



Radyal perçinleme işlemine basınç ve zamanın etkisi

Kadir Çavdar *^{ID}, Ali Durmuş^{ID}

Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, 16059, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Radyal perçin imalat süreç parametrelerinin araştırılması
- Literatürde bu konuda ilk kez yayınlanan bir çalışma
- Makine süreç tasarımı uygulaması

Makale Bilgileri

Geliş: 07.02.2017

Kabul: 07.12.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.406803

Anahtar Kelimeler:

Radyal perçinleme,
makine tasarımı,
otomotiv,
üretim metodu

ÖZET

Radyal perçinleme üretim metodu özellikle otomotiv üretim sektöründe sıkça kullanılmaktadır. Farklı veya aynı malzemeden üretilmiş olan parçalar perçinle bağlandığında, ilgili parçalara hasar verilmeden veya bağlantı noktası tahrip edilmeden birbirlerinden ayrılmaları mümkün değildir. Perçinleme işleminin teknik olarak optimal olabilmesi için makine tarafından perçine uygulanan basınç değeri ve uygulama süresi büyük önem taşır. Radyal perçin bağı oluşturmak için tasarlanmış yeni bir pnömatik perçinleme makinesinin süreç çıktılarını kontrol etmek amacıyla süreç parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel yaklaşım açıklanmıştır. Parametrelerin elde edilme yöntemi ve deneysel olarak gözlenen değerler, perçinleme ile ilgili literatürde ilk kez dikkate alınmış ve değerlendirilmiştir. Yayında, tasarım ve imalatı yapılan yeni bir radyal perçin bağı oluşturma makinesinin çalışma parametrelerini belirlemek amacıyla planlanan deneyler ve sonuçları tartışılmıştır. Tam faktöriyel deneysel tasarım yaklaşımına dayanan planlı deneyler yoluyla, optimum kafa oluşumu için gerekli perçinleme basınç ve süre değerleri belirlenmiştir. Tespit edilen bu değerlerin doğrulaması için de doğrulama deneyleri yapılmıştır.

Effects of pressure and time on radial riveting process

H I G H L I G H T S

- Investigation of the radial riveting process parameters
- A first published study on this topic in the literature
- An application of machining process

Article Info

Received: 07.02.2017

Accepted: 07.12.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.406803

Keywords:

Radial riveting,
machine design,
automotive,
production method

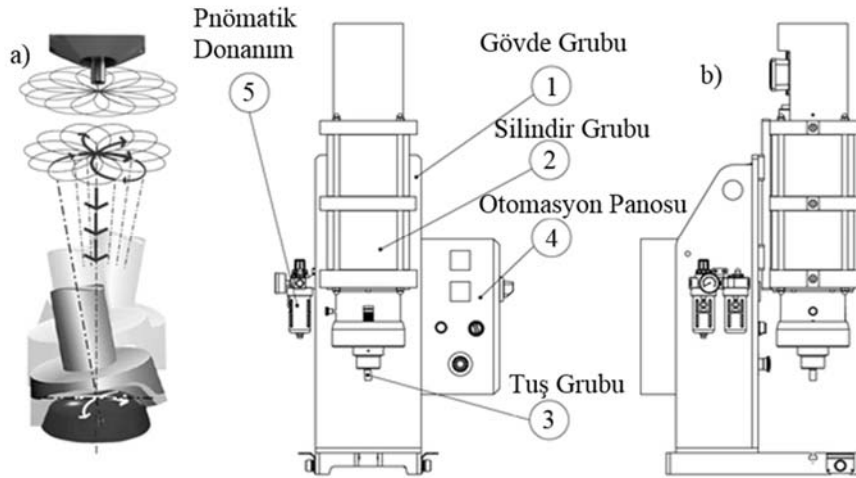
ABSTRACT

Radial riveting production method is frequently used especially in the automotive industry. When parts made of different or the same materials are connected with rivets, it is not possible to separate them without damaging related parts or destruction of the joint. In the optimal riveting process, the value of the riveting pressure applied by the machine on the rivet and the duration of the application are of great importance. Within this study an experimental approach used to determine process parameters to control the process outputs in a new designed pneumatic riveting machine. The method of obtaining these parameters and the experimental observed values were evaluated and considered for the first time in the riveting related literature. In this paper, the planned experiments and its results for a new radial riveting machine, which was recently designed and manufactured, were discussed. Through planned experiments based on a full factorial experimental design approach, the riveting pressure and the duration values required for an optimal head formation were determined. Verification tests have also been conducted to validate these specified values.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Perçin çözülemeyen/şekil bağı bağlama elemanlarıdır. Birbirlerine bağlanacak parçalar aynı türden veya farklı olabilirler. Kaynak ve yapıştırmadaki gelişmeler perçinin kullanım alanını sınırlamıştır. Ancak son yıllarda alüminyumun ve magnezyum alaşımları ile kompozit malzemelerin otomotiv endüstrisinde artan kullanımıyla perçin bağı tekrar ön plana çıkmıştır. Perçin konstrüksiyonlarının uygulama amacı ya parçaları birbirine bağlamak, ya sızdırmazlık sağlamaktır. Birleştirilen elemanlara ısı uygulanmadığından ısı genleşme ve sonra büzülme ve deformasyon perçin bağında söz konusu olmaz. Uygulaması kolay bir yöntem olsa da ana parçalara açılan delik nedeniyle parçayı zayıflatır, çentik etkisi oluşturur. Parçaları birbirlerine bindirme zorunluluğu ve perçinler yüzünden de konstrüksiyon ağırlaşır [1]. Bir yuva içerisinde eksele olarak dönen sert ucun iş parçasına çizgisel olarak temas ederek ilerlemesi sonucu yapılan şekil verme işlemine “orbital/radyal perçinleme” (yörüngesel perçinleme) işlemi adı verilmektedir. Radyal perçinleme işlemi temel olarak sert bir ucun çizdiği yörünge oluşumu olup “spirograph” adı verilen oyuncaklardaki çalışma mantığına benzer (Şekil 1a). Çalışmaların yapıldığı radyal perçinleme makinesini oluşturan elemanlar da Şekil 1b’de görülmektedir. Radyal perçinleme yönteminde genel olarak dönme işlemi sonucunda aşağı doğru şekil vermek için gerekli kuvvet, presle şekillendirme için gerekli olan kuvvetten daha azdır. Aynı zamanda pres baskı işlemiyle kalıpta uygulanan perçinleme yöntemine göre çok daha az gürültüyle çalışması da yöntemin diğer bir avantajıdır. İstenilen perçin son çapı, formu ve yükseklik değerini belirleyen parametreler; baskı kuvveti, dönme hızı, perçin malzemesinin özellikleri, sert ucun eksen açısı ve ilerleme mesafesidir. Yörüngesel perçinleme yöntemleri, otomotivden beyaz eşya üretimine kadar birçok uygulamada kullanılmaktadır. Özellikle standartların yüksek olduğu otomotiv uygulamalarında (kapa-

