

KALİTE GELİŞTİRMEDE DENEY TASARIMI YÖNTEMİ ve OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE BİR UYGULAMA

Yrd. Doç.Dr. Ş. Alp BARAY
*İ.Ü. İşletme Fakültesi
Üretim Anabilim Dalı*

Tuğba SARI
*İ.Ü. İşletme Fakültesi
Sayısal Yöntemler Anabilim Dalı*

ÖZET

Bu çalışmada, üretim kalitesinin yükseltilmesi ve kaliteye ilişkin problemlerin çözülmesinde son zamanlarda etkin olarak uygulanan deney tasarımı yönteminin faydalarını ortaya koyarak, yöntemin kullanımının yaygınlaşmasına katkıda bulunmak hedeflenmiştir.

Çalışmanın teorik bölümünde, deney tasarımı yöntemine ilişkin temel prensipler açıklanmış, uygulama kısmında ise otomotiv yan sanayiinde faaliyet gösteren bir firmada karşılaşılan kaput tutma teli mukavemet problemi ele alınarak, bu probleme deney tasarımı yöntemi aracılığıyla bir çözüm önerisi sunulmuştur. Veri analiz yöntemi olarak ANOVA kullanılmış, optimum sonuçlara ulaşmak için Yanıt Yüzeyi Yöntemi kullanılarak çalışma sonlandırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, ele alınan kalite karakteristiği üzerinde önemli ölçüde iyileşme sağlandığı gözlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: *Deney tasarımı, faktöryel tasarım, yanıt yüzeyi, kalite.*

ABSTRACT

The purpose of this paper is to explain the theory of "Design of Experiment" method and to contribute to use of it more commonly. Design of experiment is a method, which is commonly used to increase manufacturing quality and to solve quality problems especially in large scale manufacturing industries.

In the theoretical part of the paper, the basic principles related to design of experiment is explained. After that, a quality problem in automotive manufacturing industry is hold and a solution to the problem is proposed by using experimental design method. ANOVA is used to analyze the data from the experiment, and at the end, response surface method is

used to find optimum solution to the problem. As a result, an important improvement is achieved on the chosen quality characteristic.

Key Words: *Design of experiment, factorial design, response surface, quality.*

GİRİŞ

Günümüzde, üretim sektöründe hızla artan rekabet ortamı, müşteriye sunulan ürünlerin daha yüksek kalitede ve daha düşük maliyetle üretilmesi zorunluluğunu getirmiştir.

Deney tasarımı, üretimde ürün veya proses kalitesine ilişkin karakteristiklerin değerini istenilen seviyeye getirmek ve bu değer etrafındaki varyasyonu azaltmak için bir deney tasarlanması esasına dayanmaktadır. Bunun için kalite karakteristiğini etkileyen faktörler belirlenmekte ve bu faktörlerin farklı düzeylerini içeren denemeler yapılarak en iyi sonuca ulaşılmaktadır.

Deney tasarımının tarihçesine bakıldığında, çalışmaların başlangıçta biyoloji ve ilgili disiplinlerde, özellikle de tarım, tıp ve psikoloji alanlarında yoğunlaştığı görülmektedir (Mead, 1988, s:4). Deney tasarımının temelleri 1920-1930'lu yıllarda tarımsal alanda yaptığı çalışmalarla Sir Ronald A. Fisher tarafından atılmıştır. Montgomery'ye göre istatistiksel deney tasarımının gelişiminde dört dönem vardır (Montgomery, 2001, s:17):

İlk dönem, Fisher'in zirai deney istasyonunda yaptığı öncü çalışmalardan oluşmaktadır. Fisher, deney tasarımının üç temel prensibi olan rassallaştırma, bloklama ve benzerini oluşturma yöntemini geliştirmiştir. Bundan başka, Fisher, faktöryel tasarım ve varyans analizi gibi istatistiksel kavramları da deney tasarımında kullanmıştır.

Deney tasarımında ikinci ve endüstriyel dönem Box ve Wilson 'm 1951'de Yanıt Yüzeyi Yöntemini (*Response Surface Methodology -RSM-*) geliştirmeleriyle başlamış ve uygulamalar hız kazanmıştır. Böylece endüstriyel deneylerde çabukluk ve sıralılık özellikleri ortaya çıkmıştır (Box, G.E.P., Draper, R.N., 1987).

Batı Endüstrisinde 1970'lerin sonunda başlayan kalite geliştirmeye olan ilgi, istatistiksel deney tasarımının da üçüncü dönemini oluşturmaktadır. Bu döneme Genichi Taguchi'nin çalışmaları damgasını vurmuştur. Taguchi, hem ürün hem de proses tasarımında kaliteyi sağlamak için hedef değerlerde farklılık yaratan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı kontrol edilebilen faktörlerin değerlerini ayarlayarak robust tasarım kavramını ortaya atmıştır (Şirvancı, 1997, s:15).

Dördüncü dönem, deney tasarımına olan ilginin yenilendiği ve endüstriyel alandaki problemlere yeni ve faydalı çözümlerin getirildiği bir dönem olmuştur. Bu dönemle beraber, istatistiksel deney tasarımı eğitimi özellikle ABD Üniversitelerinin birçok mühendislik programının bir parçası olmayı başarmıştır. Mühendislik ve bilime başarıyla entegre edilmiş iyi deney tasarımı uygulamaları, geleceğin endüstriyel yarışında anahtar faktördür.

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde tedarikçi olarak faaliyet gösteren çeşitli otomobil kumanda tellerinin imalatını yapan bir işletmede yaşanan kaput tutma teli mukavemeti problemi ele alınarak deney tasarımı yöntemiyle çözülmeye çalışılmıştır. Problem, MINITAB 14 programı yardımıyla analiz edilerek elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve problemde eskiye oranla ortalama 0,62 oranında bir iyileşme sağlandığı gözlenmiştir.

1. DENEY TASARIMI YÖNTEMİ

Deney tasarımı, ürünün veya üretim prosesinin performansını artırmak için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Moutgomery tasarlanmış deneyi, *"Bir proses veya sistemin girdi değişkenlerinde yapılan amaca yönelik değişikliklerle, prosesin ya da sistemin bu değişikliklere verdiği yanıtlarda (çıktı) oluşabilecek değişikliklerin nedenlerinin gözlemlenip saptanabileceği bir veya bir dizi test"* olarak tanımlamaktadır (Moutgomery , 2001,s:1).

Deney tasarımında, incelenecek ürün veya proses için performans göstergeleri tanımlanmakta ve ardından da bu göstergelerin değişimi incelenmektedir. Bunun için de, önce, kalite karakteristikleri olarak adlandırılan ve söz konusu edilen performans göstergelerini etkileyen uzunluk, genişlik, mukavemet, sıcaklık vb..gibi ölçülebilen özelliklerin yanısıra, malzemenin cinsi, şekli, tedarikçisi gibi ölçülemeyen özelliklerin hangilerinin hedeflenen performansı (yanıtı) elde etmek ve performanstaki (yanıttaki) varyasyonu en aza indirmek için dikkate alınacağı belirlenmelidir.

