanın (TBC) dizel motor performansına etkisini Taguchi yöntemi ile deney tasarımı tekniği ile incelemiştir. Vairamuthu ve diğ. [8] çeşitli girdi proses parametreleri dikkate alınarak toz metalurjisi yoluyla alüminyum bazlı metal kompozit malzeme üretimini Taguchi yöntemi ile deney tasarımı tekniğini kullanarak optimize etmiştir. Frifita ve diğ.[9] Inconel 718 isimli Nikel bazlı süper alaşımın tornalamasında işleme parametrelerinin optimizasyonunu Taguchi yöntemi ile deney tasarımı tekniği ile sağlamıştır.

Son yıllarda yurtiçinde farklı bilimsel alanlarda yapılan güncel çalışmalara bazı örnekler şöyledir; malzeme bilimi alanında Çelik [10] Ezerek Parlatma yönteminin Inconel 718 alaşımının yüzey kalitesi üzerindeki etkilerinin araştırılmasında Taguchi yönteminden faydalanmıştır. Sağlık alanında yapılan bir çalışmada Çelik [11] faz değiştiren malzeme (FDM) takviyeli yalıtımlı bir kan taşıma kabının tasarım parametrelerinin sıcaklık üzerine olan etkisini Taguchi yöntemi ile araştırmıştır. İnşaat mühendisliği alanında yapılan bir çalışmada Arıcı ve Keleştemur [12] Taguchi metodunu kullanarak tufal katkılı harçların basınç dayanımının analizini yapmışlardır. Makine mühendisliği alanında yapılan bir çalışmada ise Özay ve diğ. [13] Taguchi deney tasarımı yöntemini kullanarak sementasyon çeliğinin teğetsel silindirik taşlama yöntemi ile işlenmesinde kesme parametrelerinin titreşim üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Şap [14] ise çalışmada AISI 5140 Çeliğinin Farklı Soğutma Teknikleri Kullanılarak Frezelenmesinin güç tüketimi üzerine etkilerini Taguchi yöntemi ile incelemiştir.

Taguchi deney tasarımı yönteminin kullanıldığı çok sayıda yayına literatürde rastlamak mümkündür. Bununla birlikte fiber optik, fiber optik kablo, fiber optik sensör ve taguchi deney tasarımı anahtar kelimeleri birlikte incelendiğinde, sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Jou ve diğ. [15] fiber optik kablo dış kılıfının büzülme oranı üzerinde önemli etkileri olan değişkenleri belirlemek için Taguchi Yöntemini kullanmışlardır. Mohd Arif and Ehsan [16] U şeklindeki fiberin temel geometrik özelliklerinin analizinde Taguchi yönteminden faydalanmıştır. Lin [17] fiber optik konektörlerin en temel bileşeninin üretim sürecini Taguchi yöntemini kullanarak optimize etmiştir. Mudgal et al. [18] bir fiber sensörün teknik tasarım parametrelerinin optimize edilmesinde Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Menon ve Apte [19] fiber optik iletim sistemlerinde ışık kaynağı olarak kullanılan Uzun dalga boyu Düşey Kavite Yüzey Yayıcı Lazerler (LW-VCSEL) üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada, numerik

olarak simüle edilen bir LW-VCSEL modelinin tepe lazer gücünün optimize edilmesinde Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Boydak ve Yücel [20] fiber optik kabloda meydana gelen raman saçılmasının analizi üzerine çalışmıştır. Özdamar ve Demirer [21] çalışmalarında ekstrüzyon yöntemiyle aydınlatma amaçlı fiber optik kablo üretimini deneysel olarak gerçekleştirmiş ve tam faktöriyel bir deney tasarımı ile proses parametrelerinin iyileştirilmesi incelemişlerdir. Eser ve Uğurlu [22] fiber optik kablolarda hat birleştirme hatalarını ve kayıplara olan etkilerini araştırmışlardır. Hatipoğlu ve diğ. [23] çalışmalarında helikopter uçuş test enstrümantasyonunda fiber optik sensörlerin kullanılmasına geniş bir bakışı sunmaktadır.

Çalışmamızın ilgili literatüre katkısı, çok modlu fiber optik kabloların üretim süreçlerinin analitik tekniklerle analiz edilerek, optimize edilmesidir. Bu şekilde, Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak çok modlu bir fiber optik kablunun üretim süreçlerinde optimum parametrelerin tespit edilerek kablunun optik değerlerinde iyileştirme sağlanması hedeflenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen optik değerlerdeki %8,5 oranındaki iyileştirme işletmenin sürdürülebilirliğine katkı sağlarken, gelecek çalışmalara da yol gösterici bir kılavuz olmuştur.

Çalışmamızın bundan sonraki kısmı şu şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde Taguchi yöntemi anlatılmıştır. Üçüncü bölümde çalışmada ele aldığımız problem ve elde ettiğimiz sayısal sonuçlar değerlendirilmektedir. Son bölümde ise çalışmanın sonuçları ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar özetlenmektedir.

## 2. Metodoloji

Taguchi yöntemi, Taguchi ve Konishi [24] tarafından geliştirilmiş, mühendislik analizlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan etkin ve etkili bir yöntemdir. Bu yöntemin amacı, kontrol edilemeyen koşullar altında, güvenilir ve sağlam sistemler tasarlamaktır [25-26]. Taguchi yöntemi proses optimizasyonu için geliştirilmiş etkili bir yöntemlerden biridir [27]. Taguchi yönteminin deney tasarımına getirdiği farklı bakış açısının özeti şudur; tam faktöriyel deney tasarımına kıyasla çok daha az sayıda deney yaparak dolayısı ile çok daha az çaba harcayarak aynı sonuçları elde edebilmektir. Yöntem, parametrelerin optimal değerlerini belirlemek amacıyla seviye ve sayılarına göre ortogonal diziler kullanarak sonuca ulaşmaktadır. Montgomery'nin (1991) üzerinde çalıştığı ortogonal diziler yapılması gereken deney sayısını oldukça azaltmaktadır [28].

