

## BİLYELİ DÖVME METODU İLE OTOMOTİV PARÇALARINDA ÇALIŞMA ÖMRÜNÜN ARTTIRILMASI

*F. Yıldız ÇAVDAR\**  
*Serkan ÖZŞAHİN\*\**  
*İsmail KUMPAS\*\*\**  
*Behiye KORKMAZ\*\*\**  
*Kadir ÇAVDAR\*\*\**

Alınma:26.02.2018; düzeltme:30.07.2018; kabul:10.08.2018

**Öz:** Parça geometrisi ve malzeme özellikleri dikkate alındığında shot peening (SP, bilyeli dövme) süreci parçaya özgü imalat süreci tasarımı ve parametre tanımı gerektirmektedir. Bu, malzemenin mekanik ve yüzey özelliklerini iyileştirmeyi amaçlayan mekanik bir süreçtir. Özellikle dinamik yükler altında çalışan, burulma ve burkulmaya zorlanan parçalarda kullanılmaktadır. Dolayısıyla sürece birçok parametre etki etmektedir. Bu çalışmada, adım motorunun iki farklı açılarda bilyeli dövme uygulama süreleri bağımsız parametreler olarak alınmış ve parça üzerinde konumlandırılan dört farklı Almen plakasından ölçülen deformasyon değerleri incelenmiştir. Ön deneylerde elde edilen bulgular doğrultusunda süreler üzerinde bazı değişiklikler öngörülmüştür. Tasarlanan ikinci deney seti sonrasında Almen plakalarının sonuçlarında istenen aralığa doğru bir iyileşme sağlanmıştır. Bilyeli dövme sürecinin daha fazla bağımsız değişken ile incelenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Bilyeli dövme, Otomotiv, Deneysel Tasarım, Almen Plakaları

### **Increasing of Fatigue Life of the Automotive Parts with Shot Peening Method**

**Abstract:** When part geometry and material properties are taken into consideration, shot peening (SP) process is required part specific process design and parameter definition. This process is a mechanical process aiming to improve the mechanical and surface properties of the material. It is particularly used for the parts which operate under dynamic loads and subjected to torsional and buckling forces. Therefore, many parameters are affected the process. In this study, shot peening durations at two different angular values of the stepper motor were taken as independent parameters and deformation values measured from 4 different Almen strips located on the part were investigated. In consideration of the findings obtained in the preliminary experiments, some changes on the peening durations are suggested. After the second set of designed experiments, some improvements in the direction of the appropriate range were achieved in the results of the Almen strips. It was concluded that the shot peening process should be examined with a greater number of independent variables.

**Keywords:** Shot peening, Automotive, Design of Experiment, Almen Strips

\* FCB ArGe Mühendislik Hizmetleri Ltd. Şti., ULUTEK Teknopark, Z028, 16059, Bursa.

\*\* AKA Otomotiv A.Ş. ArGe Merkezi, Örnekköy Yolu 1. km., 16800 Orhangazi, Bursa.

\*\*\* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa.

İletişim Yazarı: Fatma Yıldız Çavdar (cavdar@fcb-arge.com)

## 1. GİRİŞ

Bilyeli dövme yönteminde metal malzemelerin yüzey ve içyapı özelliklerini değiştirmek amacıyla, malzemenin yüzeyine küçük, küresel ve sert bilyelerin kontrollü şekilde fırlatılması işlemidir. Bu yöntemle malzeme yüzeyinde plastik deformasyon dolayısıyla kalıcı bası gerilmeli bir tabaka oluşturmaktır. Bu tabaka sayesinde malzemenin yorulma ömründe kayda değer artışlar elde edilebilir. Bilyeli dövme yöntemi bunun dışında malzeme yüzey temizliği için de kullanılmaktadır. Bu çalışmada, otomotivde kullanılan ve kaynak yöntemi ile imal edilen parçalarda Bilyeli dövme yöntemi ile sağlanabilecek avantajlar incelenmektedir. Süreç parametrelerinin etkileri ve nasıl kontrol altında tutulabileceği deneysel olarak araştırılmış ve çeşitli tecrübeler paylaşılmıştır.

Fonksiyonu gereği gerilim altında çalışan, korozyona ve sirküler yüklere maruz kalarak aşınan metal parçaların dayanımını artırmada ileri bir mekanik yüzey işlem prosesi olarak bilyeli dövme işlemi uygulanmaktadır. Bilyeli dövme işlemi esnasında metal yüzeylerin aşağıda belirtilen bazı önemli parametreleriyle oynanmaktadır.

Guechichi ve ark. (2013) tarafından hazırlanan çalışmada malzeme özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan bir yöntem olan SP tanıtılmakta ve süreçte en önemli parametre olarak görülen bilyelerin hızı konusu üzerinde durulmaktadır. Hız tahminleri için kestirimci bir metot önerilmiştir. Bu metot yapılan deneyler ile benzer sonuçlara ulaşmıştır. Bilye boyutu, malzeme ve fırlatma açısı parametreleri verildiğinde bilye hızı Almen yoğunluğuna bağlı olarak seçilebilmektedir. Sonuçta elde edilen diyagram aşağıda verilmiştir.

Gangaraj ve ark. (2014) tarafından hazırlanan makalede ise sonlu elemanlar yöntemini kullanarak SP yönteminin karakteristik büyüklüklerinin ve etkisinin belirlenmesi çalışmaları anlatılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi Avrami denklemi ile benzer sonuçlar göstermiştir.

Reilley (2013) tarafından sunulan makalede hassas SP sistemi tanıtılmaktadır. Yeni bir konseptin oluşturulduğu savunulan çalışmada geleneksel SP sürecinin temel alındığı vurgulanmaktadır. Daha hassas bir lülenin kullanıldığı sistemde hareketler ve parçaya fokus olma otomatikman yapılmaktadır. Sistemin bir fotoğrafı aşağıda verilmiştir.

