

TAGUCHI YÖNTEMİ İLE POLİMER HAMMADDE KARIŞIM OPTİMİZASYONU

Yasemin GÜNDOĞDU CEYLAN¹, Tülin GÜNDÜZ^{2*}, Hilal ATICI ULUSU³

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Tezsiz Yüksek Lisans Programı, Bursa.

ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-5595-3058>

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa.

ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-7134-3997>

³Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa.

ORCID No: <http://orcid.org/0000-0001-8347-0806>

| Anahtar Kelimeler | Öz |
|---|---|
| DeneySEL Tasarım, Polimerizasyon, Eğilme Modülü, Izod Darbe Dayanımı, Kopma Uzaması. | <i>Sentetik bir polimer türü olan plastikler, oyuncaktan otomobile beyaz eşyadan inşaata kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Polimerlerin içine polimerizasyon reaksiyonu veya ekstrüzyon prosesi ile farklı katkı ve dolgu malzemeleri koyularak istenen mekanik ve ısıl özelliklere sahip olmaları sağlanmaktadır. Polimer karışımını oluşturan girdilerin miktarı, tipleri ve proses parametreleri elde edilecek olan hammaddenin teknik özelliklerini etkilemektedir. Optimum karışım parametrelerine ulaşabilmek için yapılan fazla sayıda denemeler, zaman, işçilik ve maliyet açısından kaynak tüketimini arttırmaktadır.</i> <i>Bu çalışmada deneysel tasarım(DOE) yaklaşımı kullanılarak polimer hammadde üretimi için optimum karışım parametrelerini sağlayabilecek bir sistem tasarımının yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla Taguchi L9 ortogonal dizisi kullanılarak deney parametreleri belirlenmiş ve plastik parça imalatı yapan bir firmada deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ANOVA ile analiz edilmiştir. Sonuçta, polimer karışımının eğilme modülü, Izod darbe dayanımı ve çekme kopma uzaması özelliklerinin istenen değerlerine etki eden ana maddeler, etkileşimleri, dolgu malzemesi tipleri ve oranları belirlenmiştir.</i> |

POLYMER RAW MATERIAL MIXTURE OPTIMIZATION WITH TAGUCHI METHOD

| Keywords | Abstract |
|--|---|
| Design of Experiments, Polymerization, Flexural Modulus, Izod Impact Strength, Elongation at Break. | <i>The plastics, a synthetic polymer type, are used in many areas such as toys, automobiles, household appliances and construction. It is ensured that the polymers have the desired mechanical and thermal properties by adding different additives and filler materials through polymerization reaction or extrusion process. The amount, types and process parameters of the inputs that make up the polymer composition affect the technical properties of the raw material to be obtained. The time, labor and cost resources consumption increase because of the large number of experiments performed to achieve optimum mixing parameters.</i> <i>In this study, it is aimed to design a system that can provide optimum mixing parameters for polymer raw material production by using design of experiment (DOE) approach. For this purpose, experiment parameters were determined by using Taguchi L9 orthogonal array and experiments were carried out in a company manufacturing plastic parts. The results obtained were analyzed with ANOVA. As a result, the main materials, their interactions, filler material types and ratios that affect the required values for flexural modulus, Izod impact strength and elongation at break of the polymer composition were determined.</i> |
| Araştırma Makalesi | Research Article |
| Başvuru Tarihi : 02.07.2020 | Submission Date : 02.07.2020 |
| Kabul Tarihi : 08.12.2020 | Accepted Date : 08.12.2020 |

*Sorumlu yazar; e-posta : tg@uludag.edu.tr

1. Giriş

İşletmelerin rekabetçilerine göre tercih edilebilmeleri için düşük maliyet ile yüksek kaliteli ürünlerini sunabilmeleri gerekmektedir. Ürün kalitesinin iyileştirilmesi için istatistiksel teknikler kullanılır. Bu teknikler arasında en fazla kullanılanları ise istatistiksel kalite kontrol, deneysel tasarım ve numune kabulüdür. Bu tekniklerin yanında kalite problemlerini analiz etmek ve prosesin performansını geliştirmek için birçok istatistiksel ve analitik araçlar da kullanılabilir. Bir ürün veya hizmetin oluşturulduğu süreç; makine, malzeme, yöntem ve insan gibi kaynakların kullanıldığı ve amacı belirli bir çıktıyı elde etmek olan faaliyetler dizisidir. Bir sürecin elemanları girdi, çıktı ve süreci etkileyen kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörlerdir (Montgomery, Jennings ve Pfund, 2011). Örneğin, bir imalat sürecinde kontrol edilebilen faktörler sıcaklık, basınç, besleme hızı vs. olabilir iken kontrol edilemeyen faktörler ise çevre koşulları veya dışarıdan tedarik edilen hammaddenin özellikleri olabilir.

Deneysel tasarım, bir süreçteki kalite karakteristiklerini etkileyen değişkenlerin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Böylece süreçten beklenen performans ya da ilgili kalite karakteristiklerinin optimum seviyesi belirlenmekte ve sürecin kalitesi iyileştirilmektedir (Montgomery ve diğ., 2011). Deneysel tasarım özellikle üretim süreçlerinin geliştirilmesi, yeni ürün tasarımı, formülasyon geliştirme, proses optimizasyonu alanlarında birçok sektör tarafından kullanılmaktadır. Fazla kaynak (zaman, malzeme, personel, ekipman vs.) tüketimi olmadan deneysel çalışmanın yapılmasına ve sonuçların yorumlanıp tüm faktör etkilerinin görülmesine olanak sağlamaktadır.

Deneysel tasarım, mevcut veya yeni bir ürünün özelliklerini geliştirme adımlarını kapsayan mühendislik tasarımında da çok önemlidir. Mühendislik tasarımında deneysel tasarım kullanılan bazı uygulamalar şu şekildedir:

- Farklı tasarımların karşılaştırılması ve değerlendirilmesi,

- Alternatif malzemelerin değerlendirilmesi,
- Robust ürün elde etmek için tasarım girdilerinin seçilmesi,
- Ürün performansını etkileyen ana parametrelerin belirlenmesi,
- Yeni ürün formülasyonları (Montgomery, 2013).