Yöntemde, deneylerin sonuçları sinyal-gürültü (S/N) oranına dönüştürülür [29]. S/N oranı, istenen değerlerden sapan veya bu değerlere yaklaşan kalite özelliklerinin bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Optimal koşullar, Taguchi yönteminde üç kategoride değerlendirilir [30-31];

**Küçük en iyidir:** Burada kalite karakteristiği negatif değildir ve süreklidir. 0 ile  $+\infty$  arasında değerler alabilir. İstenilen hedef değer 0'dır. Denklem (1)'de görüldüğü üzere S/N oranı;

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

eşitliği ile hesaplanır.

**Nominal en iyidir:** Kalite karakteristiği küçük en iyidir ile benzerdir. Farklı olarak, istenilen hedef değer 0 değildir ve sonludur. Ortalamayı hedefe taşımaya çalışır. Denklem (2)'de görüldüğü üzere S/N oranı;

$$S/N_N = 10 \log \left( \frac{\bar{y}}{s\bar{y}} \right) \quad (2)$$

eşitliği ile hesaplanır.

**Büyük en iyidir:** Burada da kalite karakteristiği negatif değildir ve süreklidir. 0 ile  $+\infty$  arasında değerler alabilir. İstenilen hedef değer (olabildiğince büyük)  $+\infty$ 'dur. Denklem (3)'de görüldüğü üzere S/N oranı;

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

eşitliği ile hesaplanır.

Taguchi yönteminin herhangi bir süreç parametresini optimize edebilmek için önerdiği standart prosedür şu adımlardan oluşmaktadır [32];

- Optimize edilecek kalite karakteristiğinin belirlenmesi.
- Gürültü faktörlerinin ve test koşullarının tanımlanması.
- Kontrol edilebilen faktörlerinin ve bunların alternatif seviyelerinin tanımlanması.
- Ortogonal dizilerden faydalanarak deney tasarımının hazırlanması ve deneylerin gerçekleştirilmesi.
- Verilerin analiz edilmesi ve kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinin belirlenmesi.
- Bu seviyelerdeki performansın tahmin edilmesi.

Bu çalışmada üretimden kaynaklanan fiber optik kabloların zayıflama değerlerinin minimum seviye tutulması amaçlandığından ne kadar düşük olursa o kadar iyi yaklaşımı kullanılmıştır. Ayrıca, hangi parametrelerin sonuç üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu, hangisinin daha az etkiye sahip olduğunu belirlemek genellikle bir varyans analizi (ANOVA) ile sağlanmaktadır.

Deney tasarımları esnasında her bir faktörün yanıt değişkeni üzerindeki etkisi, üretim parametrelerinin doğru belirlenebilmesi açısından anahtar bir rol üstlenmektedir. Bu açıdan bakıldığında Varyans analizi (ANOVA), her bir faktörün yanıt değişkeni üzerindeki göreceli katkısını belirlemek ve önemli faktörleri önemsiz olanlardan ayırmak için deney tasarımlarında yaygın biçimde kullanılan bir istatistiksel araçtır. Dolayısıyla ANOVA uygulaması, yürütülen bir deneyde yanıt değişkenini etkileyen tüm değişkenler arasından önemli bağımsız değişkenlerin tanımlanmasını ve bunların yanıt değişkeni üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamaktadır [33-34].

### 3. Vaka Çalışması ve Tartışma

Bu bölümde, vaka çalışması olarak fiber optik kabloların üretim sürecine etki eden faktörlerin Taguchi yöntemi ile optimize edilmesi anlatılmıştır.

#### 3.1 Problemin Tanımı

Fiber optik kablo üretimi, incelediğimiz tesiste 7 aşamada tamamlanmaktadır;

- İlk aşamada 50,4 km boya sarılı olarak ithal edilen fiberler 1800 m/dak üretim hızı ile özel bir boya ile boyanmaktadır.
- İkinci aşamada boyalı fiberler “PBT (Polibütilen Tereftalat)” malzemeden üretilen “gevşek(loose)” tüpler içerisine “Thixojel” jeli ile yerleştirilmektedir. Bu aşamada ayrıca fiberlerin tüpler içerisindeki uzunluğu da kontrol edilmekte, bir büküm olacağından dolayı fiberler tüpler içerisine 3/1000 oranı ile yerleştirilmektedir. Yani, 1000 metrelik tüp içerisine 1003 metre boyunda fiberler bulunmaktadır. Teknik olarak “Excess Uzunluğu” olarak isimlendirilen bu yerleşme, Excess testi isimli test ile kontrol edilmektedir.
- Üçüncü aşamada tüpler lif takviyeli polimer (FRP) bir yapıdaki merkez eleman etrafında 4 kez sağa, 4 kez sola olmak kaydıyla bükülmektedir. Bu yapı fiber optik kablonun özü (core) veya çekirdeğini oluşturmaktadır.
- Dördüncü aşamada eğer kablo çift kılıflı bir yapıya sahip olacaksa öz üzerine düşük yoğunluklu polietilen malzeme (LDPE) ile iç kılıf çekilmektedir. Aksi takdirde bu aşamaya gerek bulunmamaktadır.
- Beşinci aşamada eğer kablo zırlı bir yapıya sahip olacaksa uygun bir paslanmaz galvanizli çelik zırlı ile kaplanmaktadır. Aksi takdirde bu aşamaya da gerek bulunmamaktadır.
- Altıncı aşamada kabloyu çeşitli dış etkenlerden koruyucu orta veya yüksek yoğunluklu polietilen malzeme (MDPE, HDPE) ile dış kılıf çekilmektedir. Bu aşamada kablo tasarımına bağlı olarak değişen miktar ve ölçülerde kablo mukavemetini artıran aramid iplik, herhangi bir durumda kolay soyulma işlemi için soyma ipi veya suyun kablo içerisinde ilerlemesini engelleme için şişen iplikler de kullanılabilir. Ayrıca, bu aşamada kablo mukavemetini artıran aramid iplik, herhangi bir durumda kolay soyulma işlemi için soyma ipi veya suyun kablo içerisinde ilerlemesini engelleme için şişen iplikler de kullanılabilir.
- Son aşamada ise kablo 2000m ± 100m veya 4000 m ± 100m şeklinde yekpareler ile makaralara paketlenmektedir.