Garipey ve ark. (2013) tarafından hazırlanan makalede bilyelerin yolunun sürece ve süreçteki parçanın değerlerine etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Deneyler yardımı ile yaklaşım doğrulanmıştır. Endüstriyel uygulamalarda kullanılacak yaklaşım ile simülasyonların daha hızlı ve doğru şekilde yapılabileceği böylece maliyetlerin düşürülebileceği vurgulanmaktadır.

Bagherifard ve ark. (2012) tarafından sunulan çalışmada sonlu elemanlar simülasyonu yardımıyla SP yüzey durumunun tahmini konusu üzerinde durulmaktadır. SP metodunun en önemli kontrol parametresi olan yüzey durumu (surface coverage) sürecin uygulamasında karar parametresidir. Kalite kontrol parametresi olarak da kullanılır. Günümüzde henüz standart bir kontrol süreci ortaya konamamıştır. Bu nedenle mevcutta deneysel çalışmaların yanı sıra teorik ve bilgisayar destekli yaklaşımlar bulunmaktadır. Çalışmada bu yaklaşımlar ele alınarak uygun bir yöntem ortaya konmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmaların dışında literatürde parçaların yorulma ömürlerine SP metodunun etkisini araştıran yayınlar da mevcuttur. Bu yayında diğerlerinden farklı olarak bilyeli dövme metodunun otomotiv sektöründe bir seri imalat uygulaması çalışması sunulmaktadır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

AKA Otomotiv San. ve Tic. A.Ş. Ar-Ge Merkezi tarafından yürütülen “Otomotiv seri imalat uygulamalarında bilyeli dövme metodu kullanımının araştırılması ve sürece ilişkin makine geliştirilmesi” adlı proje kapsamında öngörülen deneysel çalışmalar iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

## 2.1 Ön Deneylerden Elde Edilen Bulgular

Ön deneyler olarak adlandırılabilir olan ilk aşamada süreç üzerindeki değişkenlikler analiz edilmiş, parametreler belirlenmeye çalışılmış ve iki bağımsız değişken temel alınmıştır. Bunlar, adım motorunun iki farklı açı değerinde (30° ve 340°) bilyeli dövme uygulama süresi olarak belirlenmiştir. Bağımlı değişkenler olarak ise 4 farklı Almen plakasından alınan deformasyon değerleri kararlaştırılmıştır. Ön deneylerde elde edilen veriler Tablo 1’de, ortalama ve standart sapma bilgileri ise Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 1. Ön deneylerde elde edilen sonuç verileri**

Bağımsız Değişkenler		Bağımlı Değişkenler			
Uygulama Süresi (s)		Almen Plakası Sonuçları (µm)			
30°	340°	1	2	3	4
29	27	340	346	394	411
29	27	325	324	371	386
25	15	293	345	358	316
15	25	300	372	355	297
29	27	375	402	392	400
29	27	414	383	382	424
29	27	315	325	371	396
29	27	364	325	358	421
29	30	409	357	378	421
29	27	410	419	406	400
24	27	426	402	369	418
29	20	402	353	372	429
29	20	415	358	379	417
29	27	455	407	373	417
29	27	411	349	370	442
29	27	427	372	406	428

**Tablo 2. Almen plakalarının ön deneylerde elde edilen tanımlayıcı istatistik sonuçları**

Almen Plakası	Ort.	Std. Sapma	Varyans	Aralık	Min.	Maks.
1	380,06	50,74	2574,46	162,00	293,00	455,00
2	364,94	30,54	933,00	95,00	324,00	419,00
3	377,13	15,62	243,85	51,00	355,00	406,00
4	401,44	39,76	1580,93	145,00	297,00	442,00

Almen plakaları için sağlanması istenen değerler 400-440 µm arasındadır. Tablo 2 incelendiğinde ortalama değerlerde sadece 4 numaralı Almen plakasının bu aralığı sağladığı görülmektedir. Plakalara ait histogram grafikleri Şekil 1’de verilmiştir. Burada yeşil kesikli çizgiler istenen aralık sınırlarını, mavi çizgi ise ortalama değeri göstermektedir.

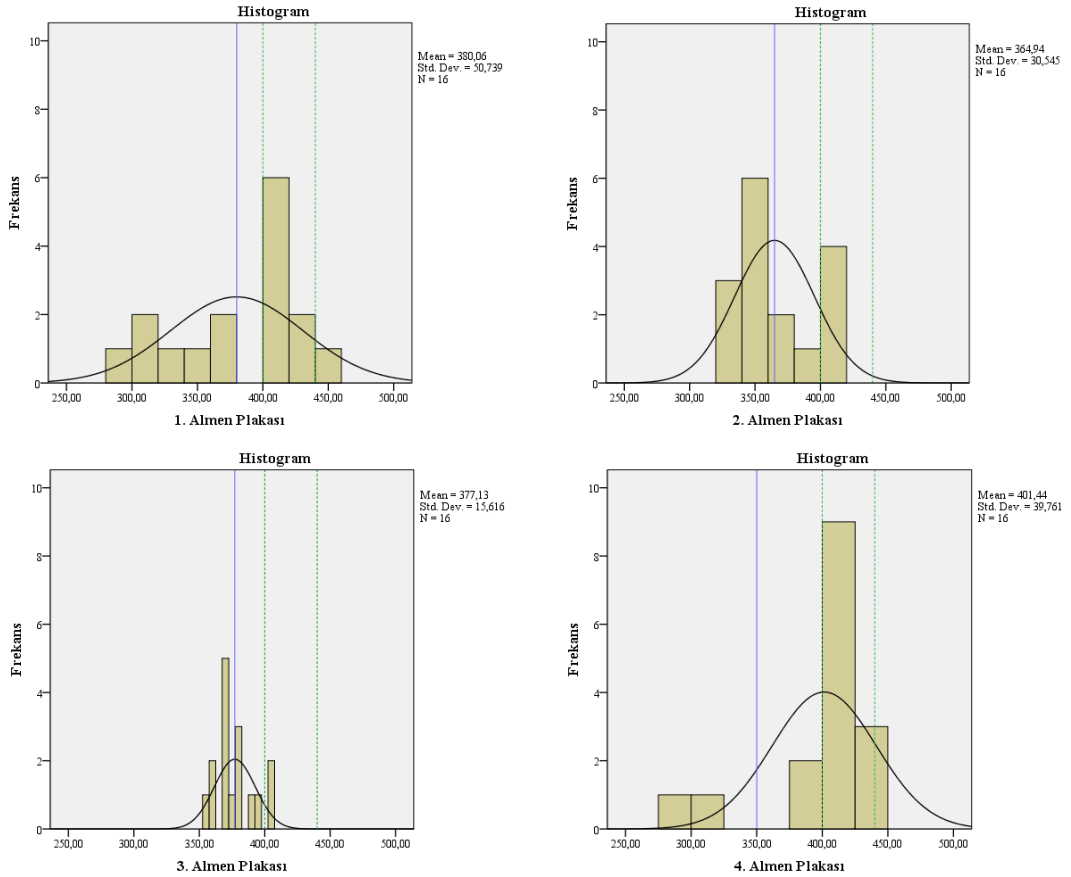
Histogramlar incelendiğinde 2 ve 3 nolu plakalardan elde edilen sonuçların istenen aralık dışında yığıldığı görülmektedir. 1 nolu plakada dağılımın kontrol edilebilir görüldüğü, 4 nolu plakanın ise istenen aralığa daha kolay kaydırılabilir bir dağılım sergilediği yorumu yapılabilir. Hedef tüm plakaların istenen aralıktaki yoğun bir dağılım göstermesi olduğundan, sürecin ön deneylerde belirlenmiş olan bağımsız parametre aralıklarıyla kontrol altına alınmadığı söylenebilir.