kilit karşılığı parçası ve ön kaput menteşesi) malzeme özellikleri (sertliğin yüksek olması) ve hassas ölçü toleranslarından kaynaklı perçin işleminde çatlama problemleri sıkça görülmektedir. Çatlak oluşumu problemlerinin yaşanması bu işlemin yapıldığı firmalarda verimsizlik ve kalite problemlerinde artışa neden olmaktadır. Bu tür problemlerin kök nedenleri incelendiğinde, yörüngesel perçin makinelerinde yukarıda belirtilen parametrelerin tamamının optimal şekilde ayarlanamamasının en büyük neden olduğu görülmüştür. Gelişmiş yüksek mukavemetli hafif malzeme ve alternatif araç mimarisinin kullanımının artmasıyla birlikte, otomobil araç gövdesinin montajında malzeme bağlama sorunları ön plana çıkmıştır. Çeşitli birleştirme yöntemleri arasında yer alan yapıştırıcı ile bağlamanın, araç gövdesi montajında farklı malzemelerin birleştirilmesi açısından en önemli tekniklerden biri olduğu vurgulanmakla birlikte yapıştırıcının sertleşmesi esnasında panel levhaları arasındaki boşluğun sabitlenmesi ve kontrolü, bağlanma kuvveti ve geometrik kalitenin sağlanması açısından gereklidir. Yapıştırmaya alternatif yeni bir bağlama süreci tek taraflı delici perçin (single-sided piercing riveting-SSPR) başlıklı yöntemde önerilmektedir [2]. Çalışmada SSPR süreci etkinliğinin doğrulanması için bağlama deneyleri ve performans testleri gerçekleştirilmiş ve diğer bağlama metodlarıyla performans karşılaştırması yapılarak SSPR’in diğer yöntemlere göre üstün mekanik özelliklere sahip olduğu iddia edilmiştir. Uçak ve otomobil gibi ürünlerde kullanılan malzemelerin çeşitlenmesi ile birlikte parçaların birleştirilmesine yönelik yeni fonksiyonel süreçlere olan ihtiyaç da artmıştır. Parçaları birleştirmek için plastik deformasyon yöntemlerinin kullanımı gelişmiş hassasiyet, güvenilirlik ve çevre emniyeti sunmasının yanı sıra benzer olmayan malzemeleri de bağlayarak yeni ürün tasarım fırsatları da yaratabilir. Plastik deformasyonla bağlama yöntemleri konusundaki mevcut çalışmalar Mori vd. [3] tarafından incelenmiştir. Çalışmada; soğuk kaynak, sürtünme kaynağı, kendinden delici perçinleme, mekanik



Şekil 1. Radyal perçinlemede yörünge oluşumu a) ve deneylerde kullanılan pnömatik perçin makinesi b) (a) Orbital formation in radial riveting method and b) pneumatic riveting machine used in experiments)

kenetleme (clinchng) ve form vererek bağlama gibi birleştirme süreçlerinin mevcut durumları analiz edilmiştir. Diğer bir derleme çalışmasında, son yıllarda karşı kalıp olarak düz bir örs kullanılan farklı bağlama yöntemlerinin geliştirildiğine dikkat çekilerek bu tarz sac bağlama alternatiflerinin potansiyelini açıklamak için kalıpsız kenetleme süreci örnek olarak gösterilmiştir [4]. Baskı kafası ve tutucu, gerekli kalıbın düz bir örs olarak kullanılmasını sağlayacak şekilde değiştirildiğinde süreç alternatiflerine yönelik birçok avantaj ortaya çıkmaktadır. Araştırmacılar buna ek olarak örneğin yarı mamul magnezyum parçalarının, süreç zamanında bir artış veya kararlılıkta bir azalma olmaksızın kısmen ısıtılıp direkt olarak birleştirilebileceğini öne sürmüşlerdir, bu sayede mekanik bağlama teknolojilerinin uygulama alanlarının çok daha fazla genişletilmesi mümkün olabilecektir.

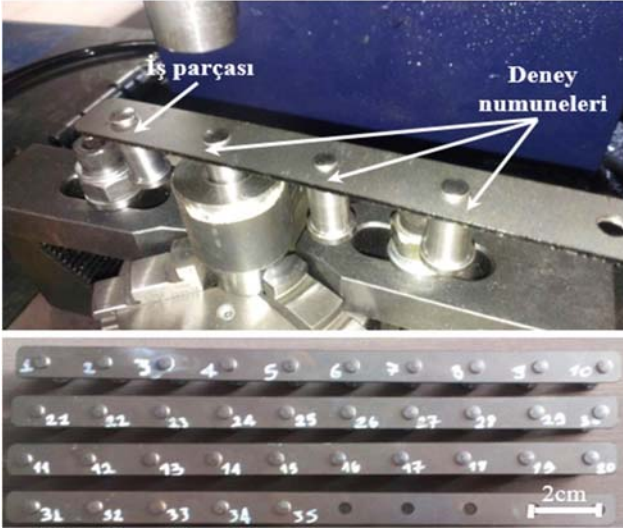
Kompozit malzemelerin kendi aralarında veya başka malzemeler ile bağlanması konusu günümüz araştırmalarında ilk sıraları işgal etmektedir. Kompozit yapıların perçin bağı ile bağlanması konusunda farklı yaklaşımlar mevcuttur. Örneğin, farklı kompozit malzemeden imal edilmiş plakaların perçinlenmesi için elektromanyetik perçinleme (EMR) tekniği kullanılabilir, bu yöntemde düzgün dağılımlı şaft genişlemesi de sağlamak mümkündür [5]. Perçinleme esnasında girişim bölgesinde kompozit yapının zarar görmesi başlıca problem olarak görülmektedir. Çalışmada, özel bir pul kullanılarak ve şaft ile delik duvarı arasında uygun bir boşluk bırakılarak şaft genişlemesinin sınırlandırılabilmesi ve kompozit yapının hasar görmesinin önlenilebileceği öne sürülmektedir. Esnek elektronik sistemler konusundaki mevcut gelişmeler sonucunda mikron boyutunda ara bağlantı teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. LMR (Lazer Mikro Perçinleme Yöntemi) de farklı malzemelerden iki ince tabakanın mekanik ve elektriksel olarak bağlanmasını sağlayan yeni bir teknik olup, böylece ince film cihazlarının esnek polimer yüzeyler üzerine bağlanabileceği belirtilmiştir [6]. LMR tekniği kullanılarak çok ince molibden filmlerin bakır baskılı devre kartına bağlanmasına yönelik bir çalışma yapılmıştır. Yayında taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinde bakırdan içi boş perçinin, molibden film ile bakır katman arasında bir kenetlenme oluşturduğunun açıkça görüldüğü ifade edilmektedir. Perçin bağlantıları konusunda sonlu elemanlar yöntemini kullanarak modelleme ve analiz çalışmaları da literatürde mevcuttur. Örneğin, kullanılmış metallerin perçin bağı ile sıcaklık altında bağlanması işlemi deneysel ve bir sonlu elemanlar yazılımı yardımı ile incelenmiştir. Deney tasarımı konusunda benzer bir uygulama içeren çalışmada, perçin bağı için radyal perçinleme yerine preslemeyle perçin kafası oluşturma yöntemi incelenmiş olup bulguların özellikle tarihi yapılarıdaki uygulamalara yol göstereceği vurgulanmıştır [7]. Benzer şekilde, presleme yolu ile oluşturulan perçin bağlarının modellenmesi, bağlantının darbelere karşı davranışı ve kırılma ömür hesapları da literatürde mevcuttur. Bir örnek çalışmada, perçin bağının oluşumu ve bağın dayanımının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simülasyonu için metod önerilmiştir [8]. Perçin bağının yorulma davranışının modellenmesi de yarı ampirik