Probleminiz, nihai ürünlerde karşılaşılan fiber liflerindeki yüksek optik zayıflama değerleridir. Zayıflama değerleri, şartnamelerde belirtilen değerlerin çıkması durumunda ürün atılabilir olarak değerlendirilmektedir. Diğer bir ifade ile üretim hammadde israfı, enerji israfı, işgücü israfı, sermaye israfı, zaman israfı gibi israflar ile sonuçlanmaktadır. Dolayısı ile üretimin her safhasında kontrol edilen fiber zayıflama değerlerinin istenilen aralıklarda bulunması için üretim sürecine etki eden parametrelerin optimum seviyelerde olması gerekmektedir. Çalışmada, G652D cinsi fiber kullanan dış çapı 2,0 mm, iç çapı 1,4 mm ve merkez elemanı 2,2 mm olan fiber optik kablo özüne sahip kablo için üretim sürecini minimum fiber zayıflama değeri ile tamamlayacak optimum proses koşulları belirlenmeye çalışılmıştır. Tedarikçiden gelen G652D cinsi fibere ait özelliklerde 1550 nm dalga boyunda fiber zayıflama değeri  $\leq 18$  şeklindedir [35]. Üretici firma ise ürettiği fiber optik kablolarında bu değeri  $\leq 25$  şeklinde belirlemiştir. Ancak, tüketici firmaların çoğu şartnamelerinde bu değer  $\leq 22$  şeklinde olmasını istemektedirler. Dolayısı ile işletme üretimde fiber zayıflama değerlerine azami ölçüde dikkat ederek üretimi gerçekleştirmek zorundadır. Çalışmamıza ait akış diyagramı Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Akış diyagramı.

### 3.2. Parametrelerin ve Ortogonal Dizilerin Seçimi

Üretimde fiber zayıflama değerlerini etkileyebileceği düşünülen tüm kontrol edilebilir parametreler uzman bir ekip tarafından gerçekleştirilen beyin fırtınası tekniği ile tespit edilmiştir. Bu uzman ekip; üretim müdürü, üretim mühendisi, üretim şefleri, kalite kontrol mühendisi, kalite kontrol şefleri, vardiya amirleri ve akademisyenlerden oluşmaktadır. Belirlenen parametrelerin, zayıflama değerini minimumda tutma amacına eşit değerlerde etki edeceği düşünülmektedir. Literatürde çok kriterli karar verme metotlarını kullanarak farklı amaçlar Taguchi Deney tasarımı ile hibrit şekilde kullanılarak optimize edilmiştir [36]. Ancak problemimizde ele aldığımız amaç tekdir ve ürünün atıl duruma düşmesine sebebiyet verebilecek hayati önemdedir. Bu parametreler ve seviyeleri Tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1. Parametreler ve seviyeleri.

Parametreler	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
1 Ortam sıcaklığı	A °C	18	22	33
2 Excess Uzunluğu	B mm	0-1,5	1,5-3,0	3,0-6,0
3 PBT Cinsi	C	Basf	KP270	Vestadur 3013
4 Thixojel Cinsi	D	Itcojel	Mwo	Daewoon Op100
5 Hatve Uzunluğu	E mm	75	80	85
6 Extruder Sıcaklığı	F °C	170-180	185-190	195-200
7 Çekme kuvveti	G Bar	1,0-1,5	2,0-2,5	3,0-3,5

Tam faktöriyel bir deney tasarımı ile üretim sürecini optimize etmek için  $3^7$  yani 2187 adet deney yapmak gerekmektedir. Ancak Taguchi deney tasarımı yöntemi ile daha düşük sayıda deney yaparak aynı sonuçları elde etmemiz beklenmektedir. Bu sebep ile 7 parametre ve 3 seviye için L27(3<sup>7</sup>) Taguchi Ortogonal dizisi kullanılmıştır. Bu ortogonal diziyeye göre hazırlanan deney planı, 1550 nm dalga boyunda ölçülen fiber zayıflama değerleri Tablo 2’de gösterilmektedir. Tablo 2’de gösterilen deney planına göre, örneğin deney 1 için belirlenen bütün parametreler seviye 1’de ayarlanarak üretim gerçekleştirilmiş ve bu üretim sonucu üretilen kablunun 1550 µm dalga boyundaki zayıflama değeri kalite kontrol şefleri tarafından fiber optik OTDR cihazı ile ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Deneyler uzman ekip gözetiminde, üretimi gerçekleştiren işgücünü kullanarak, üretimi incelediğimiz tesislerde yapılmıştır. Bu şekilde gerçekleştirilen 27 adet deneyden elde edilen sonuçlar Tablo 2’de gösterilmiştir.

**Tablo 2.** L27(37) Deney Planı ve Fiber Zayıflama Değerleri.

Deney	A	B	C	D	E	F	G	1550 nm Zayıflama değeri	Deney	A	B	C	D	E	F	G	1550 nm Zayıflama değeri
1	1	1	1	1	1	1	1	22,724	15	2	2	3	1	3	1	2	21,105
2	1	1	1	1	2	2	2	21,844	16	2	3	1	2	1	2	3	22,138
3	1	1	1	1	3	3	3	22,641	17	2	3	1	2	2	3	1	22,035
4	1	2	2	2	1	1	1	20,138	18	2	3	1	2	3	1	2	21,651
5	1	2	2	2	2	2	2	19,521	19	3	1	3	2	1	3	2	22,752
6	1	2	2	2	3	3	3	19,684	20	3	1	3	2	2	1	3	22,631
7	1	3	3	3	1	1	1	19,447	21	3	1	3	2	3	2	1	22,412
8	1	3	3	3	2	2	2	19,085	22	3	2	1	3	1	3	2	21,622
9	1	3	3	3	3	3	3	19,348	23	3	2	1	3	2	1	3	21,512
10	2	1	2	3	1	2	3	21,343	24	3	2	1	3	3	2	1	21,422
11	2	1	2	3	2	3	1	21,125	25	3	3	2	1	1	3	2	20,742
12	2	1	2	3	3	1	2	21,328	26	3	3	2	1	2	1	3	20,848
13	2	2	3	1	1	2	3	20,712	27	3	3	2	1	3	2	1	20,626
14	2	2	3	1	2	3	1	21,010									