Deneysel tasarımda, sürece etki eden faktörler değiştirilerek, elde edilen sonuçların kalite karakteristiğine etkileri değerlendirmeye çalışılır. Tasarımın başarısı toplanan verilerin doğruluğuna bağlı olduğundan, veriler toplanmadan önce yapılacak deneylerin tasarlanması, verilerin ne şekilde toplanacağı veya her bir deneme için kaç tane gözlem yapılacağı gibi kararların tasarım aşamasında belirlenmesi gerekmektedir. Burada üç temel kavram önem taşımaktadır: tekrarlı, rassallık ve bloklama (Demir, 2004). Tekrarlı, deney hatasını minimuma indirmek ve kalite karakteristiğine etki eden faktörlerin etkisini tam görebilmek amacıyla deneyin birden fazla kez yapılmasıdır. Tekrar sayısı arttıkça deneysel tasarım ile elde edilen sonuçların doğruluğu artmaktadır. Rassallık, planlanan deneylerin ve deneyler sırasında kullanılan operatör, makine, ekipman ve malzemelerin sıralarının rastgele olmasıdır. Bu şekilde belirlenen faktörler dışında çıktıyı etkileyen başka faktörler varsa bunların etkileri minimuma indirilebilmektedir. Başka bir deyişle, deneylerin rassal olarak yapılması, toplanan verilerin birbirinden bağımsız olmasını sağlamaktadır. Bloklama ise, deneyin doğruluğunu ve hassasiyetini artırmak için kullanılan bir yöntemdir. Bir deneyde toplanan verilerin homojen olarak sınıflandırıldığı her bir parçaya blok denir. Her bir blok içinde yapılan denemeler kendi içinde değerlendirilmektedir. Böylece sadece ilgilenilen faktörlerin süreç üzerindeki etkisi tespit edilmektedir (Karşlıoğlu, 2013).

Bir deneysel tasarım çalışmasının adımları Tablo 1'de açıklanmıştır.

Tablo 1
Deneyel Tasarım Adımları

| Bir Deneysel Tasarım Çalışmasının Adımları | |
|--|---|
| Adım 1: Deneyi planla | Bağımlı çıktı değişkenlerinin tanımlanması, çıktı değişkenlerinin ölçülebilen değerlere çevrilmesi, çıktı değişkenlerini etkileyebilecek faktörlerin (bağımsız girdi değişkenleri) tanımlanması, her bir faktör için seviyelerin belirlenmesi, farklı faktörler arasındaki etkileşimin tanımlanması |
| Adım 2: Deneyi tasarla | Çıktı olan kalite karakteristiğine etki eden girdi değişkenlerinin (faktör) ve bu değişkenliklerin farklı seviyelerine göre deneyin tasarlanması, deneyin aynı koşullarda yapılacak tekrar sayısının belirlenmesi |
| Adım 3: Deneyi yap | Girdilerin belirlenmiş seviyelerinde farklı kombinasyonlarına göre deneyin yapılması |
| Adım 4: Deney verilerini analiz et | Deney sonuçlarının kullanılan analiz programları (Minitab, Statistica, SPSS, SAS, Design-Expert, Statgraphics, Prisma vb.) ile analiz edilmesi |
| Adım 5: Deney sonuçlarını onayla | Analiz sonucu belirlenen deney koşulları ve sonuçlarının gerçek koşullarda denenip programın elde ettiği sonuca ne derece ulaştığının belirlenmesi |
| Adım 6: Deney sonuçlarını değerlendir | Çıkan sonuçların ekonomik olarak yorumlanması |

Deneyel tasarım imalat sektöründe plastik enjeksiyon parametrelerinin ürün üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Kamaruddin, Khan ve Foong, 2010 yılında yaptıkları çalışmalarında, %75 polipropilen (PP) ve %25 düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) karışımından üretilen plastik tepsinin çekme dayanımı üzerinde enjeksiyon parametrelerinin etkisini Taguchi yöntemi kullanarak belirlemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, düşük çekme değerlerine ulaşabilmek için proses parametrelerinden erime sıcaklığı ve tutma basıncının düşük, enjeksiyon basıncı ve tutma-soğuma süresinin yüksek olması gerektiği bulunmuştur. Tang, Tan, Sapuan, Sulaiman, İsmail, ve Samin (2007) ise bir test kalıbı üzerinde enjeksiyon parametrelerinin parça çarpılma değerlerine olan etkisini Taguchi yöntemi ile incelemişlerdir. Çarpılma üzerinde etkili olan faktörler; eriyik sıcaklığı, doldurma zamanı, ütüleme basıncı ve ütüleme süresi olarak belirlenirken, her bir faktör için üç seviye tanımlanmıştır. Yapılması gereken deney sayısı $3^4=81$ iken Taguchi L9 ortogonal dizini kullanılarak yapılan deneyel tasarım çalışması ile 9 deney yapılmış, minimum çarpılmayı sağlayan optimum şartlar belirlenmiştir.

Kompozit malzemelerin üretimi ve kullanımı aşamasında bazı etkilerin belirlenmesi için de Taguchi yöntemi kullanılmaktadır. Plastik

hammaddeye sahip kompozit vida kullanılarak vida ömrünün incelendiği bir çalışmada (Özbakış, Erzincanlı ve Şahin, 2020) deneylerde iki farklı vida türü (plastik ve sac), üç farklı sıkma torqu ve üç farklı vida çeşidi kullanılmıştır. Taguchi L18 dizini kullanılarak oluşturulan deney parametreleri ile 18 adet deney yapılarak vida ömrü değerleri elde edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda vida ömrü üzerinde en etkili parametrenin vida çeşidi olduğu ve her parametrenin hangi seviyesinin vida ömrünü en iyi etkilediği bulunmuştur. Kompozit bir malzemenin çekme dayanımının incelendiği bir çalışmada, kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği parametrelerinin farklı seviyelerinde Taguchi L27 dizini ile tormalama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerin sonucunda, polyester malzemeye cam elyaf eklenmesinin çekme dayanımını arttırdığı görülmüştür (Türkan, 2019).