Mevcut plaka ortalamaları ve standart sapması üzerinden normal dağılıma göre hesaplanan (beklenen) değerler ile gözlenen değerler arasındaki farkın gösterildiği Q-Q grafikleri Şekil 2’de gösterilmektedir. Burada doğru etrafındaki yayılım ve farklar üzerinden süreç eğilimleri ve normal dağılım uygunluğu yorumlanabilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi genel olarak

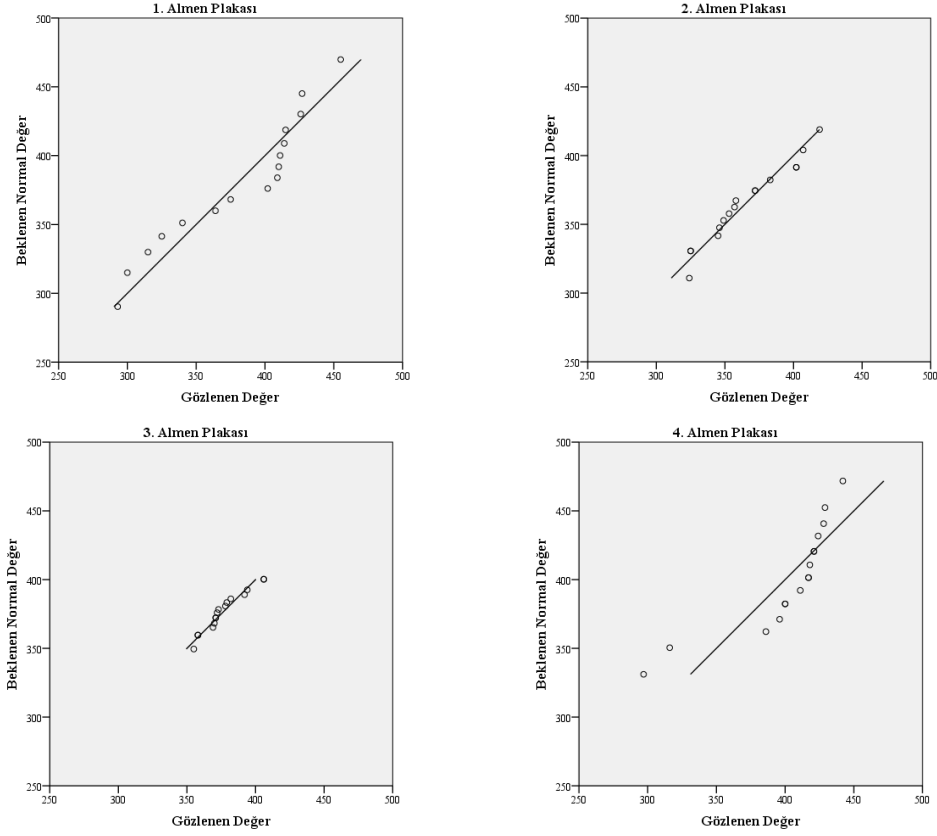
plaka sonuçları normal dağılıma uygun verilerdir. Doğrunun çevresine yayılım olarak bakıldığında 4 nolu plakanın belirli bir eğilim sergilediği söylenebilir.

30° ve 340° konumlarında bilyeli dövme uygulama sürelerinin Almen plaka sonuçları üzerinde oluşturduğu değişimleri incelemek amacıyla bağımsız değişken bazında ayrı ayrı kutu grafikleri çizilmiştir. Grafiklerde sıralanmış veri dizisinin orta yarısını (yani %50'sini) kapsayan aralığın (istatistiksel yayılma) gösterildiği kutular üzerinden yorumlamalar yapılmıştır. 30° için 3 farklı tekil değer dışında ağırlıklı olarak 29 saniyelik uygulama süreleriyle çalışıldığından, bu grafiklerden sadece ilgili uygulama süresi için Almen plakası bazındaki değişkenliklerin farkı irdelenmiştir (Şekil 3.).