### 3.3. Sinyal Gürültü (S/N) Oranı ve Varyans Analizi

Taguchi yönteminde S/N oranı, sürece ait kalite karakteristiğini değerlendirmek ve nasıl olması gerektiğini tespit edebilmek için kullanılmaktadır. Uygulamamızda fiber optik kablo üretim süreci sonunda fiberlere ait zayıflama değeri mümkün oldukça tedarikçiden geldiği şekli ile kalması amaçlanmaktadır. Dolayısı ile küçük en iyidir kalite özelliği istenmektedir. Tablo 3'te deneylere ait gözlemlerin ortalaması (tek gözlem değeri bulunmaktadır) ve eşitlik 4 ve eşitlik 5'in kullanılması ile elde edilen S/N oranları yer almaktadır.

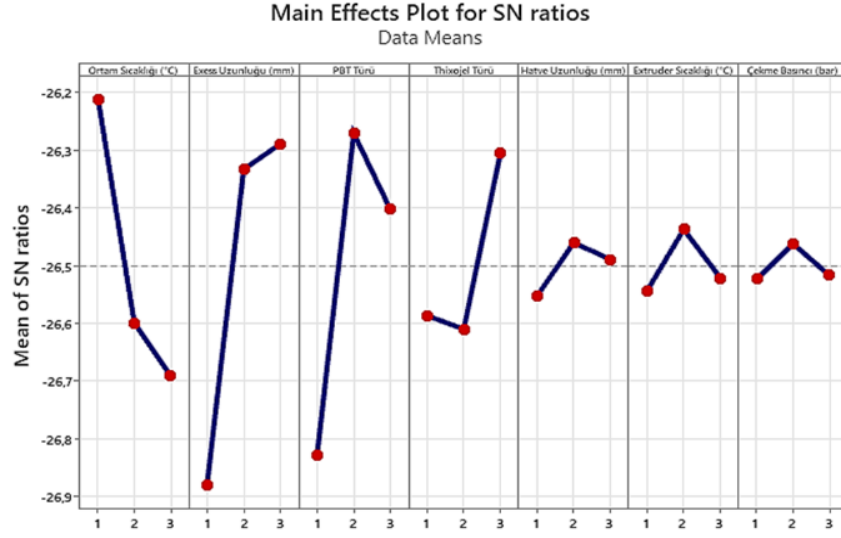
$$MSD = \frac{1}{n} \sum (y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2) = \frac{1}{1} \cdot 22,724^2 = 516,380 \quad (4)$$

$$S/N = -10 * \log(MSD) = -10 * \log(516,380) = -27,130 \quad (5)$$

Her faktöre ait 1., 2. ve 3. seviyelerin S/N oranına yönelik etkisi Şekil 3'te grafiksel olarak gösterilmekte olup ilgili veriler Tablo 4'te özetlenmiştir. S/N oranının en büyük değere sahip olması istenmektedir. Örneğin A parametresinin 3. seviyesini seçersek kalite özelliği düşecektir. Bununla birlikte 1. seviye A parametresi, 3. seviye B parametresi, 2. seviye C parametresi, 3. seviye D parametresi, 2. seviye E parametresi, 2. seviye F parametresi ve 2. seviye G parametresi S/N oranını yükseltecektir. Dolayısıyla  $A_1B_3C_2D_3E_2F_2G_2$  optimum durumu ifade etmektedir. Bu durumda en iyi faktör düzeyi kombinasyonu Tablo 5'te gösterildiği gibi ortaya çıkmaktadır.

**Tablo 3.** L27(37) Deney Planı ve Fiber Zayıflama Değerleri.

Deney	Gözlem	Ortalama	MSD	S/N	Deney	Gözlem	Ortalama	MSD	S/N
1	22,724	22,724	516,380	-27,130	15	21,105	21,105	445,421	-26,488
2	21,844	21,844	477,160	-26,787	16	22,138	22,138	490,082	-26,903
3	22,641	22,641	512,615	-27,098	17	22,035	22,035	485,559	-26,862
4	20,138	20,138	405,539	-26,080	18	21,651	21,651	468,774	-26,710
5	19,521	19,521	381,069	-25,810	19	22,752	22,752	517,654	-27,140
6	19,684	19,684	387,460	-25,882	20	22,631	22,631	512,162	-27,094
7	19,447	19,447	378,186	-25,777	21	22,412	22,412	502,298	-27,010
8	19,085	19,085	364,237	-25,614	22	21,622	21,622	467,511	-26,698
9	19,348	19,348	374,345	-25,733	23	21,512	21,512	462,766	-26,654
10	21,343	21,343	455,502	-26,585	24	21,422	21,422	458,902	-26,617
11	21,125	21,125	446,249	-26,496	25	20,742	20,742	430,231	-26,337
12	21,328	21,328	454,905	-26,579	26	20,848	20,848	434,639	-26,381
13	20,712	20,712	428,987	-26,324	27	20,626	20,626	425,432	-26,288
14	21,010	21,010	441,420	-26,449					



**Şekil 3.** S/N oranına göre faktör seviyesinin grafiksel olarak gösterilmesi.

**Tablo 4.** Zayıflama değeri için S/N oranları.

Seviye	1	2	3	Sıra
Ortam Sıcaklığı	<b>-26,2123</b>	-26,5995	-26,6910	3
Excess Uzunluğu	-26,8798	-26,3336	<b>-26,2894</b>	1
PBT Türü	-26,8286	<b>-26,2710</b>	-26,4032	2
Thixojel Türü	-26,5868	-26,6101	<b>-26,3058</b>	4
Hatve Uzunluğu	-26,5527	<b>-26,4607</b>	-26,4894	6
Ekstruder Sıcaklığı	-26,5436	<b>-26,4376</b>	-26,5217	5
Çekme Kuvveti	-26,5232	<b>-26,4625</b>	-26,5171	7