Proses parametrelerinin incelenmesinin yanı sıra kompozitlerin karışım oranlarının belirlenmesi de deneyel tasarım yardımıyla yapılabilmektedir. Geri dönüşümlü polipropilen (rPP) bazlı kompozitlerin mekanik özelliklerini optimize etmek amacı ile deneyel tasarımın kullanıldığı bir çalışmada (Zheng, Gu, Ren, Hall ve Miles, 2017), kontrol edilebilen faktörler orijinal polipropilen (PP), talk ve maleik anhidrit grafted polipropilen (MAPP) yüzdeleri olarak belirlenmiştir. Üç seviyeli olarak belirlenen bu

faktörler ile Taguchi L9 ortogonal dizini kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş, ANOVA ve sinyal/gürültü oranı (en büyük en iyi) ile analiz yapılmıştır. Talkın, çekme modülü ve eğilme modülüne, orijinal PP'nin ise çekme mukavemeti ve eğilme mukavemetine etki ettiği, ayrıca orijinal PP - MAPP ve talk - MAPP arasında etkileşim olduğu tespit edilmiştir. Mohd, Roslan ve Baba (2016) ise yüksek mukavemet ve düşük çekme özellikleri gösteren geri dönüşümlü akrilo nitril bütadien stiren (r-ABS) ve orijinal ABS karışımına enjeksiyon proses şartlarının etkisini incelemiştir. Üç seviyeli üç faktör ile L9 ortogonal dizini kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, yüksek eriyik sıcaklığı ve yüksek enjeksiyon basıncının daha az çekmeye neden olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada, polimer karışım formüllerinin geliştirilmesinde deneysel tasarım uygulaması yapılarak optimum girdi tipleri ve oranlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Deneysel tasarım tekniklerinden Taguchi yöntemi kullanılmış, plastik hammaddenin eğilme, çekme ve Izod darbe dayanımı özellikleri dikkate alınarak optimum karışım parametreleri belirlenmiştir. Yapılan çalışma ile, polimerizasyonda katkı ve dolgu malzemelerinin tipi ve katkı oranları dikkate alınmıştır. Bu konuda Taguchi deneysel tasarım yönteminin kullanılmasıyla az sayıda ve etkili deneyler planlanmış, bu deneylerin gerçekleştirilmesiyle elde edilen optimum karışım parametresi seviyelerine göre ise istenen kalitede polimer ürünün elde edilmesi sağlanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde deneysel tasarım uygulamasında kullanılan malzeme ve ekipmanlar ile deney aşaması anlatılmıştır. Üçüncü bölümde yapılan deneylerin tüm sonuçları açıklanmış ve analiz edilmiştir. Son bölümde ise çalışma genel olarak özetlenerek sonuçlar yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Taguchi Yöntemi

İlk olarak 1920'lerde Ronald A. Fisher'in kullandığı deneysel tasarım yöntemi baz alınarak daha sonraları kısmi faktöriyel deneysel tasarım geliştirilmiştir (Roy, 2001). Literatürde deneysel tasarım, faktöriyel tasarım olarak da bilinmektedir. 1980'lerde Genichi Taguchi ilk olarak bir robust parametre tasarımı (RPD) problemini geliştirmiştir. RPD, proses veya üründe istenen çıktıya ulaşmak ve

bu çıktının değişkenliğini minimum tutmak amacıyla kontrol edilebilen faktörlerin ilgili seviyeleri ile yapılan proses veya ürün deneysel çalışmaları olarak tanımlanmıştır (Montgomery, 2013).

X seviye sayısını ve k faktör sayısını göstermek üzere X_k olarak tanımlanan bir tasarımda toplamda X_k adet deney yapılması gerekmektedir. Fakat tam veya kısmi faktöriyel tasarımlar kullanılarak daha az sayıda deney yapılabilmektedir. Taguchi, Latin ortogonal dizinlerden yararlanarak deneylerde kullanılacak ortogonal dizinler hazırlamıştır. Lz ortogonal dizininde z deney sayısını temsil etmektedir. Örneğin, iki seviye üç faktör için L4, iki seviye 15 faktör için L16, üç seviye dört faktör için L9 ortogonal dizinleri kullanılmaktadır (Roy, 2001).

Kısmi faktöriyel ile yapılan deneylerin tam analizi için Taguchi tarafından iki yöntem önerilmektedir:

1. Sonuçların güvenilirliği varyans analizi (ANOVA) ile belirlenir. Analiz kontrol edilebilen faktörlerin ve gürültü faktörlerinin varyansının belirlenmesini ve birbirleri arasındaki etkileşimlerin belirlenmesini sağlar.
2. Gürültü/sinyal oranı (Signal to noise ratio, S/N); çıktı kalite karakteristiğinin gürültü faktörlerine olan hassasiyetini gösterir (Roy, 2010).

Kalite yönünden üç tip S/N sınıfı bulunmaktadır (Taguchi, Chowdhury ve Yui, 2005):

1. En küçük en iyi; örneğin plastik parçalarda minimum çekme istenmesi
2. Nominal en iyi; örneğin parça boyunun en düşük varyans ile nominal boyda olması
3. En büyük en iyi; örneğin parçanın kullanım süresi

2.2 Malzeme ve Ekipman

Yapılan çalışmada, homo polipropilen (HPP, 230 0C, 2,16 kg'da erime akış hızı (MFR): 24 g/10 dk), co polipropilen (co-PP, 230 0C, 2,16 kg'da MFR:15 g/10 dk) ve üç farklı tip dolgu (2µ kaplı kalsit, 1,3 µ çaplı talk ve 5 µ çaplı talk) kullanılmıştır. Dolgu seçiminde PP için en fazla kullanılan dolgular seçilmiştir. Kullanılan polimer ve dolgular Tablo 2'de görülmektedir. Çalışmada kullanılan polimerler satın alındığı için polimer oranları ticari sır niteliği taşımakta, bu nedenle kopolimer içeriği paylaşılmamaktadır.