yaklaşımla gerçekleştirilmiş ve alüminyum perçinler için gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir [9]. Radyal perçinleme süreciyle ilgili deneysel çalışmalar ile sonlu elemanlar yöntemi kullanan modelleme işlemlerinin korelasyonu gerçekleştirilerek, radyal form verme sürecinin diğer yöntemlere göre daha homojen dağılan malzeme içyapısı ile sonuçlandığı kanıtlanmıştır [10]. Otomotiv endüstrisinde kullanılan servo ve hidrolik tahrikli radyal perçinleme makinelerinin, kendinden perçinleme işlemlerine ait süreç parametrelerinin belirlenmesi araştırmalarında, perçin üzerine uygulanan basıncın yanı sıra kalıp formunun da sürecin en etken parametresi olduğu tespiti yapılmıştır [11]. Mevcut çalışmada da uygulanan basınç ve perçinleme süresinin süreç çıktılarına etkileri üzerinde durulmuştur. Endüstriyel uygulamalarda görülen ağırlık azaltma çalışmalarında, yeni ve farklı malzemeler, alüminyum ve magnezyum alaşımları, farklı alaşımlı çelikler ve kompozit malzemeler sıklıkla kullanılmaktadır. Perçinleme yöntemi de bu çalışmalarla birlikte artan bir önem kazanmaktadır. Örneğin; fiber takviyeli malzeme ile metal plakaların perçin yöntemiyle bağlanmasında olası hata kaynaklarının başında homojen dağılmayan bası gerilmeleri gelmektedir [12]. Yine polimer kompozit ve metal plakaların birbirine perçin ile bağlanmasında perçin kafa büyüklüğünün önemli olduğu, delinen delik çapı ile buna geçen perçinin metal kısmının çap değerleri uyumsuz seçildiğinde perçin şaftının kesilebildiği tespit edilmiştir [13]. Özellikle otomotiv sektöründe güç geçtikçe önem kazanan magnezyum-alüminyum malzeme çiftinin birbirine bağlanmasında da kendinden delik delebilen perçinler önerilmektedir [14]. Süreç sonuçlarına etkiyen parametrelerin kontrol altında tutulabilmesi için girdilerin çıktı üzerindeki etkilerinin anlaşılması gerekmektedir. Bu çalışmada, literatürde de farklı uygulamalarına yer verilmiş olan perçinleme işlemini etkileyen parametreler deneysel tasarım yöntemiyle incelenmiş, deneysel tasarım yöntemi ve istatistiksel teknikler kullanılarak bir pnömatik perçinleme sürecine basıncın ve basınç uygulama süresinin etkileri ortaya konulmuştur.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

Perçin oluşturma amacıyla geliştirilmiş elektrikli servo ve pnömatik kontrollü makineler mevcuttur. Perçin kafasının çatlak olmaksızın oluşturulması sürecinde pres, orbital ve radyal form verme yöntemleri kullanılmaktadır. Literatüre göre bu yöntemler arasında en kabul göreni radyal perçinleme yöntemidir. Ülkemizde ilk olarak tasarımı ve üretimi yapılan pnömatik radyal perçinleme makinesinin, çıktı olarak oluşturmaya beklenen optimal perçin kafası şeklinin, hangi proses parametreleri ile gerçekleştirilebileceğinin tespiti ana problem olarak tanımlanmıştır. Burada belirlenen en kritik iki parametre makinenin uyguladığı hava basıncı ve bu basıncın perçin kafasına uygulama süresidir. Çalışmada deney sayısının uygulanabilir seviyede olduğu tespit edildiğinden tam faktöriyel deney tasarımı yaklaşımı kullanılmakla birlikte, daha fazla parametrenin incelendiği deneylerde Taguchi yönteminin kullanımı, deney maliyetlerinin azaltılması açısından daha uygun bir yaklaşım olacaktır. Temelde en az

deney sayısı ile imalat sürecine etki eden parametrelerin sınırlarını tespit etmek ve bir karar verme modeli oluşturmak amacı ile Taguchi yöntemi kullanılabilir. Bu yaklaşım, deneysel çalışmanın ve istatistiğin kullanılabileceği her alana uygundur. Örneğin yöntem hidrolik kumandalı bir pozisyonlama sisteminin optimizasyonunda [15], bir ürün tasarımında parametrelerin iyileştirilmesinde [16] veya çok kriterli bir dinamik modelin çözümünde kullanılmıştır [17]. Perçinleme sürecindeki etken parametrelerin ve bunlara ait değerlerin tespiti için Taguchi Metodu uygundur. Taguchi metodu ile perçinde oluşan gerilmenin değeri tahmin edilebilmiştir [18]. Yeni geliştirilen pnömatik radyal perçinleme makinesinin parametrelerine yönelik sunulan bu araştırmada, ilgili bildiri farklı şekilde, tam faktöriyel deney tasarımı yaklaşımı kullanılmıştır. Burada makinenin hava basıncı ve perçinleme süreleri deney tasarımı doğrultusunda öngörülen verilere ayarlanarak, düzlemsel bir iş parçası üzerinde radyal perçinleme işlemi ile denemeler gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Yapılmış olan deneylerde otomat çeliği 9SMnPb28 (malzeme no: 1.0718) malzemesi kullanılarak perçin bağı oluşturulmuştur. Bu malzemeye ait değerler Tablo 1’de görülmektedir.



Şekil 2. Radyal perçinleme deney yöntemi (üst) ve numaralandırılmış deney numuneleri (alt)
(Radial riveting experiment's method (top) and numbered test specimens (bottom))

Tablo 1. 9SMnPb28 (1.0718) otomat çeliği için kimyasal kompozisyon ve mekanik değerler
(Chemical and mechanical characteristics for 9SMnPb28 (1.0718) automat steel. Source: Saerstahl catalogue)

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Pb
0,08	<0,05	1,1	0,07	0,3	0,28
R _{p0.2} [N/mm ²]		R _m [N/mm ²]		A ₅ [%]	
>440		510-810		min. 6	

Deneme sayısının gerçekleştirilebilir seviyede olacağı öngörülerek deney tasarımında tam faktöriyel deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen verilerden yola çıkılarak çoklu doğrusal regresyon yöntemiyle sürece ait

matematiksel model ortaya konulmuştur. Modelin doğrulanmasına yönelik doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır. Takip eden bölümde deney tasarımı yönteminin uygulanması ve sonuçlar verilmektedir.