**Tablo 5.** S/N orana göre optimum koşulların kombinasyonu.

	A	B	C	D	E	F	G
Seviye	1	3	2	3	2	2	2
	<b>18 °C</b>	<b>3,0-6,0 mm</b>	<b>KP 270</b>	<b>Daewoon Op-100</b>	<b>80 mm</b>	<b>185-190 °C</b>	<b>2,0-2,5 Bar</b>
	Ortam Sıcaklığı	Excess Uzunluğu	PBT Türü	Thixojel Türü	Hatve Uzunluğu	Ekstruder Sıcaklığı	Çekme Kuvveti

Tablo 5'te özetlenen verilere göre ortam sıcaklığının 18 °C, excess uzunluğunun 3,0-6,0 mm, hatve uzunluğunun 80 mm, ekstruder sıcaklığının 185-190 °C ve çekme kuvvetinin 2,0-2,5 bar şeklinde üretim parametresi olarak ayarlanması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, PBT türü olarak KP 270 ve Thixojel türü olarak Daewoon Op-100 ürünlerinin kullanılmasının optimum sonuçları verdiği belirlenmiştir.

S/N oranı ile analizden sonra genellikle hangi parametre veya parametrelerin sonuç değerleri üzerindeki anlamlı etkiye sahip olduğu ya da hangilerinin önemsiz olduğu yapılan ANOVA ile elde edilmektedir [33-34]. Tablo 6'da gözlem değerlerinin ortalaması kullanılarak gerçekleştirilen ANOVA tablosu özetlenmiştir. Tablo 6'da özetlenen verilere göre %95 güven seviyesinde ve 0,05 anlamlılık düzeyinde elde edilen sonuçlar ortam sıcaklığı, excess uzunluğu, PBT türü, thixojel türü ve ekstruder sıcaklığı faktörlerinin nihai ürünün kalite özelliği üzerinde istatistiksel açıdan anlamlı etkileri olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, her bir faktörün ürün özelliklerine

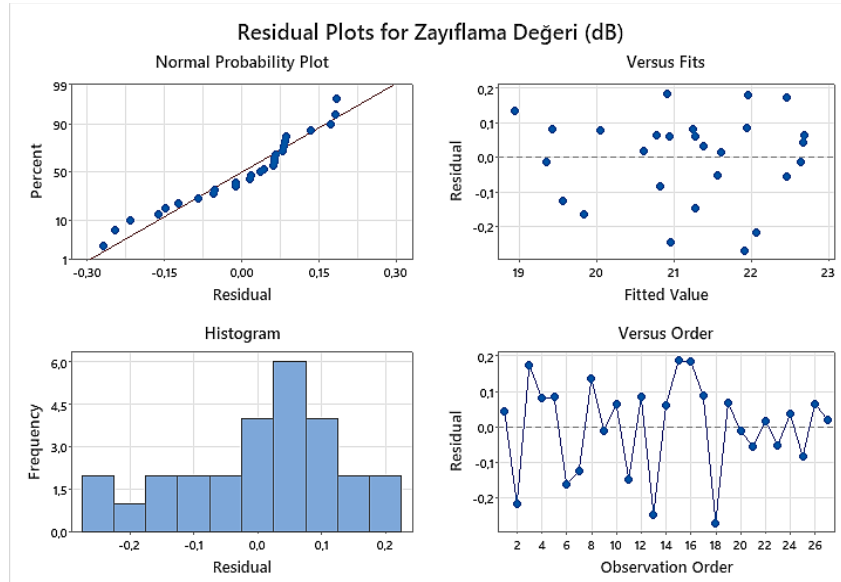
olan katkısı da aynı tabloda yüzdesel olarak belirtilmiş olup bu katkı, her bir faktörün ürün kalitesi üzerinde ne kadar öneme sahip olduğunu ifade etmektedir. Bu değerlendirmeye göre ürün kalitesine en yüksek katkıyı excess uzunluğu faktörü sunarken PBT türü, ortam sıcaklığı, thixojel türü ve extruder sıcaklığı azalan oranda etki etmektedir. Bununla birlikte hatve uzunluğu ve çekme kuvvetinin anlamlı bir etki ortaya koymadığı görülmektedir. Aynı tabloda, modelin  $r^2 = \%98,65$  oranında açıklanabilir olduğu da belirlenmiştir.

Gözlemlerdeki varyasyonu ve model uyumunun iyiliğini göstermesi amacıyla Regresyon ve ANOVA analizlerinde artık grafiğinden sıklıkla yararlanılmakta olup deneylerden elde edilen gözlemleri içeren ve Minitab paket programı yardımıyla elde edilen bu grafikler Şekil 4'te gösterilmektedir. Artık-uyum grafiği, 0 noktasının her iki tarafında yer alan artık değerlerinin modellenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Verilerin dağılımı incelendiğinde, 0 çizgisinin altında veya üzerindeki verilerin herhangi bir baskınlığının söz konusu olmaması nedeniyle normallik varsayımının geçerli olduğu sonucuna ulaşılabilmektedir. Artık değerler için oluşturulan histogram ise verilerin genel dağılımı hakkında fikir edinebilmeyi sağlayan bir araç olup geniş bir dağılıma sahip verilerde daha uzun kuyrukların oluştuğu gözlenmektedir.