Tablo
Deneysel Çalışmada Kullanılan Polimer ve Dolgular

| Girdiler | Tip | Özellik |
|------------|-------------------------|-----------------------|
| Polimerler | Homo polipropilen (HPP) | Akışkanlık, MFR: 24 g |
| | Co polipropilen (co-PP) | Akışkanlık, MFR: 15 g |
| Dolgular | Kaplı kalsit | Çap: 2 μ |
| | Talk | Çap: 1,3 μ |
| | Talk | Çap: 5 μ |

Deneyler laboratuvar tipi eş yönlü dönen çift vidalı ekstruderde yapılmıştır. Ekstruder çapı 25 mm, L/D oranı ise 44'tür. Ekstruderde toz formundaki dolgu ve katkıların beslenmesi için bir adet yan besleme bulunmaktadır (Şekil 1).

Laboratuvar tipi ekstruder sisteminde hazırlanan numunelere yapılan testler ile ilgili bilgiler Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 1
Laboratuvar Tipi Ekstruder

Tablo 3
Çalışmada Yapılan Testler

| Test | Birim | Standart | Cihaz |
|------------------------------------|-------------------|------------|-----------------------------------|
| Yoğunluk | g/cm ³ | ISO 1183 | Yoğunluk cihazı |
| Akışkanlık Hızı (230°C, 2.16kg) | g/10dk | ISO 1188 | Akışkanlık ölçüm cihazı |
| Katkı Yüzdesi 650°C 3h | % | ISO 3451 | Kül fırını |
| Sertlik | Shore D | ISO 2039-2 | Setlik cihazı |
| Çekme Mukavemeti | MPa | ISO527 | Çekme-basma test cihazı (10kN) |
| Çekme Uzaması | % | | |
| Kopma Mukavemeti | MPa | | |
| Kopma Uzaması | % | | |
| Eğilme Modülü, 23°C | MPa | ISO178 | |
| Eğilme Mukavemeti, 23°C | MPa | | |
| Izod, çentikli 23°C | kJ/m ² | ISO 180 A | Izod Darbe test cihazı |
| Charpy, çentikli 23°C | kJ/m ² | ISO 179 | |
| Vicat 5 kg | °C | ISO 306 | HDT-Vicat test cihazı |
| HDT 1,82 MPa dikey | °C | ISO 75 | |

2.3 Deneysel Çalışma

PP bazlı formül için üç faktör ve her bir faktör için üç seviye belirlenmiştir. Faktörler ve seviyeleri Tablo 4'te verildiği gibidir.

Tablo 4
Deneysel Çalışmada Kullanılan Faktörler ve Seviyeleri

| Faktör | Özellik | Seviye 1 | Seviye 2 | Seviye 3 |
|-----------------|---------|-----------|----------|-----------------------------------|
| Polimer PP tipi | Metin | Homo PP | Co PP | %20 Homo PP + % 80 Co-PP karışımı |
| Dolgu tipi | Metin | 1,3µ talk | 5µ talk | 2,5µ kaplı kalsit |
| Dolgu Oranı (%) | Sayısal | 10 | 20 | 30 |

Belirlenen üç faktör ve her bir faktör için üç seviye göz önüne alındığında, tüm kombinasyonların test edilebilmesi için 33=27 adet deney yapılması gerekmektedir. Taguchi yöntemi ile deneysel tasarım yapılır ise daha az sayıda deney yapılabilir.

Dolayısıyla L9 ortogonal dizini ile 9 adet deney planlanmıştır. Taguchi yöntemi ile planlanan deneylerin listesi Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5
L9 Dizinine Göre Yapılan Tasarım

| Deney no | Polimer PP tipi | Dolgu tipi | Dolgu oranı |
|----------|--------------------------|------------------------|-------------|
| 1 | Homo PP | 1,3 μ talk | 10 |
| 2 | Co PP | 1,3 μ talk | 20 |
| 3 | %20 Homo PP + % 80 Co-PP | 1,3 μ talk | 30 |
| 4 | Co PP | 5 μ talk | 10 |
| 5 | %20 Homo PP + % 80 Co-PP | 5 μ talk | 20 |
| 6 | Homo PP | 5 μ talk | 30 |
| 7 | %20 Homo PP + % 80 Co-PP | 2,5 μ kaplı kalsit | 10 |
| 8 | Homo PP | 2,5 μ kaplı kalsit | 20 |
| 9 | Co PP | 2,5 μ kaplı kalsit | 30 |

Gerçekleştirilen çalışmada, 2019 yılında elde edilen veriler kullanılmıştır. İnsan veya hayvanlar üzerinde deney yapılmadığından Etik Kurul Onayı gerekmemiştir. Çalışmanın hazırlanmasında araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

3. Bulgular

Taguchi L9 ortogonal dizinine göre yapılan tasarımdaki deneyler, işletmede belirtilen ortamda yapılmıştır. Farklı polimer PP tipi, dolgu tipi ve dolgu

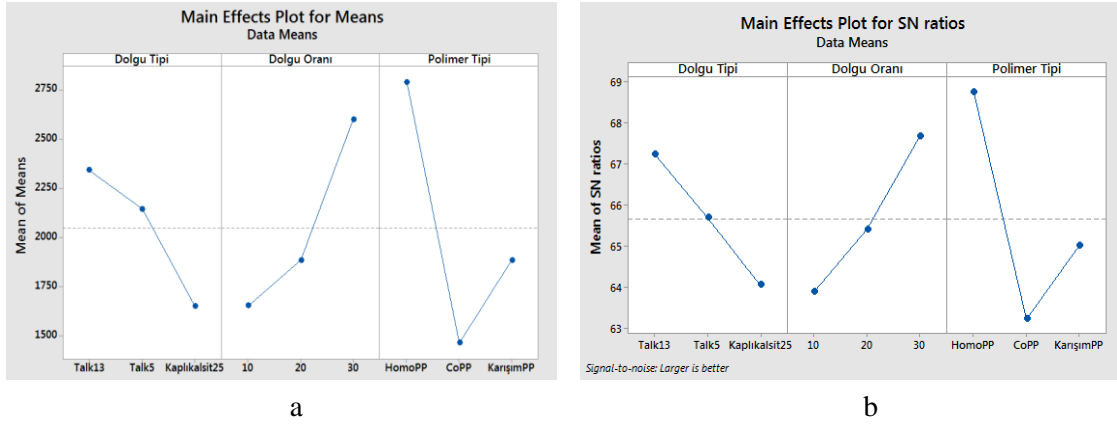
oranı kombinasyonu ile hazırlanan malzemeler önceki bölümde belirtilen testlere tabi tutularak sonuçlar elde edilmiştir. Test sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Veriler Minitab 18.1 yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre plastik hammaddenin mekanik karakteristiklerinin ana girdiler ile değişim (ortalama ve S/N oranlarına göre) ve etkileşim grafikleri oluşturulmuştur.