1.1. Literatür Araştırması

Biyoloji ve tarımsal alanda yapılan ilk çalışmalardan sonra, endüstriyel alanda çalışan araştırmacılar, deney tasarımı prensiplerinin kendi alanlarında yararlı olabileceğini en erken keşfeden gruptur. Konusu insan olan araştırmalarda, özellikle birçok eğitsel yöntemin geliştirilmesinde deney tasarımından yararlanılmaktadır. Tıbbi araştırmalar, örneğin aynı hastalık için kullanılan farklı ilaçların etkilerinin karşılaştırılması, bir diğer çalışma alanıdır. İnsanla ilgili bir başka alan, fizyolojik ve nörobiyolojik veriler sağlayan çalışmalardır. Pazar araştırmalarında da deneysel metotlar kullanılmaktadır (Clarke ve Kempson, 1997).

Son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar deney tasarımının kullanım alanlarını genişletmiştir. Poiini ve Sorrentino (2003) kimya sektöründe gerçekleştirdikleri uygulama ile alüminyum yüzeyin nemliliğini artırmak için kullanılan soğuk plazma tekniğinde deney tasarımından yararlanmışlardır. Montgomery, Keats ve Perry 1999'da elektronik endüstrisinde yüzey yapıştırma teknolojisi için deney tasarımına dayalı proses geliştirme üzerine çalışmalar yapmışlardır. Dessouky ve Bayer (2002) yaptıkları çalışmada, binaların tasarım ve inşaa aşamalarında oluşan maliyetleri azaltmak için deney tasarımı yöntemini kullanmışlardır. Son yıllarda deney tasarımı kullanımına bir başka örnek, proses endüstrisinde mineral köpük yüzdürmede seviye kontrolü için deney tasarımı kullanımındır (Craig ve Koch, 2003).

Literatüre katkıda bulunan son zamanlardaki çalışmalar bir taraftan yanıt yüzeyi yöntemi, diğer taraftan tam ve kesirli deney tasarım yöntemleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunların başlıcaları arasında Peterson (2004), Quesada ve Del Castillo (2004), Robinson, Myers ve Montgomery (2004), Goldfarb, Anderson-Cook, Borrer ve Montgomery (2004), Ortiz, Simpson, Pignatiello ve Langner (2004), Grove, Woods ve Lewis (2004), Mee (2004), Kowalski, Borrer ve Montgomery (2005), Goldfarb, Borrer, Montgomery ve Anderson-Cook (2005), Variyath, Abraham ve Chen (2005), Vining, Kowalski ve Montgomery (2005), W.Myers, Brenneman ve R.Myers (2005), Rajapogal, Del Castillo ve Peterson (2005), Godfrey, Anderson-Cook ve Montgomery (2005), Robinson, T.J., Wulff, S.S., Montgomery, D.C., Khuri, A. (2006), Miller (2005), Ringrose, R., Forth, S.A., (2005), Voelkei (2005), Külahçı ve Bisgaard (2005) 'ın çalışmaları gösterilebilir.

1.2. Deney Tasarımının Aşamaları

Montgomery'ye göre deney tasarımı aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır (Montgomery, 2001, s:14):

1. Problemin Tanımlanması
2. Faktörlerin ve Düzeylerin Seçimi
3. Yanıt Değişkeninin Seçimi
4. Deneyin Tasarlanması
5. Deneyin Gerçekleştirilmesi
6. Verilerin İstatistiksel Analizi
7. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada da aynı aşamalar takip edilecektir.

2. FAKTÖRYEL TASARIMLAR

Tasarlanan bir deney birden fazla faktör içeriyorsa, faktörlerin ve olası etkileşimlerinin yanıt değişkeni üzerindeki etkisini araştırmak için faktöryel tasarımlar kullanılır. Faktöryel bir tasarımda, faktörlerin düzeylerine ait tüm kombinasyonlar incelenmektedir. Faktöryel tasarımlar, bir faktörün etkisinin diğer faktörlerin farklı seviyelerinde ölçülmesine olanak verdiği için daha geçerli sonuçlar üretirler. Bunun yanı sıra, faktöryel tasarımlar her seferde bir faktörün incelendiği deneylere göre de daha etkilidirler. Ayrıca eğer deneyde etkileşim varsa, yanlış sonuçların önlenmesi için faktöryel tasarım kullanmak gereklidir.

Faktöryel deneylerin uygulanmasındaki bir dezavantaj, faktör veya düzey sayısının artması ile beraber işlem kombinasyonlarının sayısındaki hızlı artıştır. Bu durumda pratik çözüm sağlamanın bir yolu kesirli deney uygulamakken, diğer bir yolu da faktör sayısını makul bir sayıda tutarak, her faktörü 2 düzeyle sınırlamaktır. Örneğin iki düzeyli dört faktör içeren tasarım $2^4 = 16$ deneme gerektirirken, aynı faktörler üç düzeyli olarak incelendiklerinde gereken deneme sayısı $3^4 = 81$ olacaktır. Genel ifadesiyle 2^k tasarımlar, kalite geliştirmede gereken deneysel gereksinimlerin büyük bölümünü karşılarken deneyin büyüklüğünü de makul seviyede tutmaktadırlar. Bu sebepten dolayı bu çalışmada 2^3 tasarımı kullanılmıştır.

2.1. 2^3 Faktöryel Tasarımının Oluşturulması

Her biri iki düzeyli A, B ve C faktörlerini içeren 2^3 faktöryel tasarımı, sekiz işlem kombinasyonunu oluşturmakta olup, alt ve üst düzeylerin ' - ' ve ' + ' işaretleri ile belirtildiği tasarım matrisi de bu durumda tablo 1'deki gibi olmaktadır. Ayrıca, tasarım matrisine, hesaplamalarda kombinasyonları temsil edecek (1), a, b, ab, c, ac, bc ve abc notasyonlarını içeren etiket kolonu eklenmiştir. Etiketler, belirli bir kombinasyon için yapılan n sayıda gözlemin toplamını belirtmektedirler.

Tablo 1. Tasarım Matrisi

Deneme	A	B	C	Etiket
1	-	-	-	1
2	+	-	-	a
3	-	+	-	b
4	+	+	-	ab
5	-	-	+	c
6	+	-	+	ac
7	+	+	+	bc
8	+	+	+	abc

2^3 tasarımında A, B, C ana etiketlerinin yanı sıra, AB, AC, BC ve ABC etkileşimleri de incelenmektedir. Faktörlerin ve etkileşimlerin ortalama etkileri şu eşitliklerle hesaplanmaktadır (Montgomery, 2001, s: 228) :

$$A = 1/4n [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] \quad (1)$$

$$B = 1/4n [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] \quad (2)$$

$$C = 1/4n [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] \quad (3)$$

$$AB = 1/4 [abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)] \quad (4)$$

$$AC = 1/4 [(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc] \quad (5)$$

$$BC = 1/4 [(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc] \quad (6)$$

$$ABC = 1/4 [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)] \quad (7)$$

Yukarıdaki etki hesaplarını gösterir eşitliklerdeki köşeli parantezlerin içi işlem kombinasyonlarındaki *kontrastlar*'dır. Kontrastlar hem etki tahminlerinde ve hem de etkilerin karelerinin toplamını bulmada kullanılırlar (Montgomery ve Runger, 1999, s:650). Deneyin, etki hesaplamasından sonraki aşaması, etkilerin karelerinin toplamının bulunmasıdır. n tekrarlı 2^3 tasarımı için etkilerin karelerinin toplamı

$$SS = \frac{(Kontrast)^2}{8n} \quad (8)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