Grafiklerde yeşil kesikli çizgiler istenen değer aralığını, mavi düz çizgi ise ortalama değeri ifade etmektedir. 29 saniye uygulama süresi için oluşan kutu grafikleri kıyaslandığında en düşük toplam değişkenliğin 3 numaralı Almen plakasında sağlandığı, ancak istenen aralıkta alt sınırın dışında kalma eğiliminin mevcut olduğu görülmektedir. Hem istenen aralıkta kalma hem de değişkenlik birlikte değerlendirildiğinde en uygun sonuçların 4 numaralı Almen plakasında alındığı söylenebilir. Her ne kadar tekil deneyler yapılabildiyse de 24 saniye uygulama süresi ile ilgili ek çalışmalar yapılabilir. 30 saniyenin de gözlenmesi, uygulama süresi artışının değişkenliğe etkisinin yorumlanmasında faydalı olabilir. İlgili konumda parça başına zaman kısıtından dolayı uygulama süresi arttırılamıyorsa, makinenin bilye püskürtme ile ilgili diğer parametrelerinin ele alınması faydalı olabilir.



**Şekil 1:**  
Almen plakalarına ilişkin ön deneylerde elde edilen sonuçlara ait histogramlar



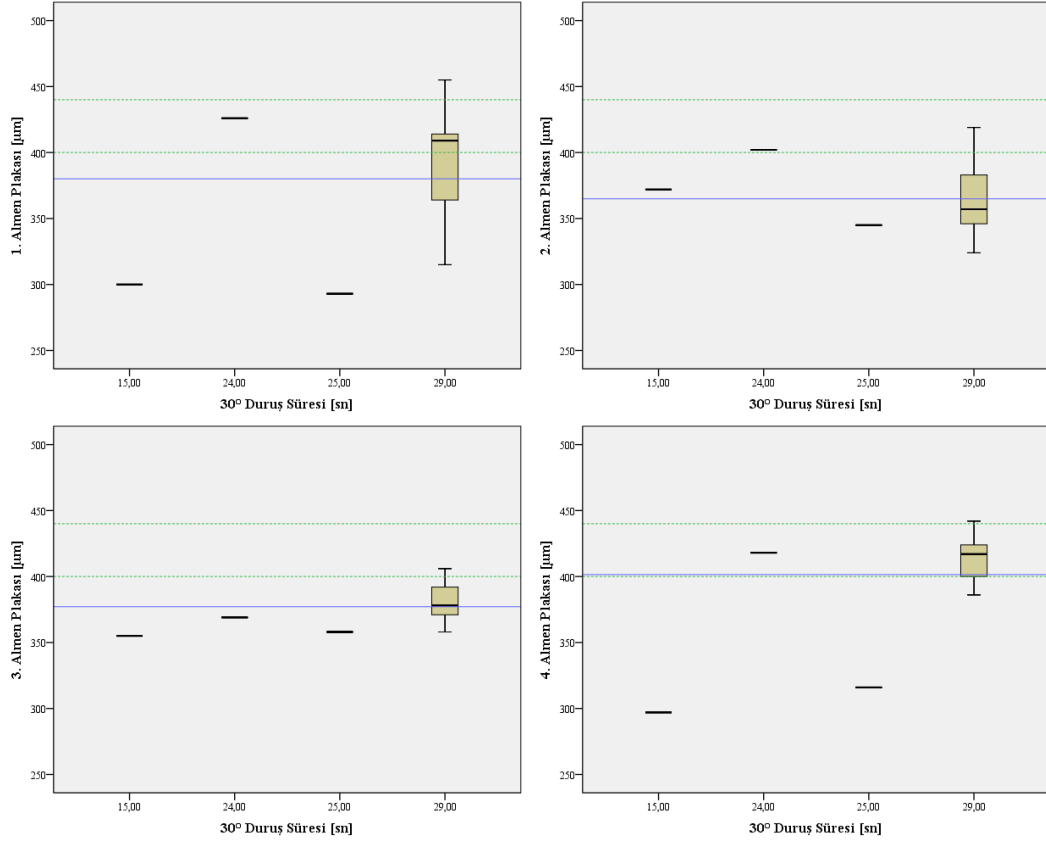
**Şekil 2:**  
*Ön deney sonuçlarının Almen plakaları bazında Q-Q grafikleri*

340° konumunda 3 tekil süre denemesinin dışında 20 saniye için 2 adet, 27 saniye için ise 11 adet deneme yapılmıştır. Oluşturulan kutu grafiklerinde de (Şekil 4.) ağırlıklı olarak 27 saniyelik uygulama sürelerinde oluşan grafikler irdelenmiştir. Şekil 4 incelendiğinde istenen aralıktaki en uygun sonuçların ve en düşük değişkenliğin 4 numaralı Almen plakasında hem 20 hem de 27 saniyelik uygulama sürelerinde sağlandığı görülmektedir. Toplam değişkenlik açısından en iyi sonuçlar 3 numaralı Almen plakasında gözlenmekle birlikte sonuçlar istenen aralığın altında kalma eğilimindedir.

340° konumda süreç eniyileme stratejisi olarak daha düşük uygulama sürelerinin etkilerini incelemek anlamlı olabilir. Bu şekilde 30° konumda temel alınan sürenin artırılmasının parça başına süreye yansımaları da telafi edilebilir.

Plakalar arasındaki farklılıklar sürecin, uygulama parçasının her bölgesinde aynı etkinlikle olmadığını düşündürmektedir. Bilyelerin vuruş etkisinin 3 numaralı plaka civarında optimuma yakın olduğu söylenebilir. Parça üzerinde bilyeli dövme uygulanan tüm bölgenin aynı etkinlikle bir uygulamaya maruz bırakılması için gerekli olabilecek konstrüktif çözümler araştırılmalıdır.

Ön deneylerin sonuçlarına ilişkin korelasyon tablosu Tablo 3'te görülmektedir. Tüm Almen plakalarının birbiriyle yüksek korelasyona sahip olması beklenmesine rağmen bu korelasyonun mevcut düzende sağlanmadığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla bilyeli dövme makinesinde tüm bölgenin aynı şekilde sürece maruz kalmadığı yorumu yapılabilir. 1 ve 2 nolu plakalar parçanın üst bölgesinde 3 ve 4 nolu plakalar ise alt bölgesinde yer almaktadır. 1-2 arasında net bir korelasyon görülürken 3-4 arasında kısmen var olduğu düşünülebilecek bir korelasyon mevcuttur. Dolayısıyla sürecin alt bölgede ve üst bölgede, bölgesel olarak aynı etkinlikle olduğu söylenebilir. 1 ve 4 nolu plakalar arasındaki net korelasyonu ise çapraz doğrultuda bilye vuruş etkisinin tutarlılığı şeklinde yorumlamak mümkündür.