2.1. Deney Tasarımı (Desing of Experiment)

Yapılan ön deneylerle, bağımsız değişken olarak ele alınacak kritik parametreler ve perçinleme işleminin sorunsuz gerçekleştirildiği bağımsız değişkenlere ait seviyeler belirlenmiştir. Benzer şekilde müşteri talepleri ve kalite kriterleri temel alındığında bağımlı değişken olarak ele alınacak olan kritik parametreler belirlenmiştir. Araştırma kapsamında yapılan deneysel çalışmalar için bağımsız değişkenler (x_i) ve bağımlı değişkenler (y_i) şu şekildedir:

x_1 : Hava basıncı [MPa] y_1 : Perçin yüksekliği [mm]
 x_2 : Perçinleme süresi [s] y_2 : Perçin çapı [mm]

Bağımsız değişkenlerle ilgili ön deneylerde belirlenen seviyeler x_1 hava basıncı için 0,3-0,6 MPa aralığı, x_2 perçinleme süresi için 2-4 saniye aralığı şeklindedir. Belirlenen bu seviyeler eşit aralıklarla bölümlenerek bir tam faktöriyel deney tasarımı tablosu oluşturulmuştur (Tablo 2).

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Tablo 2’de verilen deney planı doğrultusunda gerçekleştirilen 35 adet deneysel imalat sonucunda bağımlı değişkenlere ilişkin veriler kumpasla ölçülerek elde edilmiştir (Tablo 3). Deneylerden elde edilen veriler SPSS Statistics 23 programı kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlara ait tanımlayıcı istatistik veriler olarak; minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 4’te verilmiştir. Deney sonuçlarına ait kutu grafikleri oluşturularak değişimler incelenmiş ve yorumlanmıştır. Öncelikle perçinleme süresinin perçin yüksekliğine olan etkilerine ilişkin kutu grafiği ele alındığında (Şekil 3); perçinleme süresi 3,0 ve 3,5 saniye için perçin yüksekliğindeki değişkenliğin belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Eğer tekil dış veri ihmal edilirse, perçin yüksekliği değişkenliğinin 3,5 saniye perçinleme süresi için minimum düzeye indiği söylenebilir. Benzer şekilde perçinleme süresinin perçin çapı üzerindeki etkileri ele alındığında ise (Şekil 4) süre arttıkça perçin çapının median değerinin yukarıya taşındığı, ancak dağılım homojenliği açısından 3,5 saniyelik perçinleme süresinin uygun olduğu görülmektedir. Burada veri dizisinin orta yarısının, yani verilerin %50’sinin kapsandığı kutu boyutu açısından da bu tercih doğrulanabilir. Hava basıncının perçin yüksekliğine olan etkileri incelendiğinde (Şekil 5) artan basınçla perçin yüksekliği median değerinin yukarıya taşındığı görülmektedir. Ancak değişkenlikler incelendiğinde tek yönlü bir yorumlamanın yeterince güvenli olmayacağı söylenebilir. Dışsal veriler ihmal edildiğinde 0,4-0,5 MPa (4,0-5,0 bar) aralığındaki basınç değerinin, değişkenliği genel olarak azalttığı görülmektedir.

Tablo 2. Tam faktöriyel deney tasarım tablosu (Experimental design table for full factorial approach)

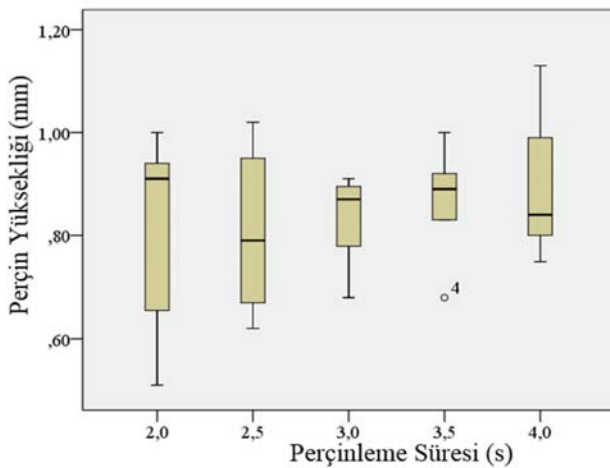
		X ₁						
		0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
X ₂	2,0	(0,3;2,0)	(0,35;2,0)	(0,40;2,0)	(0,45;2,0)	(0,5;2,0)	(0,55;2,0)	(0,6;2,0)
	2,5	(0,3;2,5)	(0,35;2,5)	(0,4;2,5)	(0,45;2,5)	(0,5;2,5)	(0,55;2,5)	(0,6;2,5)
	3,0	(0,3;3,0)	(0,35;3,0)	(0,4;3,0)	(0,45;3,0)	(0,5;3,0)	(0,55;3,0)	(0,6;3,0)
	3,5	(0,3;3,5)	(0,35;3,5)	(0,4;3,5)	(0,45;3,5)	(0,5;3,5)	(0,55;3,5)	(0,6;3,5)
	4,0	(0,3;4,0)	(0,35;4,0)	(0,4;4,0)	(0,45;4,0)	(0,5;4,0)	(0,55;4,0)	(0,6;4,0)

Tablo 3. Deney sonuçları (Experiment results)

D. No	x ₁	x ₂	y ₁	y ₂	D. No	x ₁	x ₂	y ₁	y ₂
1	0,3	2,0	0,52	7,73	19	0,45	3,5	0,83	8,11
2	0,3	2,5	0,62	7,76	20	0,45	4,0	0,82	8,00
3	0,3	3,0	0,68	7,71	21	0,5	2,0	0,91	7,93
4	0,3	3,5	0,68	7,80	22	0,5	2,5	0,93	7,97
5	0,3	4,0	0,75	7,89	23	0,5	3,0	0,87	8,02
6	0,35	2,0	0,51	7,75	24	0,5	3,5	1,00	8,04
7	0,35	2,5	0,64	7,82	25	0,5	4,0	0,91	8,13
8	0,35	3,0	0,90	7,88	26	0,55	2,0	0,93	7,94
9	0,35	3,5	0,90	7,87	27	0,55	2,5	1,02	8,01
10	0,35	4,0	0,84	7,90	28	0,55	3,0	0,80	8,05
11	0,4	2,0	0,79	7,86	29	0,55	3,5	0,89	8,09
12	0,4	2,5	0,70	7,85	30	0,55	4,0	1,13	8,23
13	0,4	3,0	0,89	7,89	31	0,6	2,0	0,95	7,91
14	0,4	3,5	0,83	8,04	32	0,6	2,5	0,97	8,09
15	0,4	4,0	0,78	8,06	33	0,6	3,0	0,91	8,13
16	0,45	2,0	1,00	7,80	34	0,6	3,5	0,94	8,18
17	0,45	2,5	0,79	7,99	35	0,6	4,0	1,07	8,21
18	0,45	3,0	0,76	8,03					