2.2. 2^3 Tasarımında Verilerin Analizi

Düzeltilmiş genel kareler toplamı (SS_T) aşağıdaki eşitliklerle bulunur:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n \left[y_{ijkl}^2 - \left(\frac{y_{\dots}}{abcn} \right) \right] \quad y_{\dots} = \sum y \quad (9)$$

Hata kaynaklı kareler toplamı da aşağıdaki gibidir:

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{BC} - SS_{AC} - SS_{ABC} \quad (10)$$

Bulunan her bir kareler toplamı değeri, kendi serbestlik derecesine bölünerek kare ortalamaları (*mean square*) hesaplanır. Buna göre şu sonuçlar elde edilir:

$$MS_A = SS_A / (a-1) \quad (11)$$

$$MS_B = SS_B / (b-1) \quad (12)$$

$$MS_C = SS_C / (c-1) \quad (13)$$

$$MS_{AB} = SS_{AB} / (a-1)(b-1) \quad (14)$$

$$MS_{AC} = SS_{AC} / (a-1)(c-1) \quad (15)$$

$$MS_{BC} = SS_{BC} / (b-1)(c-1) \quad (16)$$

$$MS_{ABC} = SS_{ABC} / (a-1)(b-1)(c-1) \quad (17)$$

$$MS_E = SS_E / abc(n-1) \quad (18)$$

Kare ortalamalarının, hataların karelerinin ortalamasına bölünmesi ile F değerleri hesaplanır. Deneye dahil edilen etkilerin önem derecesini gösterecek olan değer F değeridir. F değeri, istatistiksel tablolar kullanılarak veya hazır bilgisayar programları yardımıyla P değeri karşılığından bulunur.

Düşük P değeri etkinin önemli olduğunu ve dikkate alınması gerektiğini gösterir. P değerinin ne kadar düşük olması gerektiği deneyin hassasiyeti ile ilgili olmakla beraber genellikle 0,05 değeri iyi bir referans olarak kabul edilir (Sutherland ve Soares, 2003, s: 6).

Tüm hesaplamaları Tablo 2'deki ANOVA tablosundaki gibi özetlemek mümkündür.

Yanıt üzerinde hangi faktörlerin ve faktör etkileşimlerinin önemli olduğu belirlendikten sonra, bu faktörlerin optimum düzeyleri belirlenmelidir. Regresyon analizi ve yanıt yüzeyi yöntemi, probleme dahil edilen alanı tarayarak üç boyutlu grafik yardımıyla optimum çözümü vermektedir.

3. YANIT YÜZEYİ YÖNTEMİ (RESPONSE SURFACE METHOD)

Yanıt Yüzeyi Yöntemi (RSM) aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır (Khuri ve Cornell, 1996, s:3) :

1. İstenilen yanıtın yeterli ve güvenilir ölçümlerini veren bir dizi deneyin tasarlanması ,
2. Model parametreleri göz önüne alınarak oluşturulan uygun hipotez testleri aracılığıyla, 1. adımdaki tasarımdan toplanan verilere en iyi uyan matematiksel modelin belirlenmesi,
3. Hedeflenen yanıt değerini üretecek şekilde, deneye dahil edilen faktörlerin optimum değerlerinin saptanması.

Yöntemin anlaşılabilirliği ve takip edilebilirliğindeki en etkili iki araç ise kontur çizimleri ile yanıt yüzeyi çizimleridir.

Yanıt yüzeyi 1. veya 2. dereceden olabilir. Genel olarak 1. derece model:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (19)$$

Tablo 2. Üç Faktörlü Sabit Etkili Model için ANOVA tablosu

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kare Ortalaması	F
A	SS _A	a-1	MS _A	F = MS _A / MS _E
B	SS _B	b-1	MS _B	F = MS _B / MS _E
C	SS _C	c-1	MS _C	F = MS _C / MS _E
AB	SS _{AB}	(a-1)(b-1)	MS _{AB}	F = MS _{AB} / MS _E
AC	SS _{AC}	(a-1)(c-1)	MS _{AC}	F = MS _{AC} / MS _E
BC	SS _{BC}	(b-1)(c-1)	MS _{BC}	F = MS _{BC} / MS _E
ABC	SS _{ABC}	(a-1)(b-1)(c-1)	MS _{ABC}	F = MS _{ABC} / MS _E
Hata	SS _E	abc(n-1)	MS _E	
Toplam	SS _T	abcn-1		

Kaynak: Montgomery, 2001, s:195

2.derece model ise

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{j=1}^n \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j} \sum_i \beta_{ij} x_i x_j \quad (20)$$

ifadeleriyle gösterilirler. Buradaki β değerleri önceden bilinmeyen katsayıları ifade etmektedirler.

Tasarlanmış deneylerin yanıt yüzeyi yöntemiyle analiz edilmesinde deney amacına uygun olarak farklı tasarımlar kullanılabilir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan ikisi Bileşik Merkezi Tasarım (*Central Composite Design -CCD-*) ve Box-Behnken Tasarımı (*Box-Behnken Design -BBD -*)'dir.

Bu çalışmada, veriler bileşik merkezi tasarım yöntemi (CCD) ile analiz edilmiştir. Box ve Wilson (1951) tarafından sunulan CCD yöntemi, 2^k tasarımına merkez noktaların eklenmesini içerir. CCD üç bileşenden oluşmaktadır (Berger ve Maurer, 2002, s:427). Bunlar :

1. Ana etkileri ve 2'li faktör etkileşimlerinin tahminini veren 2 düzeyli bir faktöryel tasarım,
2. Diğer iki bileşenle beraber karesel terimlerin tahmin edilmesine yardım eden bir eksensel tasarım ve
3. Yüzey eğimini daha doğru tahmin etmeye yarayan bir dizi merkez nokta.

CCD'nin kullanımındaki esneklik alanı, eksensel mesafe α 'nın seçimi ve merkez noktaların n_c sayısına bağlıdır. Tasarım merkezindeki bir nokta için $\alpha = F^{1/4}$ olup, burada F genellikle 2^k olarak alınır. Dolayısıyla $k=2$ için $\alpha = (2^2)^{1/4} \approx 1,41421$ ve $k = 3$ için de $\alpha = (2^3)^{1/4} \approx 1,68179$ 'dur (Montgomery ve Runger, 1999, s:715).

4. UYGULAMA

Uygulama çalışması, otomotiv endüstrisinin bir tedarikçisi olarak, çeşitli otomobil kumanda kontrol tellerinin imalatını yapan bir işletmede gerçekleştirilmiştir.

4.1. Problemin Belirlenmesi

Firmanın tel üretiminde yaşadığı problemler incelenerek ve karşılıklı görüşmeler sonucunda deneyin tekrarlanmasına olanak tanıyan ve ölçülebilen sonuçlar verebilecek bir problem olarak kaput tutma tellerinin mukavemet değerleri belirlenmiştir. Üretilen kaput tutma tellerinin bir kısmı kaputun ağırlığına dayanamayarak bağlantı yerlerinden kırılmakta ve müşteri memnuniyetsizliğine yol açmaktadır.