Şekil 3:

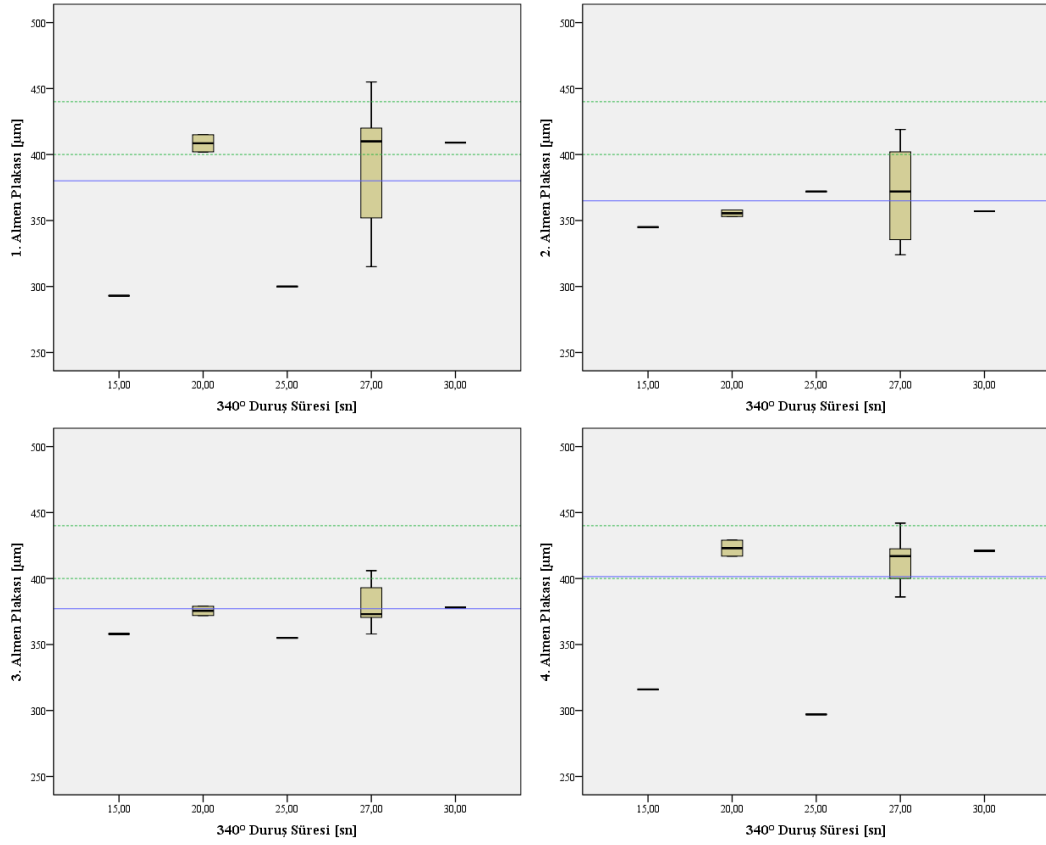
30° konumda uygulama sürelerine göre Almen plakası sonuçlarına ait kutu grafikleri

Bağımsız değişkenlerin birbiriyle korelasyon katsayısı sıfır olmadığından birbirlerinden tamamen bağımsız olmadıkları yorumu yapılabilir. Bağımsız değişkenlerden 30°'deki uygulama süresinin 4 nolu plaka sonuçları ile net bir korelasyona sahip olduğu görülmektedir. 1 ve 3 nolu plakalarla da kısmen korelasyona sahiptir. Ancak 2 nolu plaka ile korelasyonu oldukça düşüktür. Motorun bu konumundaki püskürtme süresinin en fazla 4 nolu plakayı etkilediği söylenebilir. İlgili konumun 2 nolu plaka sonuçlarını etkilediğine dair bir bulgu yoktur. Etki sıralaması  $4 > 3 > 1 > 2$  şeklindedir.

340°'deki uygulama süresinin hiçbir plaka sonucuyla net korelasyonu yoktur. Korelasyon katsayılarına bakıldığında ise 30°'deki sonuçlara göre daha düşük etkide olmak üzere aynı yorum yapılabilir. Etki sıralaması  $4 > 3 > 1 > 2$  şeklindedir.

Test edilen plakaların ortalama Almen test sonuçları arasındaki farkların önemli olup olmadığına yönelik bilgi edinmek amacıyla, plakalardan eşleştirilmiş örnekler arasında T-Testi uygulanmıştır. Bu testte sıfır hipotezi ortalamalar arasında önemli bir fark olmadığı, karşı hipotez ise önemli bir fark olduğu şeklinde kurulmakta ve karar ölçütü olarak bulunan p değerinin  $\alpha (=0,05)$  ile kıyaslaması yapılmaktadır.  $p < \alpha$  durumunda sıfır hipotezi reddedilmekte ve sonuç, ortalamalar arasında önemli bir fark olduğu şeklinde yorumlanmaktadır. Ters durumda farkın önemli olmadığı yorumu yapılabilmektedir.

Ön deneylerde elde edilen verilerle Almen plakalarının karşılıklı olarak test edildiği sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Burada 4 nolu plakanın diğer plakalara göre ortalama değer farkının önemli olduğu, diğer eşleşmeler arasında önemli bir fark olmadığı görülmektedir. Buradan bilyeli dövme sürecinin 4 nolu plaka civarında, diğer plakalara göre farklı etki ettiği söylenebilir.