Tablo 4. Tanımlayıcı istatistikler (Descriptive statistics)

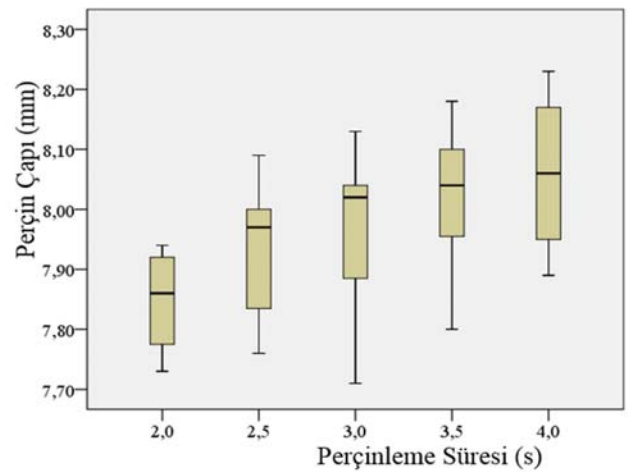
Bağımlı Değişkenler	Min	Maks	Ort	St. Sapma	Varyans
Perçin Yüksekliği (mm)	0,51	1,13	0,8417	0,14341	0,021
Perçin Çapı (mm)	7,71	8,23	7,9620	0,14000	0,020



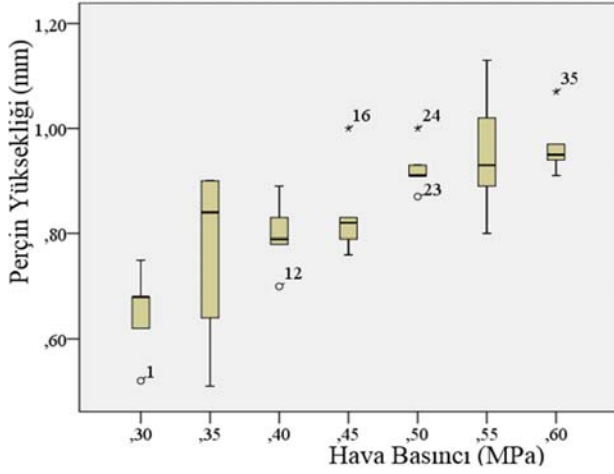
Şekil 3. Perçinleme süresine bağlı olarak perçin yüksekliğinin değişkenliği (Variation of rivet height depending on riveting time)

Hava basıncının perçin çapına etkileri değerlendirildiğinde ise (Şekil 6.) artan basıncın, perçin yüksekliğine olan etkilerine benzer şekilde perçin çapı medyan değerini

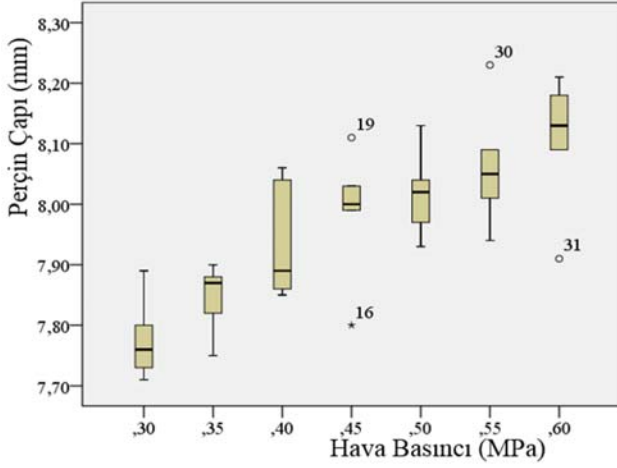
yukarıya taşıdığı görülmektedir. Dışsal verinin ihmali durumunda 0,45 MPa değerinin perçin çapı sonuç değişkenliğini belirgin şekilde azalttığı söylenebilir.



Şekil 4. Perçinleme süresine bağlı olarak perçin çapının değişkenliği (Variation of rivet diameter depending on riveting time)



Şekil 5. Hava basıncı değerine bağlı olarak perçin yüksekliğinin değişkenliği
(Variation of rivet height depending on air pressure value)



Şekil 6. Hava basıncı değerine bağlı olarak perçin çapının değişkenliği
(Variation of rivet diameter depending on air pressure value)

Değişkenler arasındaki doğrusal ilişkinin seviyesini belirlemek amacıyla, ölçek yapısına uygunluğu dolayısıyla Pearson korelasyon katsayıları Eş. 1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{(n(\sum x^2) - (\sum x)^2)(n(\sum y^2) - (\sum y)^2)}} \quad (1)$$

Burada n deney sayısını, x bağımsız değişken değerlerini, y ise bağımlı değişken değerlerini temsil etmektedir. Bağımlı ve bağımsız değişkenlerin birbirleriyle ve kendi aralarındaki korelasyonlar Tablo 5'te görülmektedir. Tablo 5 incelendiğinde, değişkenlerin kendisiyle olan korelasyonu bir (1) ve bağımsız değişkenlerin kendi aralarındaki korelasyonun sıfır (0) olduğu gösterilmiştir. Önemli korelasyonlar şu şekildedir: Hava basıncı; hem perçin yüksekliği hem de perçin çapıyla önemli düzeyde korelasyona sahiptir. Perçinleme süresi ise perçin çapı ile önemli düzeyde korelasyona sahip olmasına rağmen perçin

yüksekliği ile korelasyon seviyesi düşüktür. Ele alınması gereken diğer önemli bilgi, bağımlı değişkenlerin de birbirleriyle korelasyona sahip olmasıdır. Perçin çapı ile perçin yüksekliği arasında önemli oranda korelasyon söz konusudur. Burada; sadece bir bağımlı değişken üzerindeki değişkenliğin yönetilmesinin, diğer bağımlı değişken üzerinde de önemli oranda kontrol sağlayacağı yorumu yapılabilir. Modelleme öncesinde doğrusal regresyonun anlamlı olup olmayacağını teyit edilmesine yönelik serpm diyagramları kullanılmıştır (Şekil 7 ve Şekil 8). Burada her bağımlı değişkenin her bir bağımsız değişken bazında serpm diyagramları oluşturularak incelenmiştir. Diyagramlardaki noktaların görüntüsünden çoklu doğrusal regresyonun sürecin modellenmesine genel olarak uygun olduğu anlaşılmaktadır. Korelasyonların incelenmesi sonrasında, çoklu doğrusal regresyon için sadece perçinleme çapının hava basıncı ve perçinleme süresine bağlı olarak modellenmesine karar verilmiştir. Perçin yüksekliğinin de modellenmesiyle süreç değişkenliği üzerinde aynı hâkimiyetin sağlanması söz konusudur.