4.2. Faktörlerin ve Düzeylerinin Belirlenmesi

Problem belirlendikten sonra, yanıt değişkeni olarak seçilen tel mukavemetini etkileyecek faktörlerin seçimine geçilmiştir. Mukavemet üzerinde en çok etkili olduğu düşünülen üç faktör civata çapı, tapa çapı ve sıkıştırma boyu olarak belirlenmiştir. Deney, kaput tutma teli üretiminde çalışan teknik elemanların görüşleriyle saptanan bu üç faktörün, biri mevcut diğeri ise mevcuttan farklı iki düzeyini inceleyecek şekilde tasarlanmıştır. Mevcut düzeyler, civata çapı, tapa çapı ve sıkıştırma boyu için sırasıyla, 3,5 mm; 3,5 mm ve 10 mm'dir. Aşağıda ana faktörler ve düzey değerleri listelenmiştir:

Tablo 3. Faktörlere ait düzeyler

<i>Faktörler</i>	<i>Düzy I (-)</i>	<i>Düzy II (+)</i>
Cıvata Çapı	2,8	3,5
Tapa Çapı	2,8	3,5
Sıkıştırma Boyu	10	15

4.3. Deneyin Planlanması

Tasarlanan deney, her biri iki seviyeli üç faktör içerdiğinden, çözüm için 2^3 faktöryel tasarımı kullanılmıştır. Faktörlerin alt düzeyleri ' - ', üst düzeyleri ise ' + ' şeklinde gösterilmiştir. Tasarım planı, her bir faktöre ait düzey kombinasyonlarını içeren 8 işlemden ve yanıt yüzeyi çözümünde kullanılacak olan merkez noktaları içeren işlemlerden oluşmaktadır (Tablo4).

Tablo 4'teki ilk sekiz işlem 2^3 faktöryel tasarımı için kullanılan temel tasarım matrisidir. Takip eden yedi işlem ise, yanıt yüzeyinde kullanılan merkez noktalarını içermektedir. Tablodaki $\alpha = 1,68$ değeri, 4 no'lu paragrafta izah edilen şekilde hesaplanan değer olup, orijinden 1,68 mm eşit mesafede bulunan eksensel noktaları temsil etmektedir. α 'nın veri analizinde kullanılan asıl değeri 1,68179 mm'dir. Ancak gösterim kolaylığı açısından tablolarda 1,68 olarak verilmiştir.

Tasarlanan deneyde, her bir işlem için beş kez benzer deneme yapılarak deneyin hassasiyetinin artırılması hedeflenmiştir. Sistemik hataları bertaraf etmek için de işlemler rassal sırada denenmiştir.

4.4. Deneyin Uygulanması

Her deney koşulunda beşer parça olarak hazırlanan cıvata , tapa ve uçları uygun boyda soyulmuş halatlar eşleştirilerek şeffaf poşetlere konmuş ve üzerleri deney numarası ile etiketlenmiştir. Daha sonra rassal deneme sırasına göre, egzantrik pres kullanılarak halatların bir ucuna cıvata, diğer ucuna tapa sıkıştırılmıştır. Bu şekilde imalatı tamamlanan kaput tutma telleri, kalibreli çekme deney test cihazı kullanılarak mukavemet testine tabi tutulmuşlardır. Teller kırılma noktasına kadar çekilerek, maksimum çekiş ağırlıkları ölçülmüş ve mukavemet değerleri ilgili deneme numarasının karşısına kaydedilmiştir. Problemin yanıtını oluşturan mukavemet değerleri Tablo 5'in son sütununda verilmiştir.

4.5. Verilerin Analizi

Deney sonucunda elde edilen verilerin analizi iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım, sonuç için hangi ana faktör ve etkileşim etkilerinin önemli olduğunu bulunmasına yarayan varyans analizi (ANOVA) , ikinci

kısım ise faktörlere ait optimum düzeylerin belirlendiği yanıt yüzeyi yöntemidir (RSM).

Tablo 4.Tasarım Planı Özeti

İŞLEMLER	FAKTÖRLER		
	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+
9	-1,68	0,00	0,00
10	1,68	0,00	0,00
11	0,00	-1,68	0,00
12	0,00	1,68	0,00
13	0,00	0,00	-1,68
14	0,00	0,00	1,68
15	0,00	0,00	0,00

Tablo 5. Rassal Sırada Yapılmış Deney Sonuçları

Sıralanmış Rassal Sayılar	Sıralanmış İşlemler	Deneme Sırası	FAKTÖRLER			YANIT
			Cıvata Çapı (mm)	Tapa Çapı (mm)	Sıkıştırma Boyü (mm)	Mukavemet (kg/mm ²)
0,003	4	1	3,50	3,50	10,00	169
0,011	12	2	3,15	3,74	12,50	218
0,031	8	3	3,50	3,50	15,00	258
0,076	10	4	3,74	3,15	12,50	185
0,076	10	5	3,74	3,15	12,50	195
0,105	9	6	2,56	3,15	12,50	321
0,112	6	7	3,50	2,80	15,00	493
0,125	12	8	3,15	3,74	12,50	223
0,136	5	9	2,80	2,80	15,00	543
0,144	11	10	3,15	2,56	12,50	493
0,144	15	11	3,15	3,15	12,50	320
0,164	15	12	3,15	3,15	12,50	335
0,173	14	13	3,15	3,15	16,70	526
0,210	1	14	2,80	2,80	10,00	21
0,211	9	15	2,56	3,15	12,50	368
0,217	2	16	3,50	2,80	10,00	220
0,229	6	17	3,50	2,80	15,00	534
0,236	4	18	3,50	3,50	10,00	160
0,237	2	19	3,50	2,80	10,00	205
0,251	1	20	2,80	2,80	10,00	203
0,280	1	21	2,80	2,80	10,00	208
0,292	15	22	3,15	3,15	12,50	331
0,308	11	23	3,15	2,56	12,50	469
0,309	3	24	2,80	3,50	10,00	205
0,313	2	25	3,50	2,80	10,00	203
0,325	8	26	3,50	3,50	15,00	241
0,348	7	27	2,80	3,50	15,00	370
0,367	15	28	3,15	3,15	12,50	309
0,391	3	29	2,80	3,50	10,00	217
0,400	9	30	2,56	3,15	12,50	373
0,401	14	31	3,15	3,15	16,70	487
0,417	11	32	3,15	2,56	12,50	476
0,421	7	33	2,80	3,50	15,00	379
0,423	1	34	2,80	2,80	10,00	205
0,432	7	35	2,80	3,50	15,00	386

Tablo 5 (devam)

Sıralanmış Rassal Sayılar	Sıralanmış İşlemler	Deneme Sırası	FAKTÖRLER			YANIT
			Cıvata Çapı (mm)	Tapa Çapı (mm)	Sıkıştırma Boyu (mm)	Mukavemet (kg/mm ²)
0,456	9	36	2,56	3,15	12,50	350
0,463	5	37	2,80	2,80	15,00	615
0,482	15	38	3,15	3,15	12,50	330
0,485	5	39	2,80	2,80	15,00	587
0,498	14	40	3,15	3,15	16,70	502
0,501	7	41	2,80	3,50	15,00	364
0,560	6	42	3,50	2,80	15,00	519
0,560	12	43	3,15	3,74	12,50	220
0,582	13	44	3,15	3,15	8,30	110
0,589	13	45	3,15	3,15	8,30	112
0,622	3	46	2,80	3,50	10,00	198
0,622	13	47	3,15	3,15	8,30	132
0,674	3	48	2,80	3,50	10,00	207
0,675	7	49	2,80	3,50	15,00	373
0,678	9	50	2,56	3,15	12,50	339
0,682	6	51	3,50	2,80	15,00	505
0,689	10	52	3,74	3,15	12,50	161
0,731	11	53	3,15	2,56	12,50	494
0,742	2	54	3,50	2,80	10,00	201
0,759	4	55	3,50	3,50	10,00	175
0,777	5	56	2,80	2,80	15,00	534
0,779	8	57	3,50	3,50	15,00	239
0,783	2	58	3,50	2,80	10,00	218
0,801	10	59	3,74	3,15	12,50	162
0,814	11	60	3,15	2,56	12,50	477
0,831	5	61	2,80	2,80	15,00	595
0,834	10	62	3,74	3,15	12,50	169
0,845	4	63	3,50	3,50	10,00	163
0,847	1	64	2,80	2,80	10,00	220
0,850	13	65	3,15	3,15	8,30	105
0,888	15	66	3,15	3,15	12,50	333
0,902	8	67	3,50	3,50	15,00	247
0,903	14	68	3,15	3,15	16,70	479
0,928	8	69	3,50	3,50	15,00	256
0,929	14	70	3,15	3,15	16,70	505