**Tablo 6.** Deney sonuçlarının varyans analizi (ANOVA).

Kaynak	SD	Kareler Top.	Katkı	Kareler Ort.	F	p
PBT Türü	2	8,97	%28,91	4,48	128,72	0,000
Thix. Türü	2	3,04	%9,79	1,52	43,61	0,000
Ort. Sıcaklığı	2	6,35	%20,47	3,18	91,14	0,000
Exc. Uzunluğu	2	11,57	%37,29	5,78	166,03	0,000
Hatve Uzunluğu	2	0,24	%0,76	0,12	3,38	0,069
Ext. Sıcaklığı	2	0,33	%1,05	0,16	4,69	0,031
Çek. Kuvveti	2	0,12	%0,37	0,06	1,66	0,231
Hata	12	0,42	%1,35	0,03		
<b>Toplam</b>	<b>26</b>	<b>31,02</b>	<b>%100</b>			

$r^2 = \%98,65$



**Şekil 4.** Artık Grafikleri.



### 3.4. Optimum ile Mevcut Üretim Koşulları ve Güven Aralığı

Optimum üretim koşulları için gerekli olan parametre seviyeleri  $A_1B_3C_2D_3E_2F_2G_2$  şeklindedir. Tablo 7’de gösterildiği üzere bu koşullara ait parametre seviyelerinin S/N oranı -25,4344 ve ortalaması 18,6012’dir. Ancak mevcut üretim koşulları parametre seviyeleri  $A_2B_2C_2D_2E_2F_2G_2$  şeklindedir. Bu koşullara ait parametre seviyelerinin Tablo 7’de de gösterildiği üzere S/N oranı -26,531 ve ortalaması 21,329’dur. Buna göre optimum üretim şartlarında üretim gerçekleştirsek fiber zayıflama değerlerini yaklaşık %8,5 oranında iyileşme beklemekteyiz.

**Tablo 7.** Üretim Koşulları ile Optimum Koşulların Karşılaştırılması.

	Mevcut Parametre Seviyeleri	Optimum Parametre Seviyeleri
Seviye	$A_2B_2C_2D_2E_2F_2G_2$	$A_1B_3C_2D_3E_2F_2G_2$
Ortalama	20,3291	18,6012
S/N	-26,1693	-25,4344

Tablo 7’de bulunmakta olan ortalama ve S/N oranı değerleri hesaplanırken tüm faktörler dikkate alınmış olup zayıflama değerinin ortalaması yalnızca bu parametre üzerinde istatistiksel açıdan anlamlı olan A, B, C, D ve F faktörlerinin optimum seviyesi kullanılarak hesaplanmıştır. Optimum şartları ifade eden  $A_1, B_3, C_2, D_3$  ve  $F_2$  faktör seviyelerinde elde edilecek sonuçlar için güven aralığı, %95 güven seviyesinde  $18,519 \leq$  doğrulama deneylerinin ortalaması  $\leq 19,059$  aralığında bulunmuştur. Optimum koşullar altında yapılan yeni doğrulama deneyinin ortalamasının bu aralıkta olması, kalite karakteristiği değerlerinin istatistiksel açıdan da kabul edilebilir olduğuna işaret etmektedir.

### 3.5. Doğrulama Deneyi ve Etkileşim Grafiği

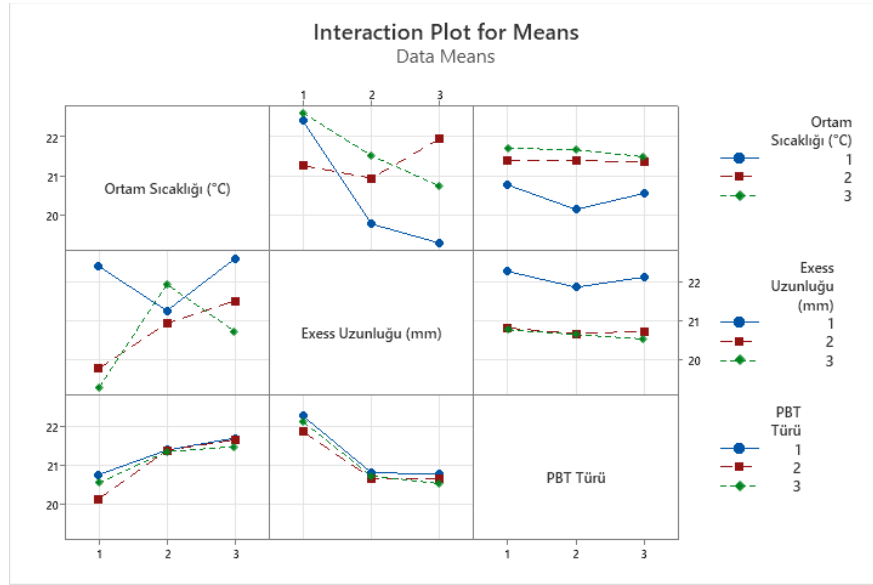
Analiz sonuçlarına göre S/N oranı en küçük fiber zayıflama değeri elde etmek için gereken parametre seviyeleri  $A_1B_3C_2D_3E_2F_2G_2$ ’dir. Bu seviyede 4 adet doğrulama deneyi yapılmış ve deney sonuçlarından elde edilen zayıflama değerleri Tablo 8’de gösterilmektedir.

**Tablo 8.** Doğrulama deneyleri sonuçları.

Deney No				Ortalama	S/N
1	2	3	4		
18,623	18,895	18,718	18,987	18,806	-25,486

Tablo 8’de de gösterildiği üzere analiz sonuçlarında bulunan kalite karakteristik değerlerinin istatistiksel açıdan da kabul edilebilir olduğunu göstermektedir. Yapılan doğrulama deneyleri sonucuna göre de fiber optik kablonun zayıflama değerlerini en küçük hale getiren parametrelerin seviye kombinasyonu (optimum durum)  $A_1B_3C_2D_3E_2F_2G_2$  olarak bulunmuştur.

İki parametre arasında etkileşim olup olmadığını iki parametre ile yapılacak bir deneyle anlamak mümkündür. Etkileşim, grafiksel çizim yardımıyla en açık şekilde görülebilmektedir. Çizgiler arasında paralellik varsa iki parametre arasında etkileşim yoktur. İki parametreye ait doğruların birbiriyle kesiştiği noktalar varsa, bu iki parametre arasında güçlü etkileşim olduğu sonucuna varılmaktadır. Çalışmada ele aldığımız ve önem açısından ilk üç sırada yer alan faktörler arasındaki etkileşim Şekil 5’te gösterilmektedir.