Şekil 4:

340° konumda uygulama sürelerine göre Almen plakası sonuçlarına ait kutu grafikleri

Tablo 3. Ön deneylere ait korelasyon tablosu

Değişken		30° Uygulama Süresi	340° Uygulama Süresi	1. Almen Plakası	2. Almen Plakası	3. Almen Plakası	4. Almen Plakası
30° Uygulama Süresi	Pearson Korelasyonu	1	0,191	0,442	-0,121	0,494	0,783**
	Önem (çift yönlü)		0,479	0,087	0,655	0,052	0,000
	N	16	16	16	16	16	16
340° Uygulama Süresi	Pearson Korelasyonu	0,191	1	0,309	0,192	0,337	0,438
	Önem (çift yönlü)	0,479		0,244	0,477	0,202	0,090
	N	16	16	16	16	16	16
1. Almen Plakası	Pearson Korelasyonu	0,442	0,309	1	0,578*	0,437	0,766**
	Önem (çift yönlü)	0,087	0,244		0,019	0,091	0,001
	N	16	16	16	16	16	16
2. Almen Plakası	Pearson Korelasyonu	-0,121	0,192	0,578*	1	0,454	0,074
	Önem (çift yönlü)	0,655	0,477	0,019		0,077	0,786
	N	16	16	16	16	16	16
3. Almen Plakası	Pearson Korelasyonu	0,494	0,337	0,437	0,454	1	0,439
	Önem (çift yönlü)	0,052	0,202	0,091	0,077		0,089
	N	16	16	16	16	16	16
4. Almen Plakası	Pearson Korelasyonu	0,783**	0,438	0,766**	0,074	0,439	1
	Önem (çift yönlü)	0,000	0,090	0,001	0,786	0,089	
	N	16	16	16	16	16	16

\*\*Korelasyon 0,01 seviyesinde önemlidir (çift yönlü). \*Korelasyon 0,05 seviyesinde önemlidir (çift yönlü).

**Tablo 4. Ön deneylerde elde edilen plaka sonuçlarına ait eşleştirilmiş iki örnek T-Testi sonuçları**

Eşleştirilmiş Plakalar	Eşleştirilmiş Farklar (Paired Differences)					t	df	Önem (Çift Yönlü Test)
	Ortalama	Standart Sapma	Standart Hata Ort.	%95 Fark Güven Aralığı				
				Alt	Üst			
1-2	15,12500	41,44052	10,36013	-6,95709	37,20709	1,460	15	0,165
1-3	2,93750	46,11358	11,52840	-21,63469	27,50969	0,255	15	0,802
1-4	-21,37500	32,63102	8,15775	-38,76284	-3,98716	-2,620	15	0,019
2-3	-12,18750	27,26956	6,81739	-26,71843	2,34343	-1,788	15	0,094
2-4	-36,50000	48,31563	12,07891	-62,24558	-10,75442	-3,022	15	0,009
3-4	-24,31250	35,76725	8,94181	-43,37152	-5,25348	-2,719	15	0,016

## 2.2 İkinci Deney Setinde Elde Edilen Bulgular

İkinci deney setinde ön deneylerde elde edilen bulguların doğrulanması ve farklı uygulama sürelerinin getireceği sonuçların görülmesi hedeflenmiştir. Bu deneylerde temel alınan uygulama süreleri ve elde edilen Almen plaka sonuçları Tablo 5’te, ortalama ve standart sapma bilgileri ise Tablo 6’da görülmektedir.

İstenen değer aralığı (400-440 µm) olarak bakıldığında 3 nolu Almen plakasından en iyi sonuçların alındığı görülmektedir. Ortalama olarak istenen aralıkta kalmasının yanında değişkenliği de tüm plakalar içerisinde en düşük olan plaka 3 nolu Almen plakasıdır. 1 ve 2 nolu plakaların ortalama değerlerinin neredeyse aynı gelmesi bu bölgede süreç etkinliğinin homojen duruma yaklaştığı şeklinde yorumlanabilir.

İkinci deney setinde Almen plakalarından elde edilen sonuçlara ilişkin histogram grafikleri Şekil 5’te verilmiştir. Histogramlar incelendiğinde değişkenliğin kontrol altına alınmasıyla tüm plakalarda sürecin kontrol altına alınabilir olduğu söylenebilir. Mevcut standart sapma değerlerinin, istenen değer aralığını sağlamak açısından çok yüksek olduğu görülmektedir.

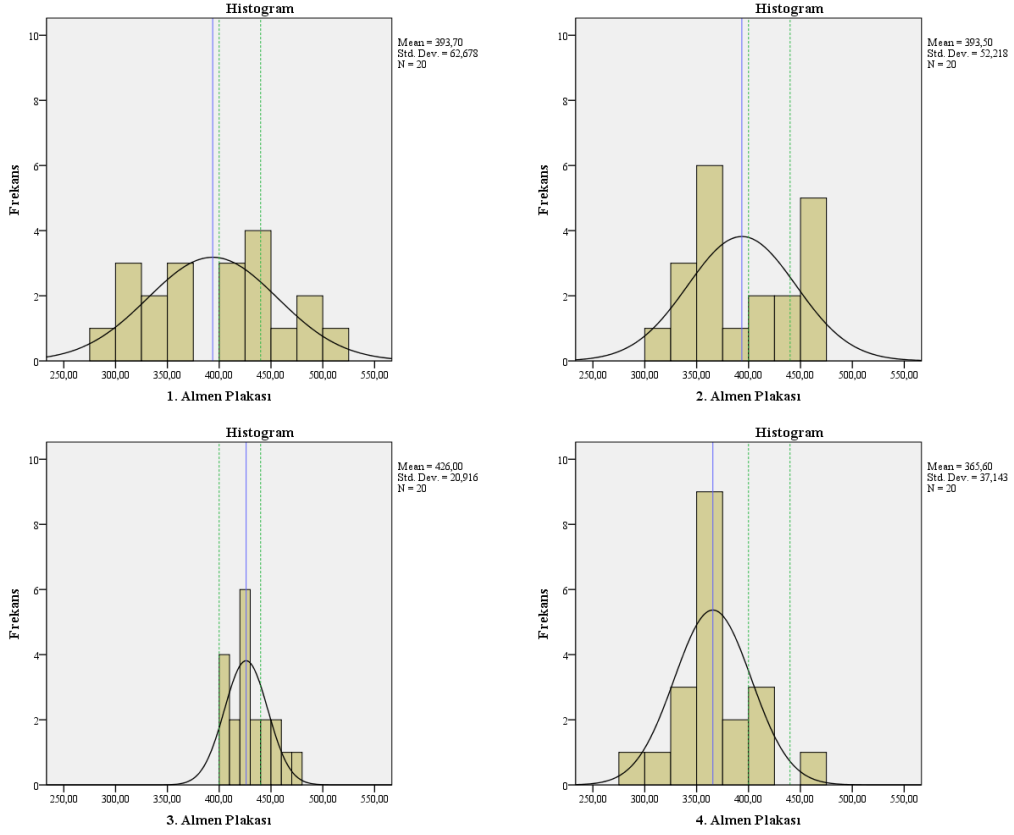
**Tablo 5. İkinci deney setinde elde edilen sonuç verileri**