Tablo 5 (devam)

Sıralanmış Rassal Sayılar	Sıralanmış İşlemler	Deneme Sırası	FAKTÖRLER			YANIT
			Çıvata Çapı (mm)	Tapa Çapı (mm)	Sıkıştırma Boyu (mm)	Mukavemet (kg/mm ²)
0,945	3	71	2,80	3,50	10,00	200
0,951	12	72	3,15	3,74	12,50	243
0,975	12	73	3,15	3,74	12,50	204
0,996	13	74	3,15	3,15	8,30	107
0,997	6	75	3,50	2,80	15,00	497
0,998	4	76	3,50	3,50	10,00	155

Tablo 6. 2³ Tam Rassal Tasarım Verileri

Deneme	A	B	C	Çıvata Çapı (A)	Tapa Çapı (B)	Sık.Boyu (C)	1	2	3	4	5
1	-	-	-	2,8	2,8	10,0	213	203	208	205	220
2	+	-	-	3,5	2,8	10,0	220	205	203	201	218
3	-	+	-	2,8	3,5	10,0	205	217	198	207	200
4	+	+	-	3,5	3,5	10,0	169	160	175	163	155
5	-	-	+	2,8	2,8	15,0	543	615	587	534	595
6	+	-	+	3,5	2,8	15,0	493	534	519	505	497
7	-	+	+	2,8	3,5	15,0	370	379	386	364	373
8	+	+	+	3,5	3,5	15,0	258	241	239	247	256

4.5.1. ANOVA

ANOVA çözümü için tablo 6'da verilen 2³ tam faktöryel tasarım matrisini oluşturan tüm denemelere ait veriler kullanılmıştır.

Toplam sekiz farklı deneme beş tekrarlı olarak uygulanmış ve çıkan veriler, MINITAB 14 bilgisayar programı kullanılarak varyans analizine tabi tutulmuştur. Analize ait Minitab çıktıları şöyledir:

Minitab 14 Proje Raporu Tam Faktöryel Tasarım için ANOVA Çözümü

Factors: 3 Base Design: 3, 8
Runs: 40 Replicates: 5
Blocks: 1 Center pts (total): 0

Factor	Type	Levels	Values
Cıvata Çapı	fixed	2	2.8, 3.5
Tapa Çapı	fixed	2	2.8, 3.5
Sıkıştırma Boyu	fixed	2	10, 15

Düzeltilmiş Kareler Toplamı Kullanılarak Mukavemet için Varyans Analizi

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Cıvata Çapı	1	33872	33872	33872	143.82	0.000
Tapa Çapı	1	163328	163328	163328	693.50	0.000
Sıkıştırma Boyu	1	526703	526703	526703	2236.41	0.000
Cıvata Çapı*Tapa Çapı	1	6452	6452	6452	27.39	0.000
Cıvata Çapı*Sıkıştırma Boyu	1	14062	14062	14062	59.71	0.000
Tapa Çapı*Sıkıştırma Boyu	1	106296	106296	106296	451.34	0.000
Cıvata Çapı*Tapa Çapı*	1	260	260	260	1.10	0.301
Sıkıştırma Boyu						
Error	32	7536	7536	236		
Total	39	858510				

S = 15.3464

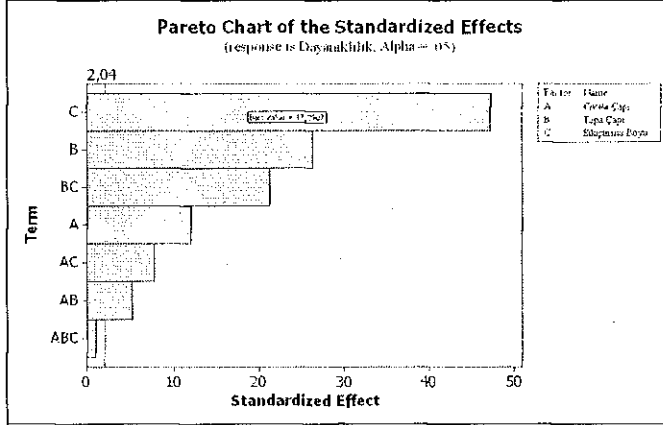
R-Sq = 99.12%

R-Sq(adj) = 98.93%

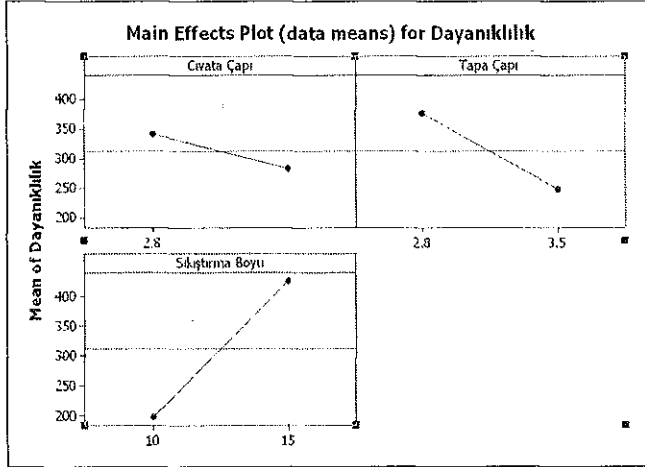
Yukarıdaki tablo, ANOVA özet tablosudur ve faktörlere ait kareler toplamı kullanılarak yapılan F dağılımı analizi sonuçlarını vermektedir. Tabloya göre, P değeri sıfır olarak çıkan faktör ve etkileşimler önemlidir. Cıvata çapı, tapa çapı ve sıkıştırma boyunun üçlü etkileşimine ait P değeri 0,05 değerinden büyük olduğundan, etkileşim önemsizdir denir. Sonuca göre, her üç faktör ve ikili etkileşimleri yanıt üzerinde etkilidir.

Standart sapına 15,3464 olarak çıkmıştır. R-kare değeri, verilerin modele ne ölçüde uygun olduğunu göstermektedir. Analiz sonucunda elde edilen %98,93 R-kare değeri, verilerin kullanılan modele oldukça uygun olduğunu göstermektedir.