Şekil 5. Parametrelerin etkileşim grafiği.

#### 4. Sonuç

Günümüzde her işletme hem ulusal hem de uluslararası pazarda varlığını sürdürülebilir bir şekilde büyümek istemektedir. Bunun en temel koşullarından bir tanesi işletmenin verimli bir şekilde üretim gerçekleştirmesidir. Diğer bir ifade ile minimum israf ile sifıra yakın hata ile üretim olmazsa olmaz bir şarttır. Atıl ürünün ortaya çıkma riskinin yüksek olduğu üretim süreçlerinden bir tanesi de fiber optik kablo üretim sürecidir. Fiber optik kablolar, fiber liflerinden üretilmektedir. Bu kabloların en önemli özelliği fiber liflerinin optik değerleridir. Üretim sürecinin her aşamasında kullanılan fiber cinsine de bağlı olarak farklı dalga boylarında kontrol edilen bu değerler nihai üründe istenilen şekilde değil ise, üretim süreci israf olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada, fiber optik kablo üretim süreci Taguchi yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Bu amaçla üretim müdürü, üretim mühendisi, üretim şefleri, kalite kontrol mühendisi, kalite kontrol şefleri, vardiya amirleri ve akademisyenlerden oluşan bir uzman bir ekip, üretim sürecine etki ettiğini düşündüğü kontrol edilebilir parametreleri tartışmıştır. Bu parametrelerin farklı seviyelerinin neler olabileceği tespit edilmiştir. Uzman ekibin hedefi G652D fiber liflerini kullanan kablolarda, 1550 nm dalga boyunda fiber zayıflama değerleri  $\leq 22$  şeklinde olacak şekilde üretimi gerçekleştirecek koşulları belirleyebilmektir. Belirlenen kontrol edilebilir parametrelerin farklı parametre değerlerinde tam faktöriyel bir deney tasarımı ile üretim deneyleri gerçekleştirmek işletme için hem zaman kaybedici hem de imkânsız olduğundan, Taguchi deney tasarımı tekniği ile daha düşük sayıda deney üretim devam ederken gerçekleştirilmiştir. Deneyler için L27(3<sup>7</sup>) ortogonal deney tasarım planı belirlenmiş üretim faktörlerinin farklı seviyeleri dikkate alınarak hazırlanmıştır. Üretim faktörleri üç seviyede değerlendirilmiş ve optimum üretim koşulları  $A_1B_3C_2D_3E_2F_2G_2$  olarak belirlenmiştir. Ayrıca Taguchi yönteminin tahminlerinin gerçekleştiği doğrulama sonuçları %95 güven aralığında doğrulanmıştır. Düşük zayıflama değerlerini elde edebilmemiz için belirlenen optimum proses parametreleri,

- 18 °C Ortam Sıcaklığı
  - 3,0-6,0 mm Excess Uzunluğu
  - Orta kalite PBT
  - Yüksek Kalite Thixojel
  - 80 mm Hatve Uzunluğu
  - 185-190 °C Extruder Sıcaklığı
  - 2,0-2,5 bar Çekme Kuvveti
- olarak belirlenmiştir.

Optimum üretim koşullarında fiber zayıflama değerlerinde ortalama olarak %8,5 oranında bir iyileştirme elde edilmiştir. Bu oran ilk aşamada oldukça başarılı bir sonuçtur. Çünkü mevcut üretimde 1550 nm dalga boyunda fiber zayıflama değerleri 24 olan kablolarda,  $\leq 22$  şeklinde olacak şekilde üretim gerçekleştirilebilmektedir. Ancak

yeterli değildir. Bu sebepten dolayı, kontrol edilemeyen parametrelerin etkisinin araştırılması, bunun yanında daha fazla kontrol edilebilir parametre ve seviyeleri ile sürecin daha fazla iyileştirme ile devam ettirilmesi amaçlanmaktadır.

Bu çalışmanın, fiber optik kabloların üretim sürecinin optimize edilerek daha düşük zayıflama değerlerine sahip kabloların üretiminin gerçekleştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Böylelikle, hatalı ürün israfının önüne geçilecek, zaman ve kaynak tasarrufu sağlanacaktır. Bu çalışma, benzer diğer reel üretim sektörleri için bir örnek olması umulmaktadır. Gelecekte, faktörlerin ve seviyelerin sayısı yeniden gözden geçirilerek çalışmanın boyutunun artırılması ve sonuçların yeniden değerlendirilmesi öngörülmektedir.

## Teşekkür

Makale Yazarlarının, çalışmaya katkıları şöyledir; İ.K. fikrin oluşması, tasarımın yapılması, deney sonuçlarının elde edilmesi ve taslak makalenin yazımı, S.D. elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, kullanılan metot ve sonuçların analizi ve incelenmesi ve Ö.F.G. ise literatür taraması, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