Tablo 6
L9 Dizinine Göre Yapılan Tasarım için Test Sonuçları

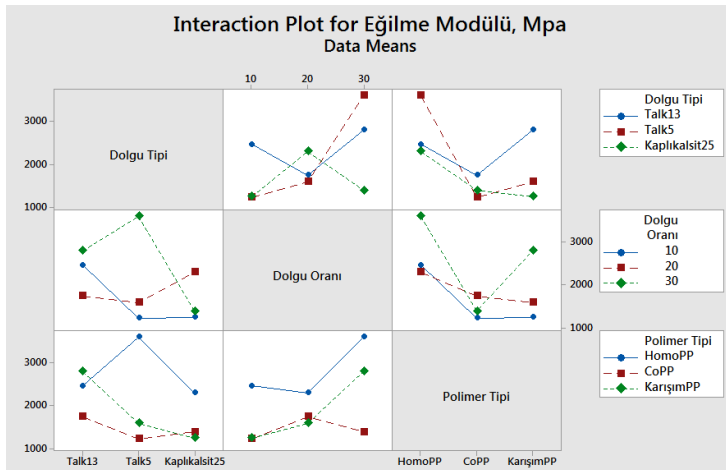
| Deney no | Eğilme modülü (Mpa) | Kopma uzaması (%) | Izod darbe (kJ/m ²) |
|----------|---------------------|-------------------|---------------------------------|
| 1 | 2470 | 9 | 6,5 |
| 2 | 1755 | 55 | 48,4 |
| 3 | 2800 | 15 | 7,6 |
| 4 | 1235 | 76 | 66,4 |
| 5 | 1600 | 55 | 8 |
| 6 | 3600 | 10 | 5,2 |
| 7 | 1255 | 55,5 | 17,8 |
| 8 | 2300 | 20 | 3,5 |
| 9 | 1400 | 40 | 15 |

Eğilme modülünün girdiler ile değişimi Şekil 2'de, etkileşimi Şekil 3'te verilmiştir. Dolgu oranı arttıkça karışımın eğilme modülü değeri artmaktadır. En yüksek eğilme modülü değeri Homo PP ile en düşük değer ise Co PP ile sağlanmaktadır. Eğilme

modülünün farklı dolgu tipleri ile değişimi ise büyükten küçüğe doğru 1,3 μ talk>5 μ talk>2,5 μ kaplı kalsit olarak sıralanmıştır.



Şekil 2. Eğilme Modülünün Girdiler ile Değişimi (a. Ortalama, b. S/N Oranına Göre)



Şekil 3. Eğilme Modülünün Girdiler ile Etkileşimi

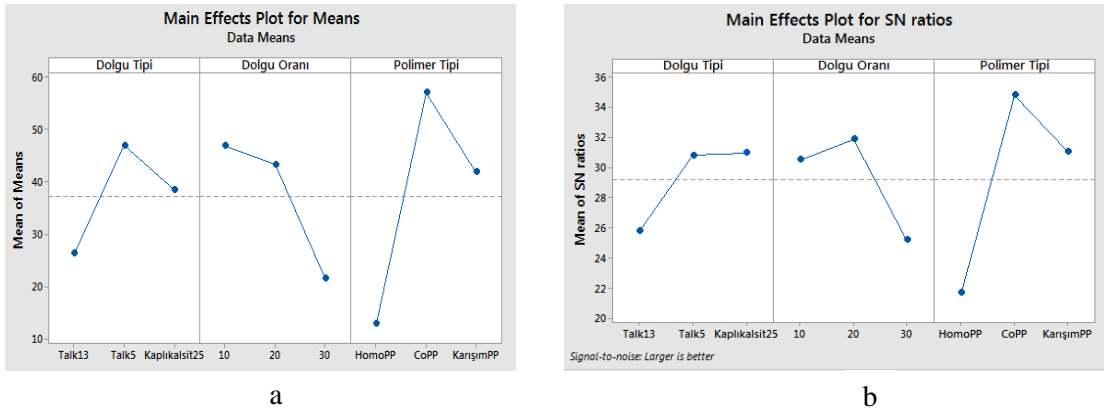
Kopma uzamasının girdiler ile değişimi Şekil 4'de, etkileşimi Şekil 5'te verilmiştir. Dolgu oranı arttıkça karışımın kopma uzaması değeri düşmektedir. En yüksek kopma uzaması değeri Co PP ile en düşük değer ise Homo PP ile sağlanmaktadır. Kopma uzamasının farklı dolgu tipleri ile değişimi ise büyükten küçüğe doğru 5 μ talk > 2,5 μ kaplı kalsit > 1,3 μ talk olarak sıralanmıştır.

Şekil 3'teki eğilme modülünün girdilerle etkileşim grafiğine göre; dolgu tipi - polimer tipi etkileşimi değerlendirildiğinde her 3 tip dolgu için en yüksek eğilme modülü homo PP ile en düşük değer ise co-PP

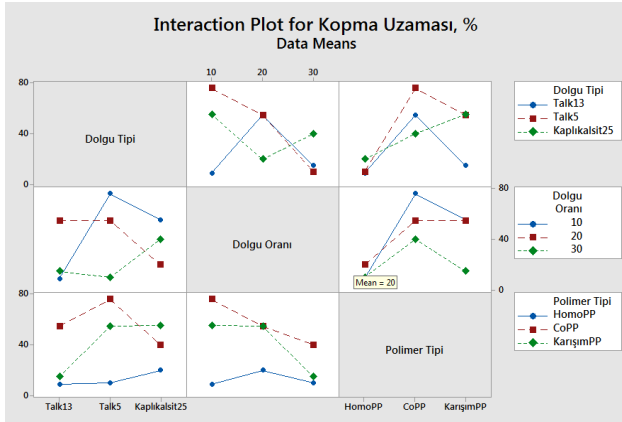
ile sağlanmaktadır. Dolgu tipi - dolgu oranı etkileşimi değerlendirildiğinde; her 3 tip dolgu için %10 dolgu oranı ile en düşük ve %30 dolgu oranı ile en yüksek eğilme modülü elde edilmekte olup en yüksek değer ise Talk 5 (5 μ 'luk talk) ile elde edilmektedir.