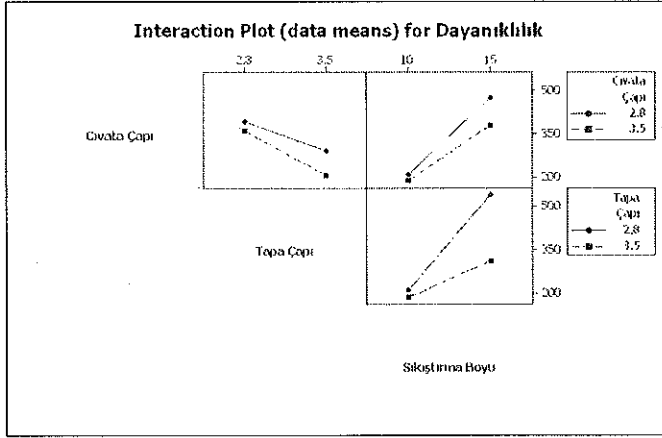
Şekil 1, yine bir Minitab çıktısı olup, faktör ve etkileşimlerin etki derecesi ve birbiri ile karşılaştırmasını göstermektedir. Grafikten, en önemli etkinin *sıkıştırma boyundan* kaynaklandığı ve ABC etkileşiminin deney sonucu için *önemsiz* olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 2, faktörlerin alt ve üst seviyeleri için mukavemet ortalamalarını göstermektedir.



Şekil 1. Düzeltilmiş Etkilerin Pareto Grafiği



Şekil 2. Mukavemet için Ana Etkilerin Grafiği



Şekil 3. Mukavemet için Faktör Etkileşimleri

Şekil 3'te gösterilen ikili faktör etkileşimleri grafiklerinde çizgiler paralel olmadığından, her bir ikili için etkileşimin varlığından söz edilir.

4.5.2. Yanıt Yüzeyi Yöntemiyle Analiz

Bu çalışmada, varyans analizi sonucunda önemli olduğu saptanan faktörlere ait optimum düzeyleri belirleyebilmek için yanıt yüzeyi yöntemi uygulanmıştır. Yanıt yüzeyi yöntemi olarak bileşik merkezi tasarım yöntemi seçilmiştir. Bu durumda, MINITAB 14 bilgisayar programı ile yapılan analizin sonuçları aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

Minitab Proje Raporu

Yanıt Yüzeyi Yöntemi - Bileşik Merkezi Tasarım

Factors : 3 Replicates: 5
 Base runs : 20 Total runs: 100
 Base blocks : 1 Total blocks: 1

İki düzeyli faktöryel tasarım: Tam faktöryel

Küp üstündeki noktalar (Cube points) : 40
 Küp içindeki merkez noktalar (Center points in cube) : 30
 Eksensel noktalar (Axial points) : 30
 Eksen üzerindeki merkez noktalar (Center points in axial): 0

Alfa: 1.68179

Tasarım tablosunda, ' - ' değeri faktöre ait alt düzeyi, ' + ' değeri üst düzeyi, 0 değeri merkez noktayı , 1,68179 değeri merkezden α uzaklığındaki noktayı ve -1,68179 değeri de merkezden $-\alpha$ uzaklığındaki noktayı göstermektedir.

Mukavemet için Tahmin Edilen Regresyon Katsayıları

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-4500.02	392.684	-11.460	0.000
Cıvata Çapı	1580.03	136.497	11.576	0.000
Tapa Çapı	335.12	136.497	2.455	0.016
Sıkıştırma Boyu	321.50	16.675	19.281	0.000
Cıvata Çapı*Cıvata Çapı	-173.99	17.168	-10.135	0.000
Tapa Çapı*Tapa Çapı	84.03	17.168	4.894	0.000
Sıkıştırma Boyu*Sıkıştırma Boyu	-0.90	0.336	-2.671	0.009
Cıvata Çapı*Tapa Çapı	103.67	23.043	-4.499	0.000
Cıvata Çapı*Sıkıştırma Boyu	-21.43	3.226	-6.642	0.000
Tapa Çapı*Sıkıştırma Boyu	-58.91	3.226	-18.262	0.000

S = 17.85 R-Sq = 98.1% R-Sq(adj) = 97.9%

Yukarıdaki tabloda, yanıt fonksiyonu oluşturulmasında kullanılan tahmini katsayılar sıralanmıştır. Hesaplanan P değerleri 0,05 değerinden küçük olduğundan tüm faktörlerin ve ikili etkileşimlerinin yanıt üzerindeki etkisi önemlidir. Standart sapma 17,85 bulunmuştur. Düzeltilmiş kareler toplamı 0,979 olduğundan verilerin modele uygun olduğu söylenebilir.

Yanıt Optimizasyonu

Parametreler

	En düşük	Hedef	En yüksek	Ağırlık
Mukavemet	105	500	615	1

Başlangıç Değerleri

Cıvata Çapı	=	3.5
Tapa Çapı	=	3.5
Sıkıştırma Boyu	=	10.0

Global Çözüm

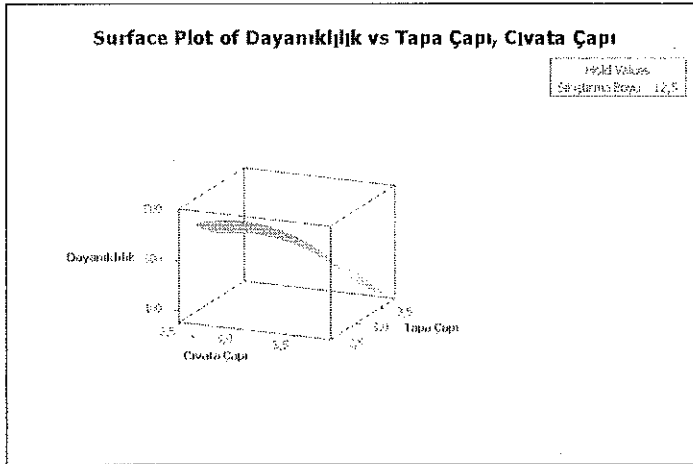
Cıvata Çapı = 3.5000
Tapa Çapı = 2.9729
Sıkıştırma B = 16.7045

Tahmini Yanıt

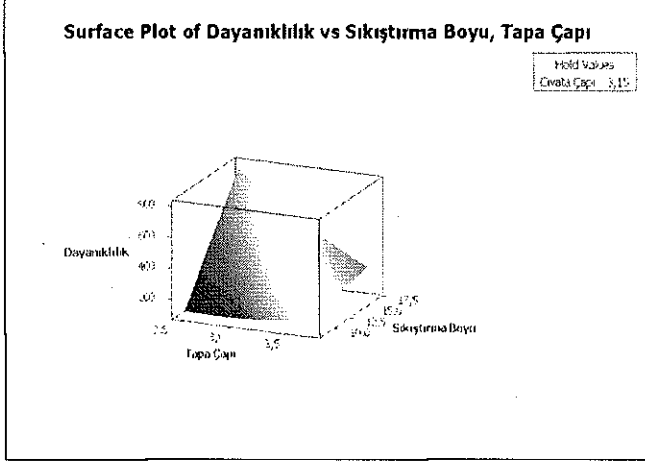
Mukavemet = 500.000

4.5.3. Yanıt Yüzeyi Grafikleri:

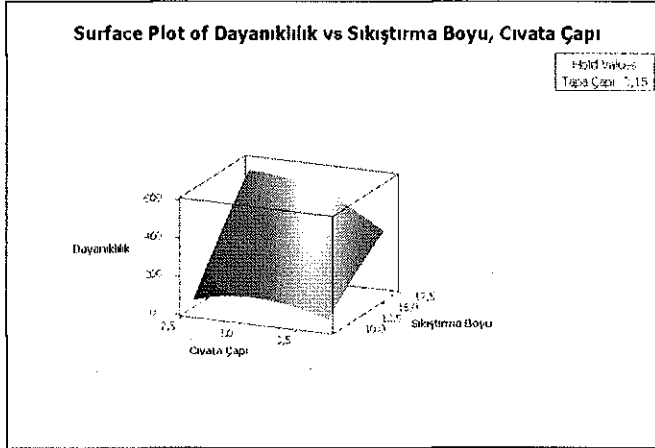
Aşağıda mukavemet yanıtının, cıvata çapı, tapa çapı ve sıkıştırma boyu ile ilişkisini gösteren yüzey ve kontur çizimleri Minitab çıktısı olarak görülmektedir. Bu çıktılarından sıkıştırma boyu arttıkça ve cıvata çapı azaldıkça hedefe daha çok yaklaşıldığı görülmektedir.