## Kaynaklar

- [1] Hanson DC., Brown W, Garvey S, Girot GF, Heldt E. Integrated Transducer Modules, Connectors and Cable For Industrial Fiber Optic Data Links. IEEE Trans Commun 1978; 26(7): 1068-1076.
- [2] Oestreich UHP. Fiber optic aerial cables. Fiber and Integrated Optics 1982; 4(1): 95-106.
- [3] Boyan F. Fiber Optik Kablo Nedir? Nasıl Çalışır? Multimode ve Singlemode Fiber Optik Kablolar 2024; <https://www.firatboyan.com/multi-single-mod-fiber-optik-kablo.aspx>
- [4] Aydemir G, Ferikoglu A, Odabaş C, Beyhan Z. Optik Fiber İletişim Sistemlerinin Özellikleri. Sakarya University Journal of Science 2003; 7(2): 178-184.
- [5] Vieira FR, Romero Luna CM, Arce G, Àvila I. Optimization of slow pyrolysis process parameters using a fixed bed reactor for biochar yield from rice husk. Biomass&Bioenergy 2020; 132:105412.
- [6] Hossain MY, Liang Y, Pervez MN, et al. Efuient-free deep dyeing of cotton fabric with cacao husk extracts using the Taguchi optimization method. Cellulose 2021; 28, 517-532.
- [7] Özel S, Vural E, Binici M. Optimization of the effect of thermal barrier coating (TBC) on diesel engine performance by Taguchi method. Fuel 2020; 263, 116537.
- [8] Vairamuthu J, Kumar AS, Stalin B, Ravichandran M. Optimization of powder metallurgy parameters of TiC- and B4C-reinforced aluminium composites by Taguchi method. T Can Soc Mech Eng 2020; 45:2, 249-261.
- [9] Frifita W, Salem SB, Haddad A, Yaltese MA. Optimization of machining parameters in turning of Inconel 718 Nickel-base super alloy. Mechanics & Industry 2020; 21:2, 203.
- [10] Çelik M. Ezerek Parlatma Yönteminin Inconel 718 Alaşımının Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 35(1), 333-42.
- [11] Çelik N. FDM Takviyeli Bir Kan Taşıma Kabındaki Sıcaklık Değişiminin Taguchi Tekniği ile Optimizasyonu. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 30(3), 169-73.
- [12] Arıcı E, Keleştemur O. Tufal Katkılı Harçların Basınç Dayanımının Taguchi Metodu ile Analizi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 30(3), 145-51.
- [13] Özay Ç, Ballıkaya H, Altuğ M, Savaş V, Sağlam M. Teğetsel Silindirik Taşlama Yönteminde İşleme Parametrelerinin Titreşim Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 30(1), 311-7.
- [14] Şap S. AISI 5140 Çeliğinin Farklı Soğutma Teknikleri Kullanılarak Frezelenmesinin Güç Tüketimi Üzerine Etkileri. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 35:3, 13-320.
- [15] Jou YT, Lin WT, Lee WC, Yeh TM. Integrating the Taguchi method and response surface methodology for process parameter optimization of the injection molding. Applied Mathematics & Information Sciences 2014, 8(3), 1277.
- [16] Mohd Arif N. and Ehsan A. Sensitivity optimization of U-shaped fiber optics based on the Taguchi method. OSA Continuum 2021; 4, 2024-2035.
- [17] Lin TY. Design considerations for multi-fiber ferrule manufacturing. Optical Fiber Technology 2006; 12(3), 255-261.
- [18] Mudgal N, Choure KK, Falaswal MK, Pandey R, Agarwal A, Bhatia D, Saharia A, Sahu S, Singh G. Impact of Taguchi Optimization in Fiber Surface Plasmon Resonance Sensors Based on Si3N4 Layer. Braz J Phys 2022; 52(3), 80.
- [19] Menon PS and Apte PR. Taguchi optimization of the peak lasing power of a numerically-simulated double wafer-fused InP/GaAs LW-VCSEL Optoelectron. Adv Mater Rapid Commun 2015; 9(1-2), 40-47.
- [20] Boydak S., Yücel M. Fiber Optik Kabloda Meydana Gelen Raman Saçılmasının Analizi. Politeknik Dergisi 2017; 20(2), 257-265.
- [21] Özdamar O and Demirel A. Manufacture of Large-Diameter Fiber Optic Cable by Extrusion Method and Improvement of Process Parameters. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2019; 17, 718-726.
- [22] Eser E, Uğurlu M. Fiber Optik Kablolarda Hat Birleştirme Hataları ve Kayıplara Olan Etkileri. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi 2017; 6(3), 55-65.
- [23] Hatipoğlu A, Günaydın AC, Fidanboylu K. Fiber Optik Sensörlerin Helikopter Uçuş Test Enstrümantasyonunda Kullanımı. Veri Bilimi 2019; 2(2), 25-33.

- [24] Taguchi G, Konishi S. Taguchi methods, orthogonal arrays and linear graphs, tools for quality American supplier institute. American Supplier Institute 1987; 8-35.
- [25] Byrne DM, Taguchi S. The Taguchi approach to parameter design. Quality Progress 1987; 20(12), 19-26.
- [26] Phadke MS. Quality Engineering Using Robust Design. 1st ed. NJ, USA, Prentice-Hall,1989.
- [27] Khan K, Sahai R. An Overview on Taguchi Method. International Journal of Engineering and Mathematical Sciences 2012; 1, 11-18.
- [28] Montgomery DC. Design and Analysis of Experiments 3rd ed. New York, USA, John Wiley&Sons, 1991.
- [29] Taguchi G. Introduction to quality engineering. New York, USA, MacMillan, 1986.
- [30] Vankanti V, Ganta V. Optimization of process parameters in drilling of GFRP composite using Taguchi method. J Mater Res Technol 2014; 3:1, 35-41.
- [31] Yılmaz M, Keskin ME. Determination of Optimal Reading Conditions by Taguchi Method. Academic Platform Journal of Engineering and Science 2019; 7:1, 25-32.
- [32] Krishnaiah K, Shahabudeen P. Applied design of experiments and Taguchi methods. PHI Learning Pvt. Ltd, 2012.
- [33] Roy RK. A Primer on the Taguchi Method (2nd ed.). Society of Manufacturing Engineers, 2010.
- [34] Wackerly DD, Mendenhall W, Scheaffer RL. Mathematical Statistics with Applications (7th ed.). Thomson Learning Inc., 2008.
- [35] Fujikura Ltd. (2024, January 10) FutureGuide®-LWP ITU-T G.652.D (Low(Zero)-Water-Peak Fiber). [https://www.fujikura.co.jp/eng/products/optical/opticalfibers/01/2050061\\_12897.html](https://www.fujikura.co.jp/eng/products/optical/opticalfibers/01/2050061_12897.html)
- [36] AlKaabneh FA, Barghash M, Mishael I. A combined analytical hierarchical process (AHP) and Taguchi experimental design (TED) for plastic injection molding process settings. Int J Adv Manuf Technol 2013; 66, 679-694.