Bağımsız Değişkenler		Bağımlı Değişkenler			
Uygulama Süresi (sn)		Almen Plakası Sonuçları (µm)			
30°	340°	1	2	3	4
15	15	322	330	414	329
13	2	290	310	400	340
15	5	330	360	430	290
15	15	320	340	420	350
20	15	330	370	420	360
30	15	350	350	400	360
30	15	370	360	420	380
30	15	370	360	400	360
34	19	400	390	410	390
36	21	410	400	430	410
15	5	320	340	420	350
25	17	460	370	420	400
3	13	500	430	420	460
20	10	476	404	400	415
15	10	440	470	460	370
13	10	480	470	450	365
18	10	430	470	470	360
12	6	426	430	440	345
12	10	420	460	440	320
8	10	430	456	456	358



**Tablo 6. Almen plakalarının ikinci deney setinden elde edilen tanımlayıcı istatistikî sonuçları**

Almen Plakası	Ort.	Std. Sapma	Varyans	Aralık	Min.	Maks.
1	393,70	62,67804	3928,537	210,00	290,00	500,00
2	393,50	52,21766	2726,684	160,00	310,00	470,00
3	426,00	20,91587	437,474	70,00	400,00	470,00
4	365,60	37,14325	1379,621	170,00	290,00	460,00

**Şekil 5:**

*Almen plakalarına ilişkin ikinci set deneylerde elde edilen sonuçlara ait histogramlar*

İkinci deney seti sonuçlarına ait Q-Q grafikleri Şekil 6'da görülmektedir. Grafikler incelendiğinde tüm plaka sonuçlarının normal dağılıma uygun olduğu ve gözlenen değerlerin doğrunun her iki tarafına yayılımı açısından herhangi bir net eğilim sergilenmediği söylenebilir. İkinci deney setinden elde edilen sonuçlarda da öncelikle bağımsız değişkenler bazında kutu grafikleri oluşturulmuş ve süre farklılıklarının Almen plakası sonuçları üzerinde yarattığı etki irdelenmiştir. 30° konumunda uygulama süreleri ve plakalar bazında oluşturulan kutu grafikleri Şekil 7'de görülmektedir. Görselleştirmede yeşil kesikli çizgiler istenen değer aralığını, mavi çizgi ise plakaya ait ortalama sonucu göstermektedir.

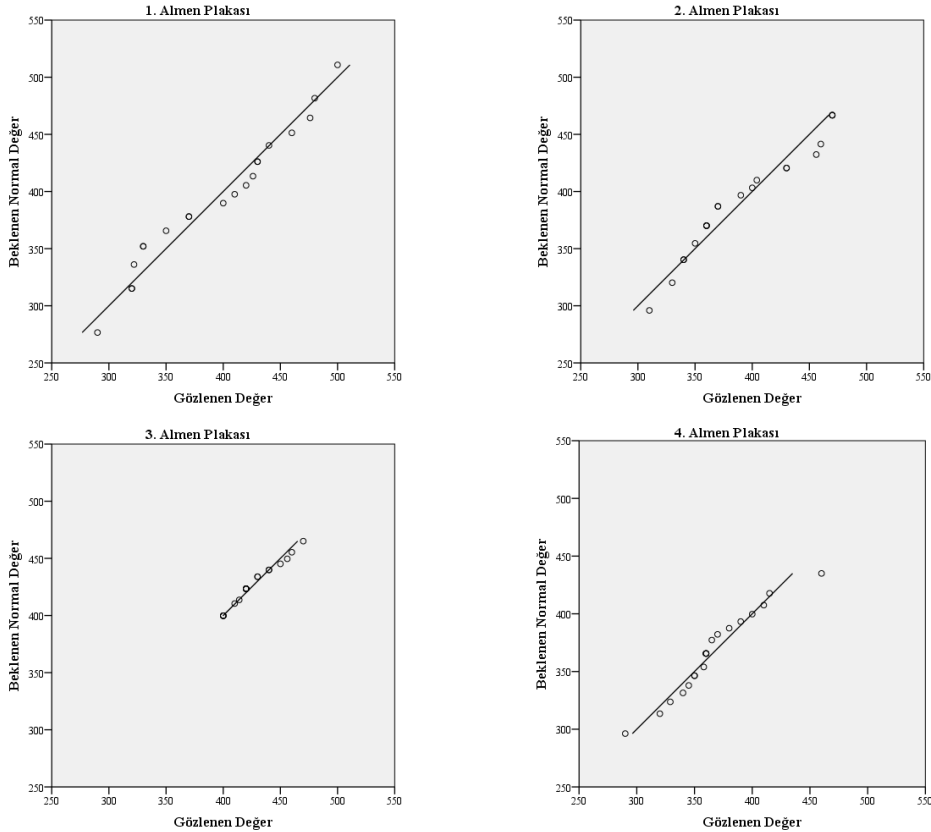
1 ve 2 numaralı Almen plakaları için grafik üzerinden yorum yapmak uygun görünmemektedir. 3 numaralı plakada değerlerin, maksimum seviyenin üstünde kalan sonuçlar dışında tüm uygulama sürelerinde genel olarak istenen aralıkta kaldığı görülmektedir. 4 numaralı plakada süre arttırıldıkça Almen değerlerinde yukarıya doğru net bir eğilim gözlenmektedir. Aynı yorum 340° konumundaki sonuçlar (Şekil 8) için de yapılabilir.