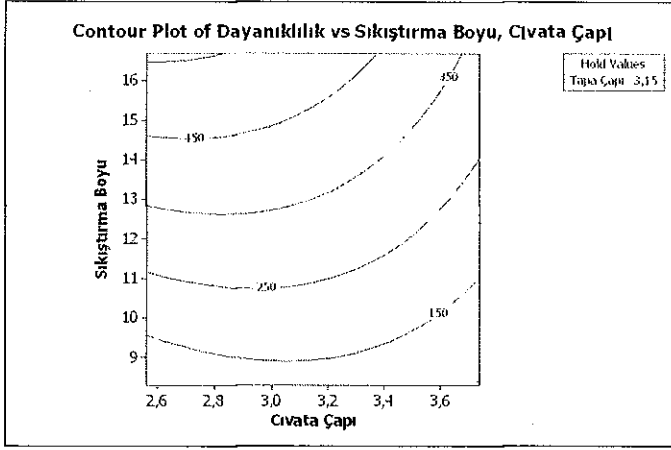
Şekil 4. Tapa Çapı ve Cıvata Çapının Mukavemet Yanıtı Yüzeyi



Şekil 5. Tapa Çapı ve Sıkıştırma Boyunun Mukavemet Yanıt Yüzeyi

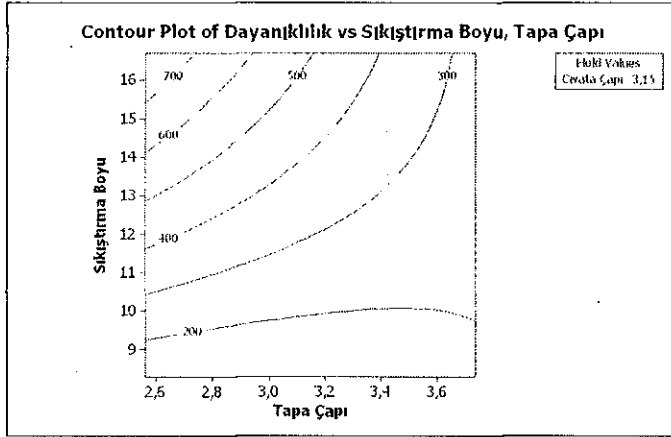


Şekil 6. Sıkıştırma Boyu ve Cıvata Çapının Mukavemet için Yanıt Yüzeyi

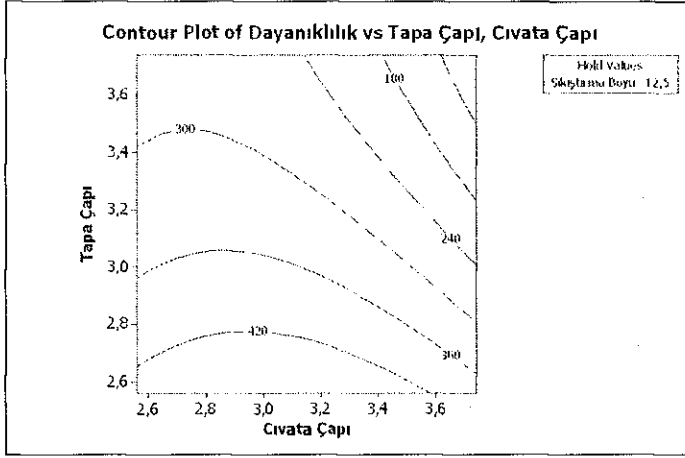


Şekil 7. Sıkıştırma Boyu ve Cıvata Çapının Mukavemet Kontur Çizimi

Konturları oluşturan çizgilerin düz değil eğimli oluşu, yanıt yüzeyinin ikinci derece olduğunun göstergesidir. Kontur çizimlerinden de anlaşılacağı gibi mukavemet, artan sıkıştırma boyu ve azalan tapa ve cıvata çapları ile beraber artmaktadır.



Şekil 8. Sıkıştırma Boyu ve Tapa Çapının Mukavemet Kontur Çizimi



Şekil 9. Tapa Çapı ve Cıvata Çapının Mukavemet Kontur Çizimi

4.6. Doğrulama Deneyi

Yapılan analiz sonrasında, faktör düzey kombinasyonlarına ait optimum değerler şu şekilde belirlenmiştir:

$$\begin{aligned} \text{Cıvata Çapı} &= 3,5000 \text{ mm.} \\ \text{Tapa Çapı} &= 2,9729 \text{ mm.} \\ \text{Sıkıştırma Boyu} &= 16,7045 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Elde edilen optimum düzeylerle yapılan 5 tekrarlı doğrulama deneyi sonuçları da aşağıdaki gibidir:

Deneme	1	2	3	4	5
Mukavemet(kg/mm ²)	500	440	488	475	525

4.7. Deney Sonucu

Tel mukavemetinin çalışma öncesinde 300 kg/mm² civarında olduğu göz önüne alındığında, tasarlanan deneyler sonucunda tel mukavemetinde yaklaşık 0,62 gibi önemli bir ölçüde iyileşme sağlandığı anlaşılmaktadır (doğrulama deneylerindeki ortalama mukavemet değeri 486 kg/mm² 'dir. Dolayısıyla 486/300 = 1,62 olacaktır). Varyans analizi sonucuna göre, incelenen cıvata çapı, tapa çapı ve sıkıştırma boyu faktörlerinin hepsinin kalite kriteri olan tel mukavemeti üzerinde etkili olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Ayrıca ikili faktör etkileşimlerinin önemli, fakat üçlü etkileşimin önemsiz olduğu sonucuna da ulaşılmıştır. Yanıt yüzeyi yöntemiyle her üç

faktör için optimum düzey kombinasyonu belirlenmiş, elde edilen optimum değerlerle beş tekrarlı bir doğrulama deneyi yapılmış ve sonuçların iyileşmeye olan katkısı hesaplanmıştır.

Doğrulama deneyi sonucunda varyansın istenen ölçüde küçük çıkmamasına kol gücüyle çalıştırılan ölçülendirme tezgâhı ile montajda kullanılan egzantrik presin sebep olduğu düşünülmektedir.

SONUÇ

Deney tasarımının amacı, bir ürünün veya üretim prosesinin hedeflenen kalite değeri çevresindeki varyasyonu azaltmak ve ürünü veya prosesi hedef kalite değerine yaklaştırmaktır. Bu yöntemle, ürün ve prosesin kalitesi henüz tasarım aşamasında kontrol altına alındığından, gecikmeden ve maliyet ve verim kaybına sebebiyet vermeden uzun vadeli ve kalıcı çözümler üretmek mümkün olmaktadır.