%10 dolgu oranı için en yüksek eğilme modülü 1,3 μ talk ile elde edilirken %20 dolgu oranı için 2,5 μ kaplı kalsit, %30 dolgu oranı için ise 5 μ talk ile elde edilmiştir.

Co-PP ve karışım PP için 1,3 μ talk ile yüksek eğilme modülü elde edilirken, Homo PP için 5 μ talk ile yüksek eğilme modülü elde edilmiştir.



Şekil 4. Kopma Uzamasının Girdiler ile Değişimi (a. Ortalama, b. S/N Oranına Göre)

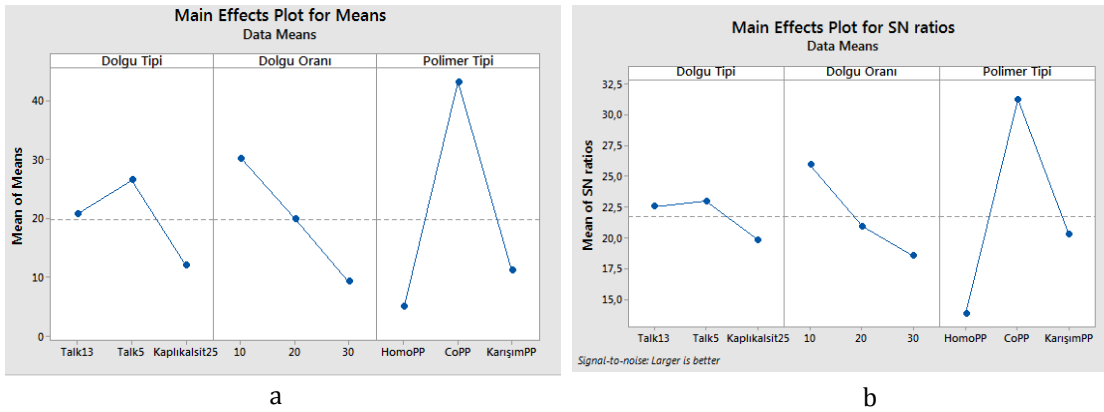


Şekil 5. Kopma Uzamasının Girdiler ile Etkileşimi

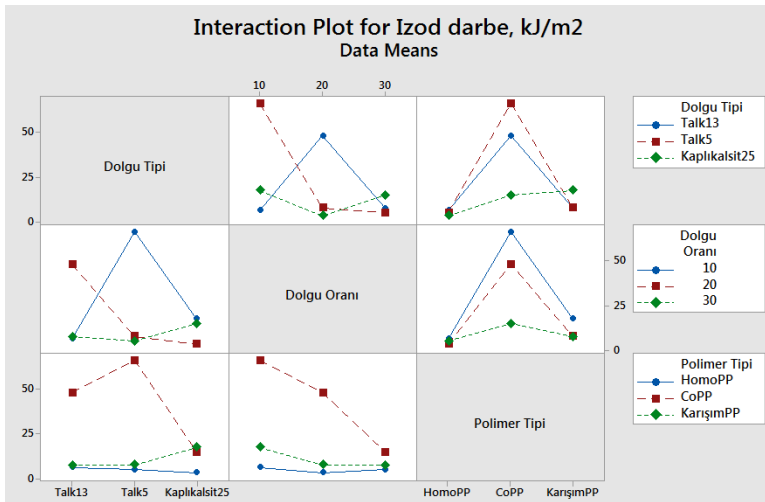
Izod darbe dayanımının girdiler ile değişimi Şekil 6'da, etkileşimi Şekil 7'de verilmiştir. Dolgu oranı arttıkça karışımın darbe dayanımı değeri düşmektedir. En yüksek darbe dayanımı Co PP ile en düşük değer ise Homo PP ile sağlanmaktadır. Darbe dayanımının farklı dolgu tipleri ile değişimi ise büyükten küçüğe doğru 5 μ talk \approx 1,3 μ talk > 2,5 μ kaplı kalsit olarak sıralanmıştır. Etkileşim grafiklerine göre ise, deney faktörleri arasında etkileşimin minimum düzeyde olduğu görülmüştür.

Şekil 5'teki kopma uzamasının girdilerle etkileşim grafiğine göre; en yüksek kopma uzaması %10 dolgu oranı ve Co-PP polimeri ile en düşük kopma uzaması %30 dolgu oranı ve Homo-PP ile elde edilmektedir.

Homo PP içeren bir formülde en yüksek kopma uzaması 2,5 μ kaplı kalsit ile elde edilirken, Co-PP içeren bir formülde en yüksek değere 5 μ talk ile ulaşılmaktadır. Karışım polimeri durumunda ise beklendiği gibi 5 μ talk ve 2,5 μ kaplı kalsit ile yüksek kopma uzaması elde edilmektedir. Dolgu oranı %10 ve %20, formül co-PP iken en yüksek kopma uzaması 5 μ talk ile sağlanmaktadır. Dolgu oranı %30 ve formül co-PP iken en yüksek kopma uzaması ise 2,5 μ kaplı kalsit ile sağlanmaktadır.