Deney verilerinden yola çıkılarak varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Öngörülen modele ait regresyonun belirleme katsayılarına ilişkin sonuç değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Görüleceği gibi belirleme katsayısı (R^2) 0,884 olarak bulunmuştur. Buradan, perçin çapı üzerindeki toplam değişkenliğin %88,4'lük kısmının öngörülen model ile açıklanabileceği söylenebilir. Modelin anlamlılığına dair ANOVA tablosu ise Tablo 7'de verilmiştir. Regresyon kareler toplamının toplam kareler toplamı içindeki ağırlığının ve regresyon tahmin edicilerinin önem düzeyinin ($<0,05$) yüksek olduğu görülmektedir. Dolayısıyla öngörülen modelin anlamlı olduğu söylenebilir. Regresyon denklemleri bağımsız değişkenlere dayanılarak bağımlı değişkenin tahmin edilmesini sağlayan ve bu değişkenler arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak tanımlayan denklemlerdir. Çalışmada elde edilecek olan regresyon denkleminin genel ifadesi Eş. 2'de verilmiştir.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 \quad (2)$$

Regresyon katsayılarına ve parametre tahmin edicilerinin önem derecelerine ilişkin sonuçlar Tablo 8'de verilmiştir. Tabloda tekil olarak her bir parametre tahmin edicisinin önem düzeyinin ($<0,05$) yüksek olduğu görülmektedir. Tabloda sabit katsayının sıfırlanması ve regresyon doğrusunun (0;0) noktasından geçecek şekilde standardize edilmesine dayalı beta katsayıları da ayrıca verilmiştir. Tablo 8'de görülen katsayılar kullanılarak elde edilen doğrusal regresyon modelinin matematiksel ifadesi Eş. 3'teki gibi oluşturulmuştur.

$$(y_2) = 7,169 + 0,107 \cdot x_1 + 0,104 \cdot x_2 \quad (3)$$

Modelin perçin çapı üzerindeki toplam değişkenliğin %88,4'lük kısmını açıklayabildiği yukarıda verilmiştir. Bu belirleme katsayısı, bağımsız değişkenlerin deneylerde kullanılan seviye aralığı içerisinde kalacak şekilde seçildiği durumlar için geçerlidir. Model sonuçlarıyla deneysel sonuçların yüksek oranda örtüşmekte olduğu Tablo 9'daki kıyaslama verilerinden görülebilir.

Tablo 5. Değişkenler arasındaki korelasyonlar (Correlations between variables)

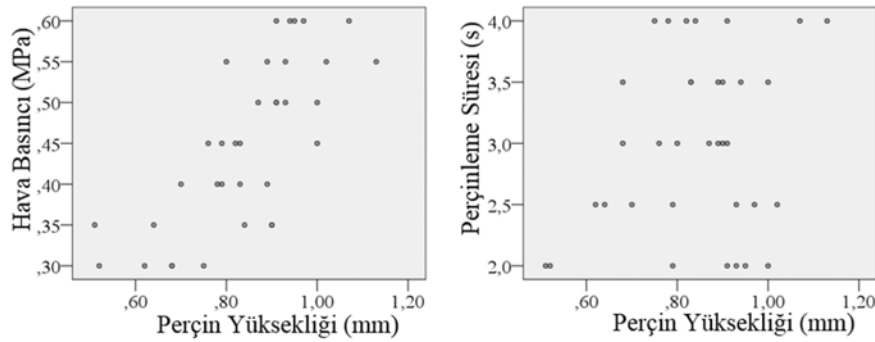
		Hava Basıncı (MPa)	Perçinleme Süresi (s)	Perçin Yüksekliği (mm)	Perçin Çapı (mm)
Hava Basıncı (MPa)	r	1	0,000	0,744**	0,774**
	Önem derecesi		1,000	0,000	0,000
	n	35	35	35	35
Perçinleme Süresi (s)	r	0,000	1	0,254	0,533**
	Önem derecesi	1,000		0,140	0,001
	n	35	35	35	35
Perçin Yüksekliği (mm)	r	0,744**	0,254	1	0,686**
	Önem derecesi	0,000	0,140		0,000
	n	35	35	35	35
Perçin Çapı (mm)	r	0,774**	0,533**	0,686**	1
	Önem derecesi	0,000	0,001	0,000	
	n	35	35	35	35

** Korelasyon 0,01 seviyesinde anlamlıdır

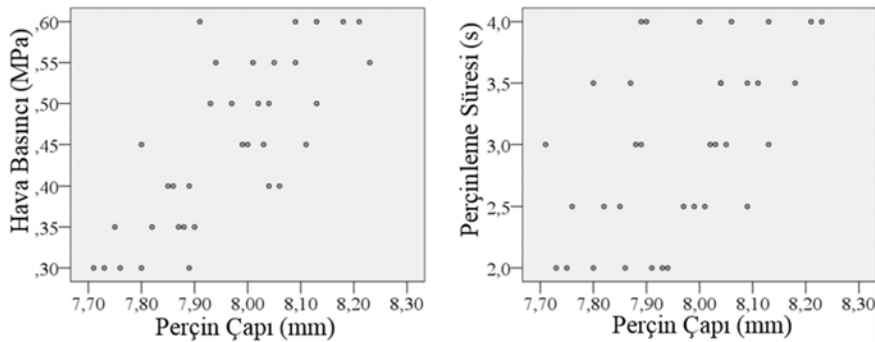
Tablo 6. Regresyon belirleme katsayısı sonuç tablosu (Result table for regression determination coefficient)

Model	R	R ²	Düzeltilmiş R ²	Tahminin Standart Hatası
1	0,940 ^a	0,884	0,877	0,04919

a. Tahmin Ediciler: (Sabit), Hava Basıncı (MPa), Perçinleme Süresi (s)



Şekil 7. Perçin yüksekliğinin hava basıncı ve perçinleme süresi bazında serpmeye diyagramları (Scatter diagrams for rivet high based on air pressure and riveting time)



Şekil 8. Perçin çapının hava basıncı ve perçinleme süresi bazında serpmeye diyagramları (Scatter diagrams for rivet diameter based on air pressure and riveting time)

Tablo 7. ANOVA^a tablosu (The ANOVA table)

Model	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	Önem Derecesi
1	Regresyon	2	0,294	121,688	0,000 ^b
	Artıklar	32	0,002		
	Toplam	34			

a. Bağımlı Değişken: Perçin çapı (mm)

b. Tahmin Ediciler: (Sabit), Hava basıncı (MPa), Perçinleme süresi (s)

Tablo 8. Katsayılar ve önem dereceleri tablosu (Table for coefficients and significance levels)