Deney tasarımı yönteminin kendisi ve analiz için kullanılan ANOVA ve yanıt yüzeyi yöntemleri, yinelemeli ve sıralı tekniklerdir. Diğer bir deyişle bir deneyden elde edilen veriler, bundan sonra yapılacak ileri deneyler için referans oluşturmaktadır. Eğer başlangıçta seçilen faktör düzeyleri en iyi sonucu verebilecek bölgeden uzaksa, bir sonraki deneyde çözüm bölgesine biraz daha yaklaşılar ve sonuçta en iyi kalite değerini verecek optimum değerler elde edilir.

Sonuç olarak otomotiv yan sanayinde kaput tutma teli mukavemeti üzerine yapılan uygulamaların da göstermiş olduğu gibi, deney tasarımı yöntemi, üretimde kalite sorunlarını çözen önemli ve yararlı bir yöntemdir. Mal ve hizmet üretiminde bulunan işletmeler, kalite geliştirme faaliyetlerinde ve kaliteye ilişkin problemlerin çözümünde deney tasarımı yöntemini rahatlıkla kullanabilirler. Ele alınan problemde çok daha karmaşık problemleri düşük maliyetle ve güvenilir bir şekilde çözebilmek deney tasarımıyla olasıdır.

KAYNAKLAR

- BERGER, P.D., MAURER, R.E., 2002, **Experimental Design**, USA, Duxbury.
- BOX, G.E.P., DRAPER, R.N., 1987, **Empirical Model-Building and Response Surfaces**, USA, John Wiley.
- CLARKE, G.M., KEMPSON, R.E., 1997, **Introduction to Design and Analysis of Experiment**, USA, John Wiley.
- CRAIG, I.K., KOCH, I., 2003, *Experimental Design for Economic*

- Performance Evaluation of Industrial Controllers, Control Engineering Practice*, 11, 57-66.
- DESSOUKY, Y.M., BAYER, A., 2002, *A Simulation and Design of Experimentis Modeling Approach to Minimize Building Maintenance Costs, Computers and Industrial Engineering*, 43, 423-436.
- GODFREY, Ayça Ö., COOK, C.M.A., MONTGOMERY, D.C., 2005, *Fraction of Design Space Plots for Examining Model Robustness, Journal of Quality Technology*, 37,3, 223-235.
- GOLDFARB, H.B., COOK, C.M.A., BORROR, C.M., MONTGOMERY, D.C., 2004, *Fraction of Design Space Plots for Assesing Mixture and Mixture-Process Design, Journal of Quality Technology*, 36, 2, 169-179.
- GOLDFARB, H.B., BORROR, C.M., MONTGOMERY, D.C., COOK, C.M.A., 2005, *Using Genetic Algorithms to Generate Mixture-Process Experimental Designs Involving Control and Noise Variables, Journal of Quality Technology*, 37, 1, 60-74.
- GROVE, D.M., WOODS, D.C., LEWIS, S.M., 2004, *Multifactor B-Spline Mixed Models in Designed Experiments for the Engine Mapping Problem, Journal of Quality Technology*, 36, 4, 380-391.
- KHURI, A.I., CORNELL, J.A., 1996, **Response Surfaces**, 2nd. Edition, USA, Marcel Dekker.
- KOWALSKI, S.M., BORROR, C.M., MONTGOMERY, D.C., 2005, *A Modified Path of Steepest Ascent for Split-Plot Experiments, Journal of Quality Technology*, 37, 1, 75-83.
- KÜLAHÇI, M., BISGAARD, S., 2005, *The Use of Plackett-Burman Designs to Construct Split-Plot Designs, Technometrics*, 47, 4, 495-501.
- MEAD, R., 1988, **The Design of Experiments**, Cambridge, Cambridge University Press.
- MEE, R.W., 2004, *Efficient Two-Level Designs for Estimating All Main Effects and Two-Factor Interactions, Journal of Quality Technology*, 36, 4, 400-412.
- MILLER, A., 2005, *The Analysis of Unreplicated Factorial Experiments Using All Possible Comparisons, Technometrics*, 47, 1, 51-63.

- MONTGOMERY, D.C., 2001, **Design and Analysis of Experiments**, 5th. Edition, USA, John Wiley.
- MONTGOMERY, D.C., RUNGER, G.C., 1999, **Applied Statistics and Probability for Engineers**, 2nd. Edition, USA, John Wiley.
- MYERS, W.R., BRENNEMAN, W.A., MYERS, R.H., 2005, *A Dual-Response Approach to Robust Parameter Design for a Generalized Linear Model*, **Journal of Quality Technology**, 37, 2, 130-138.
- ORTIZ, F.O, Jr., SIMPSON, J.R., PIGNATIELLO, J.J.Jr., LANGNER, A.H., 2004, *A Genetic Algorithm Approach to Multiple-Response Optimization*, **Journal of Quality Technology**, 36, 4, 432-450.
- PETERSON, J.J., 2004, *A Posterior Predictive Approach to Multiple Response Surface Optimization*, **Journal of Quality Technology**, 36, 2, 139-153.
- POLINI, W., SORRENTINO, L., 2003, *Improving the Wettability of 2004 Aluminium Alloy by means of Cold Plasma Treatment*, **Applied Surface Science**, 214, 232-242.
- QUESADA, G.M., Del CASTILLO, E., 2004, *Two Approaches for Improving the Dual Response Method in Robust Parameter Design*, **Journal of Quality Technology**, 36, 2, 154-168.
- RAJAGOPAL, R., Del CASTILLO, E., PETERSON, J.J., 2005, *Model and Distribution-Robust Process Optimization with Noise Factors*, **Journal of Quality Technology**, 37, 3, 210-222.
- RINGROSE, T.J., FORTH, S.A., 2005, *Simplifying Multivariate Second-Order Response Surfaces by Fitting Constrained Models using Automatic Differentiation*, **Technometrics**, 47, 3, 249-259.
- ROBINSON, T.L, MYERS, R.H., MONTGOMERY, D.C., 2004, *Analysis Considerations in Industrial Split-Plot Experiments With Non-Normal Responses*, **Journal of Quality Technology**, 36, 2, 180-192.
- ROBINSON, T.J., WULFF, S.S., MONTGOMERY, D.C., KHURI, A., 2006, *Robust Parameter Design Using Generalized Linear Mixed Models*, **Journal of Quality Technology**, 38, 1, 65-75.
- SUTHERLAND, L.S., SOARES, C.G., 2003, *The Effects of Test Parameters on the Impact Response of Glass Reinforced Plastic Using an Experimental Design Approach*, **Composites Science and Technology**, 63, 1-18.

- ŞİRVANCI, M., 1997, **Kalite İçin Deney Tasarımı**, İstanbul, Literatür Yayınevi.
- VARIYATH, A.M., ABRAHAM, B., CHEN, J., 2005, *Analysis of Performance Measures in Experimental Designs Using Jackknife*, **Journal of Quality Technology**, 37, 2, 91-100.
- VINING, G.G., KOWALSKI, S.M., MONTGOMERY, D.C., 2005, *Response Surface Designs Within a Split-Plot Structure*, **Journal of Quality Technology**, 37, 2, 115-129.
- VOELKEL, J.G., 2005, *The Efficiencies of Fractional Factorial Designs*, **Technometrics**, 47, 4, 488-494.