Şekil 6. Izod Darbe Dayanımının Girdiler ile Değişimi (a. Ortalama, b. S/N Oranına Göre)



Şekil 7. Izod Darbe Dayanımının Girdiler ile Etkileşimi

Şekil 7'deki Izod darbe dayanımının girdilerle etkileşim grafiğine göre; en yüksek Izod darbe dayanımı Co-PP polimeri, %10 dolgu oranı ve 5 μ talk ile sağlanmaktadır. Tüm denemelerde en yüksek Izod darbe dayanımı Co-PP ve %10 dolgu oranı ile, en düşük ise darbe dayanımı ise Homo PP ve %30 dolgu oranı ile elde edilmiştir. %10 dolgulu bir sistemde co-PP polimeri ve 5 μ talk ile, %20 dolgulu sistemde co-PP ve 1,3 μ talk ile, %30 dolgulu sistemde co-PP ve 2,5 μ kaplı kalsit (diğer dolgular ile farkı çok az olmak üzere) ile en yüksek Izod darbe dayanım değerine ulaşılmaktadır.

Minitab 18.1 yazılımı ile yapılan Taguchi analizi sonucunda elde edilen ortalama ve S/N oranları

Tablo 7'de özetlenmiştir. Eğilme modülü, kopma uzaması ve Izod darbe dayanımı değerlerinin geliştirilen formülde yüksek olması istendiği için S/N oranı büyük (en büyük en iyi) olan deney seti çalışma için uygundur. Eğilme modülü, kopma uzaması ve Izod darbe dayanımı değerlerini en fazla polimer tipinin, daha sonra ise dolgu oranının etkilediği sonucuna ulaşılmıştır (Anonim, 2018).

Tablo 7

Ortalama ve S/N Oranına Göre Kalite Karakteristikleri Cevap Tablosu

| Faktör/Seviye | Eğilme Modülü (Mpa) | | Kopma Uzaması (%) | | Izod Darbe (kJ/m ²) | |
|------------------------|---------------------|----------|-------------------|----------|---------------------------------|----------|
| | S/N | Ortalama | S/N | Ortalama | S/N | Ortalama |
| Dolgu tipi | | | | | | |
| 1,3µ talk | 67,23 | 2342 | 25,8 | 26,33 | 22,52 | 20,83 |
| 5µ talk | 65,68 | 2145 | 30,81 | 47 | 22,94 | 26,5 |
| 2,5µ kaplı kalsit | 64,08 | 1652 | 30,98 | 38,5 | 19,8 | 12,1 |
| Dolgu oranı, % | | | | | | |
| 10 | 63,85 | 1653 | 30,53 | 46,83 | 25,9 | 30,23 |
| 20 | 65,4 | 1885 | 31,88 | 43,33 | 20,88 | 19,97 |
| 30 | 67,66 | 2600 | 25,19 | 21,07 | 18,49 | 9,27 |
| Polimer PP tipi | | | | | | |
| Homo PP | 68,74 | 2790 | 21,7 | 13 | 13,82 | 5,067 |
| Co PP | 63,21 | 1463 | 34,82 | 57 | 31,22 | 43,26 |
| Karışım | 65 | 1885 | 31,07 | 41,83 | 20,23 | 11,13 |

%95 güvenilirlik seviyesi ile yapılan ANOVA sonucunda çıktılarının her biri için regresyon modelleri ve determinasyon katsayıları

bulunmuştur. Denklem 1'de görülen eğilme modülü için regresyon modelinin R² determinasyon katsayısı 0,9547'dir. Yani bu model eğilme modülünü %95,47 oranında başarıyla tahmin edebilmektedir.

Eğilme modülü (Mpa)

$$\begin{aligned}
&= 2046 + 296 \text{ DolguTipi}_{\text{Talk1,3}} + 99 \text{ DolguTipi}_{\text{Talk5}} - 394 \text{ Dolgu Tipi}_{\text{Kaplukalsit2,5}} - 393 \text{ DolguOranı}_{10} \\
&- 161 \text{ DolguOranı}_{20} + 554 \text{ DolguOranı}_{30} + 744 \text{ PolimerTipi}_{\text{HomoPP}} - 583 \text{ PolimerTipi}_{\text{CoPP}} \\
&- 161 \text{ PolimerTipi}_{\text{KarışımPP}}
\end{aligned} \tag{1}$$

Kopma uzaması için elde edilen regresyon modelinin (Denklem 2) R² determinasyon katsayısı 0,9905'tir.

Kopma uzaması (%)

$$\begin{aligned}
&= 37,28 - 10,94 \text{ DolguTipi}_{\text{Talk1,3}} + 9,72 \text{ DolguTipi}_{\text{Talk5}} + 1,22 \text{ DolguTipi}_{\text{Kaplukalsit2,5}} \\
&+ 9,56 \text{ DolguOranı}_{10} + 6,06 \text{ DolguOranı}_{20} - 15,61 \text{ DolguOranı}_{30} - 24,28 \text{ PolimerTipi}_{\text{HomoPP}} \\
&+ 19,72 \text{ PolimerTipi}_{\text{CoPP}} \\
&+ 4,56 \text{ PolimerTipi}_{\text{KarışımPP}}
\end{aligned} \tag{2}$$

Izod darbe dayanımı için elde edilen regresyon modelinin (Denklem 3) R² determinasyon katsayısı ise 0,8851'dir.

$$\begin{aligned}
Izod\ darbe\left(\frac{kJ}{m^2}\right) = & 19,82 + 1,01\ DolguTipi_{Talk1,3} + 6,71\ DolguTipi_{Talk5} - 7,72\ Dolgu\ Tipi_{Kaplıkalsit2,5} \\
& + 10,41\ DolguOrani_{10} + 0,14\ DolguOrani_{20} - 10,56\ DolguOrani_{30} - 14,76\ PolimerTipi_{HomoPP} \\
& + 23,44\ PolimerTipi_{CoPP} \\
& - 8,69\ PolimerTipi_{KarışımPP}
\end{aligned}
\tag{3}$$