Model	Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standartlaştırılmış Katsayılar		Önem Derecesi	
	B	Std. Hata	Beta	t		
1	(a ₀)	7,169	0,052	-	137,623	0,000
	(a ₁) [x ₁]	0,107	0,008	0,774	12,851	0,000
	(a ₂) [x ₂]	0,104	0,012	0,533	8,844	0,000

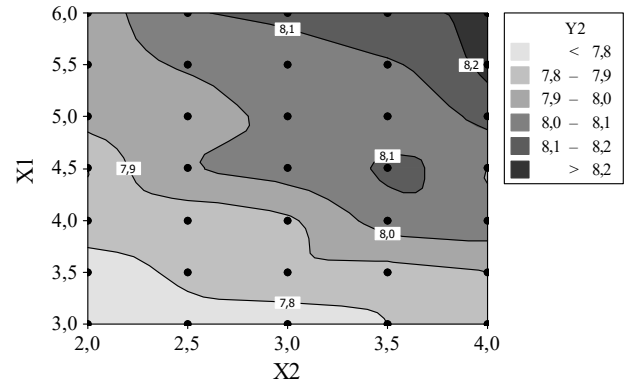
a. Bağımlı Değişken: Perçin Çapı (mm) [y₂]

Tablo 9. Model ile deneysel sonuçların kıyaslama verileri (Comparison of experimental and model results)

D. No	x ₁	x ₂	y ₂	(y ₂)	Δ = y ₂ - (y ₂)	D. No	x ₁	x ₂	y ₂	(y ₂)	Δ = y ₂ - (y ₂)
1	0,3	2,0	7,73	7,70	0,03	19	0,45	3,5	8,11	8,01	0,10
2	0,3	2,5	7,76	7,75	0,01	20	0,45	4,0	8,00	8,07	-0,07
3	0,3	3,0	7,71	7,80	-0,09	21	0,5	2,0	7,93	7,91	0,02
4	0,3	3,5	7,80	7,85	-0,05	22	0,5	2,5	7,97	7,96	0,01
5	0,3	4,0	7,89	7,91	-0,02	23	0,5	3,0	8,02	8,02	0,00
6	0,35	2,0	7,75	7,75	0,00	24	0,5	3,5	8,04	8,07	-0,03
7	0,35	2,5	7,82	7,80	0,02	25	0,5	4,0	8,13	8,12	0,01
8	0,35	3,0	7,88	7,86	0,02	26	0,55	2,0	7,94	7,97	-0,03
9	0,35	3,5	7,87	7,91	-0,04	27	0,55	2,5	8,01	8,02	-0,01
10	0,35	4,0	7,90	7,96	-0,06	28	0,55	3,0	8,05	8,07	-0,02
11	0,4	2,0	7,86	7,81	0,06	29	0,55	3,5	8,09	8,12	-0,03
12	0,4	2,5	7,85	7,86	-0,01	30	0,55	4,0	8,23	8,17	0,06
13	0,4	3,0	7,89	7,91	-0,02	31	0,6	2,0	7,91	8,02	-0,11
14	0,4	3,5	8,04	7,96	0,08	32	0,6	2,5	8,09	8,07	0,02
15	0,4	4,0	8,06	8,01	0,05	33	0,6	3,0	8,13	8,12	0,01
16	0,45	2,0	7,80	7,86	-0,06	34	0,6	3,5	8,18	8,18	0,00
17	0,45	2,5	7,99	7,91	0,08	35	0,6	4,0	8,21	8,23	-0,02
18	0,45	3,0	8,03	7,96	0,07						

y₂: Ölçüm sonuçları [mm] (y₂): Regresyon modeli sonuçları [mm]

Bağımsız değişkenlerin deney tasarımı dâhilinde alınmış olan noktasal değerleri arasında kalan değerlerine yönelik bağımlı değişken değerlerinin tahminleri için kontur çizimleri kullanılabilir. Şekil 9’da modele yönelik kontur görünümü verilmiştir. Elde edilen doğrusal regresyon denkleminin doğrulanması amacıyla yapılmış olan deneylere ilişkin veriler ve sonuçlar Tablo 10’da görülmektedir. Deney maliyetinin kontrol altında tutulması amacıyla tüm deney seti tekrar edilmemiş ve bir seçki üzerinden tekrarlanan deneyler sonucunda model ile ölçüm verilerinin karşılaştırılması yaklaşımı tercih edilmiştir. Seçilen 20 adet doğrulama deneyinin numaralandırılması, ilk deney setindeki deney numarasının yanına (-2) eklenerek yapılmıştır. Ölçülen değerler ile modelin tahmin değerleri arasındaki ortalama sapma değeri 0,002 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 9. y₂'nin x₁ ve x₂'ye göre kontur görünümü (contour plots of y₂ versus x₁ and x₂)

Tablo 10. Model ve doğrulama sonuçların karşılaştırma verileri (Comparison of model and validation results)

D. No	x_1	x_2	y_{2-2}	(y_2)	$\Delta = y_{2-2} - (y_2)$	D. No	x_1	x_2	y_{2-2}	(y_2)	$\Delta = y_{2-2} - (y_2)$
2-2	0,3	2,5	7,85	7,75	0,10	17-2	0,45	2,5	7,97	7,91	0,06
4-2	0,3	3,5	7,90	7,85	0,04	18-2	0,45	3,0	7,94	7,96	-0,02
7-2	0,35	2,5	7,87	7,80	0,06	19-2	0,45	3,5	8,00	8,01	-0,02
9-2	0,35	3,5	7,95	7,91	0,04	20-2	0,45	4,0	8,01	8,07	-0,06
11-2	0,4	2,0	7,89	7,81	0,08	21-2	0,5	2,0	7,93	7,91	0,02
12-2	0,4	2,5	7,87	7,86	0,01	24-2	0,5	3,5	8,02	8,07	-0,05
13-2	0,4	3,0	7,95	7,91	0,04	28-2	0,55	3,0	8,04	8,07	-0,03
14-2	0,4	3,5	7,93	7,96	-0,03	30-2	0,55	4,0	8,07	8,17	-0,11
15-2	0,4	4,0	8,03	8,01	0,01	32-2	0,6	2,5	8,02	8,07	-0,05
16-2	0,45	2,0	7,90	7,86	0,04	34-2	0,6	3,5	8,09	8,18	-0,09

y_{2-2} : Doğrulama deneylerinde elde edilen ölçüm sonuçları [mm] (y_2): Regresyon modeli sonuçları [mm]