4. Sonuç

Polimer malzemelerden plastik hammadde imalatında karışım oranları ve imalat süreci ile ilgili bazı koşullar son ürünün kalitesini etkilemektedir. Bu alanda en çok kullanılan kalite tekniklerinden biri olan deneysel tasarımda, tam veya kısmi faktöriyel tasarımlar kullanılarak normal şartlarda tüm girdi kombinasyonları denemek için yapılması gereken deney sayısından daha az sayıda deneyle sonuca ulaşılabilir. Bu çalışmada plastik hammadde karışımlarının ve proses koşullarının belirlenmesinde Taguchi yöntemi kullanılarak, hammadde için en önemli kalite karakteristiklerinden olan eğilme modülü, kopma uzaması ve Izod darbe dayanımını etkileyen faktörler araştırılmıştır. L9 ortogonal dizini ile yapılan deneysel tasarım sonrası üç faktör (PP tipi, dolgu tipi ve dolgu oranı) ve her faktöre ait üç seviye kapsamında yapılacak testler belirlenmiş ve son ürünün mekanik ürün karakteristiklerine (eğilme modülü, kopma uzaması ve Izod darbe dayanımı) olan etkiler tespit edilmiştir. Elde edilen regresyon modellerine göre hedef mekanik özellik değerlerine göre karışımda kullanılacak girdiler ve oranları ile ilgili öngörü yapılması mümkün olacaktır.

Bu çalışmada plastik hammadde karışımlarının ve proses koşullarının belirlenmesinde Taguchi yöntemi kullanılarak, hammadde için en önemli kalite karakteristiklerinden olan eğilme modülü, kopma uzaması ve Izod darbe dayanımını etkileyen faktörler araştırılmıştır. L9 ortogonal dizini ile yapılan deneysel tasarım sonrası üç faktör (PP tipi, dolgu tipi ve dolgu oranı) ve her faktöre ait üç seviye kapsamında yapılacak testler belirlenmiş ve son ürünün mekanik ürün karakteristiklerine (eğilme modülü, kopma uzaması ve Izod darbe dayanımı) olan etkiler tespit edilmiştir. Elde edilen regresyon modellerine göre hedef mekanik özellik değerlerine göre karışımda kullanılacak girdiler ve oranları ile ilgili öngörü yapılması mümkün olacaktır.

Bu çalışma kapsamında uygulanan Taguchi yöntemi gelecekte yapılacak formülasyon geliştirme, proses (enjeksiyon, ekstrüzyon, şişirme vb.) parametrelerinin (sıcaklık, hız, mal alma mesafesi vb.) optimizasyonu ve proses parametrelerinin çıktı ürüne etkisi gibi benzer çalışmalarda kullanılabilir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Yasemin GÜNDOĞDU CEYLAN, çalışmanın uygulama kısmının yapılması ve sonuçların yorumlanması, Tülin GÜNDÜZ, çalışmanın yönetilmesi ve kontrol edilmesi, sonuçların yorumlanması, Hilal ATICI ULUSU, literatür araştırması, makalenin yazımı; konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Teşekkür

Çalışmaya katkılarından dolayı BPLAS A.Ş.'ye teşekkür ederiz. Çalışmanın yapılması ve yayınlanması için 26.06.2020 tarihi itibarıyla firmadan izin alınmıştır.

Kaynaklar

- Anonim (2018). Minitab. Erişim adresi: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/taguchi/analyze-taguchi-design/interpret-the-results/key-results/?SID=133050>
- Demir, L. (2004). *İstatistiksel deney tasarımı yöntemi ve bir tekstil işletmesinde uygulanması*. (Yüksek lisans tezi). Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli. Erişim adresi: <http://acikerisim.pau.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/11499/1215/Leyla%20Demir.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Kamaruddin, S., Khan, Z. A. & Foong, S. H. (2010). Application of Taguchi method in the optimization of injection moulding parameters for manufacturing products from plastic blend. *International Journal of Engineering and Technology*, 2(6), 574-580. Erişim adresi : https://www.researchgate.net/profile/Zahid_Khan9/publication/230674219_Application_of_Taguchi_Method_in_the_Optimization_of_Injection_Moulding_Parameters_for_Manufacturing_Products_from_Plastic_Blend/links/0deec53229402a6f62000000.pdf
- Karşlıoğlu, Z. (2013). *Fire analizinde deney tasarımı*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=1zw6GvYMe-q3Hf6HR->

[3USzKCstIIUOpMYC2PcZ5RXZozsJ90Arr7V A3Is6NLd0n](https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i9/88733)

- Mohd, A., Roslan, A.A. & Baba, N.B. (2016). Effect of injection molding parameters on recycled ABS (r-ABS) mechanical properties. *Indian Journal of Science and Technology*. 9(9), 1-6. Doi: <http://dx.doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i9/88733>
- Montgomery, D.C. (2013). *Design and analysis of experiments*, 8th Edition. New York: John Wiley & Sons Inc. Doi: <https://doi.org/10.1002/ep.11743>
- Montgomery, D. C., Jennings, C. L., & Pfund, M. E. (2011). *Managing, controlling and improving quality*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc.
- Özbaşak, Y., Erzincanlı, F., & Şahin, A. (2020). Plastik esaslı kompozit malzemelerde kullanılan bağlantı elemanlarının malzeme ömrü üzerine etkisi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 32(3), 279-286. Doi: <https://doi.org/10.7240/jeeps.647576>
- Roy, R. (2001). *Design of experiment using the Taguchi approach 16 steps to product and process improvement*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Roy, R. (2010). *A primer on the Taguchi method*. society of manufacturing engineers. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Taguchi, G. Chowdhury, S. & Yuin, W. (2005). *Taguchi's quality engineering handbook*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc. Doi: <https://doi.org/10.1002/9780470258354>
- Tang, S.H., Tan, Y.J., Sapuan, S.M., Sulaiman, S., İsmail, N. & Samin, R. (2007). The use of Taguchi method in the design of plastic injection mould for reducing warpage. *Journal of Materias Processing Technology*. 182: 418-426. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.08.025>
- Türkan, C. (2019). *Farklı boyut ve orana sahip CETP kompozitlerin üretimi ve tornalamasının araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman. Erişim adresi: <http://earsiv.batman.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12402/2297>
- Zheng, Y., Gu, F., Ren, Y., Hall, P. & Miles, N.J. (2017). Improving mechanical properties of recycled Polypropylene based composites using Taguchi and ANOVA techniques. *Procedia CIRP*. 61: 287-292. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.137>