Bu değer bulunan doğrusal regresyon denkleminin, hava basıncı ve perçinleme süresi değerleri doğrultusunda perçin çapının tahmini amacıyla kullanılabileceğini doğrulamaktadır. Literatürde pnömatik tahrikli radyal perçin makineleri ve bu makinelerin çalışma parametreleri üzerine herhangi bir çalışmaya rastlanmadığından, bulguların doğrudan karşılaştırılması mümkün olmamıştır. Bu nedenle çalışma kapsamında gerçekleştirilen doğrulama deneylerinin önemi çok açıktır. Bu deneyler vasıtası ile tanımlanmış koşullar için deneysel yaklaşımın doğruluğu ve bulunan parametre değer aralıklarının geçerliliği kanıtlanmıştır. Ancak değer aralıklarının genişletilmesi ve seviyelerin artırılması gerektiğinde, tam faktöriyel yaklaşım doğrultusunda ihtiyaç duyulan deney sayısının ve maliyetinin artması kaçınılmazdır. Literatürdeki çalışmalarda detayı bulunabilecek Taguchi yönteminin kullanımıyla deney sayısının minimize edilebileceği ve doğrulanmış şekilde sonuca ulaşılabileceği gösterilmiştir. Yine literatürde geçen, en uygun perçin başı oluşturma yönteminin radyal sıvama hareketi olduğu hipotezi de çalışmalar sonucunda doğrulanmıştır. Bu yöntemle, daha düşük, dolayısıyla çatlak oluşumu görülmeyecek basınç değerlerinde perçin başı oluşumu sağlanabilmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, radyal perçin başını oluşturmak için tasarlanmış yeni bir pnömatik perçinleme makinesinin süreç çıktılarını kontrol etmek amacıyla, süreç parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel yaklaşım anlatılmaktadır. Çeşitli kaynaklarda en uygun perçin kafası oluşturma yöntemi olarak verilen radyal perçinleme işlemine ait optimal parametrelerin tespiti konusunda literatürde yayın olmadığı görülmüş ve bu alan doldurulmaya çalışılmıştır.

Tam faktöriyel deney tasarımı yaklaşımı ile belirlenen deneyler gerçekleştirilmiş ve ölçüm değerleri istatistiksel tekniklerle incelenmiştir. Perçin çapı ile perçin yüksekliği arasında belirlenen yüksek korelasyon değeri, seçilen tek bir bağımlı değişken üzerindeki kontrolün diğer bağımlı değişken üzerinde de kontrol sağlayacağına işaret etmektedir. Sonuçta perçin çapı veya perçin yüksekliğinin tahmin edilmesinde, belirli bir pnömatik basınç ve uygulama süresi aralığını sağlayan bir matematiksel model elde

edilmiştir. Bu modelleme yaklaşımı radyal perçin üretim makinelerinde ayar parametrelerinin belirlenmesinde başarıyla uygulanabilir. Ayrıca kullanıcılar mevcut makinelerde ilgili parametreleri, perçin oluşturma süreçlerindeki değişkenliği yönetmek amacıyla kullanabilirler. Yapılan ikinci deney seti sonucunda, ilk deneylerle elde edilen model doğrulanmıştır. Gelecekte daha farklı tipteki perçinlerin oluşum parametreleri de benzer bir çalışma ile belirlenebilir. Ayrıca kompozit malzemeler gibi farklı malzemelerin perçin ile bağlanmasında da benzer deneysel çalışmalar tekrarlanabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma TÜBİTAK-TEYDEB 1507 Kobi Ar-Ge Başlangıç Destek Programı çerçevesinde, 7131097 numaralı "Servo ve Pnömatik Tahrikli, Radyal, Perçin İmalat Mekanizmalarının Tasarımı ve Geliştirilmesi" başlıklı proje kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca araştırmalar dâhilindeki deneylerin yapılmasına destek olan FCB Ar-Ge Mühendislik Hizmetleri Ltd. Şti. ve ACT Otomotiv Mühendislik Danışmanlık Ltd. Şti.'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Babalık F.C. ve Çavdar K., Machine Elements and Construction Samples, 8th Edition, Dora Yayınevi, Bursa, 2015.
2. Liu Y., Zhang L., Liu W., Wang P.C., Single-sided piercing riveting for adhesive bonding in vehicle body assembly, Journal of Manufacturing Systems, 32, 498–504, 2013.
3. Mori K., Bay N., Fratini L., Micari F., Tekkaya A.E., Joining by plastic deformation, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 62, 673–694, 2013.
4. Neugebauer R., Todtermuschke M., Mauermann R., Riedel F., Overview on the state of development and the application potential of dieless mechanical joining processes, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 8 (4), 51-60, 2008.
5. Cao Z., Cardew-Hall M., Interference-fit riveting technique in fiber composite laminates, Aerospace Science and Technology, 10, 327–330, 2006.
6. Zimmer K., Ehrhardt M., Lorenz P., Stephan T., Ebert R., Braun A., Joining of molybdenum thin films with

- copper printed circuit board by laser micro-riveting, *Optics & Laser Technology*, 49, 320–324, 2013.
7. Lepretre E., Chataigner S., Dieng L., Gaillet L., Cannardet H., Numerical and experimental investigations of hot driven riveting process on old metal structures, *Engineering Structures*, 127, 583–593, 2016.
 8. Blanchot V., Daidie A., Riveted assembly modelling: Study and numerical characterisation of a riveting process, *Journal of Materials Processing Technology*, 180, 201–209, 2006.
 9. Skorupa M., Machniewicz T., Skorupa A. ve Korbel A., Fatigue life predictions for riveted lap joints, *International Journal of Fatigue*, 94, 41–57, 2017.
 10. Mahmoudi M., Baha M.S., Khajehpour P. ve Yousufi A., Experimental and analytical comparison in orbital riveting machine and radial riveting unit in an orbital machine, 3rd Int. Conf. on Research in Science and Technology, Berlin, Germany, 9 July, 2016.
 11. Han L., Thornton M., Li D., Shergold M., Effect of Setting Velocity on Self-Piercing Riveting Process and Joint Behaviour for Automotive Applications, *SAE International*, 2010-01-0966.
 12. Ryan L., Monaghan J., Failure mechanism of riveted joint in fibre metal laminates, *Journal of Materials Processing Technology*, 103, 36-43, 2000.
 13. Abibe A.B., Amancio-Filho S.T., dos Santos J.F., Hage Jr. E., Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer–metal staked joints, *Materials and Design*, 46, 338–347, 2013.
 14. Luo A., Lee T., Carter J., Self-Pierce Riveting of Magnesium to Aluminum Alloys, *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, 4 (1), 158-165, 2011.
 15. Pinar A.M., Güllü A., Optimization of numerical controlled hydraulic driven positioning system via Taguchi method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25 (1), 93-100, 2010.
 16. İç Y.T., Yildirim S., Improvement of a product design using multi criteria decision making methods with Taguchi method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (2), 447-458, 2012.
 17. Bali O., A dynamic multi criteria decision making model under uncertainties, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (1), 131-140, 2014.
 18. Ghani J.A., Jamaluddin H., Ramli R., Ab Rahman M.N., Deros B.M., Che Haron C. H., DOE in Solving Industrial Problem: Case Study of the Application of Taguchi Method in Riveting Process, *Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Istanbul, Turkey, 3 – 6 July, 2012.