340° konumda daha düşük uygulama sürelerinin etkileri incelendiğinde 6-13 saniye aralığında 4 nolu plaka dışında istenen aralıkta sonuçlara ulaşıldığı gözlenmektedir. Ancak 4

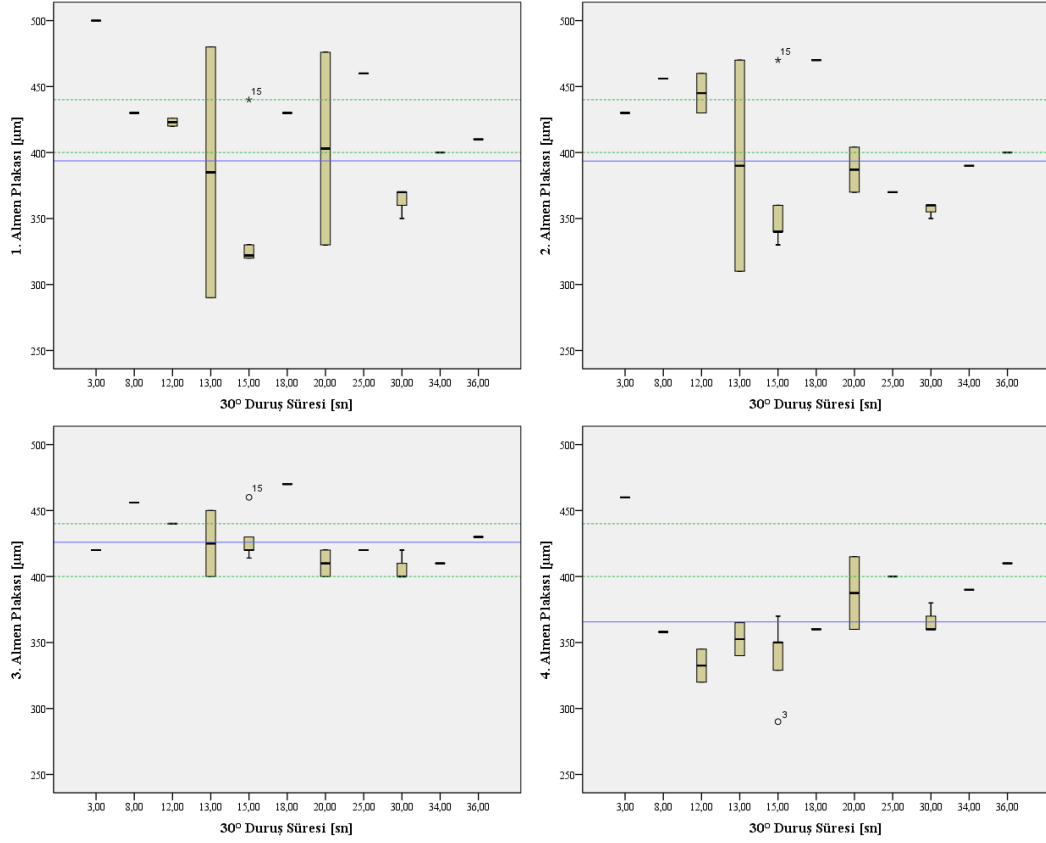
nolu plaka üzerindeki etkilerinin araştırılması için daha fazla sayıda deney yapılmasına ihtiyaç olduğu görülmektedir. Plakalar arasındaki farklılıklar sürecin, uygulama parçasının her bölgesinde aynı etkinlikte olmadığını düşüncesini güçlendirmektedir. Bilyelerin vuruş etkisinin 3 numaralı plaka civarında optimuma yakın olduğu söylenebilir. Parça üzerinde bilyeli dövme uygulanan tüm bölgenin aynı etkinlikte bir uygulamaya maruz bırakılması için gerekli olabilecek konstrüktif çözümlerin araştırılmasına devam edilmelidir.

İkinci deney sonuçlarına ilişkin korelasyon tablosu Tablo 7’de görülmektedir. Plakalar arası korelasyonların iki deney seti arasında yapılmış olan iyileştirmeler ile bu deney setinde arttığı gözlenmektedir. 1-2, 1-4 ve 2-3 nolu plakalar arasında net bir korelasyon yakalanmıştır. Çapraz plakalar arasında sağlanan bu korelasyon bilye vuruşlarında daha geniş bir alanda etkinliğin yakalandığı şeklinde yorumlanabilir. 1-2 nolu plakalar arasındaki korelasyon parçanın üst uygulama bölgesinde yer alan plakalar arasında da benzer süreç etkinliğinin sağlandığını düşündürmektedir.

Ön deney setinde de bağımsız değişkenlerin birbiriyle korelasyonunun sıfır olmamasından hareketle tamamen bağımsız olmadıkları şeklinde yapılan yorum, bu deney setinde net bir korelasyon şekline dönüşmüştür. Dolayısıyla bir bağımsız değişken üzerinde yapılan değişimin, -diğeri değiştirilmese dahi- sonuçlar üzerinde her ikisinden kaynaklı bir farklılaşmaya yol açacağı bilinmelidir. Bu durum sürecin ilgili bağımsız değişkenler üzerinden kontrolünün oldukça karmaşık hale gelmesine sebep olabilir. Seçilen bağımsız değişkenlerin değiştirilmesi ve sonraki deneylere farklı bağımsız değişkenlerin katılması gerekmektedir.



**Şekil 6:**  
*İkinci deney seti sonuçlarının Almen plakaları bazında Q-Q grafikleri*



**Şekil 7:**

*30° konumda uygulama sürelerine göre Almen plakası sonuçlarına ait kutu grafikleri*

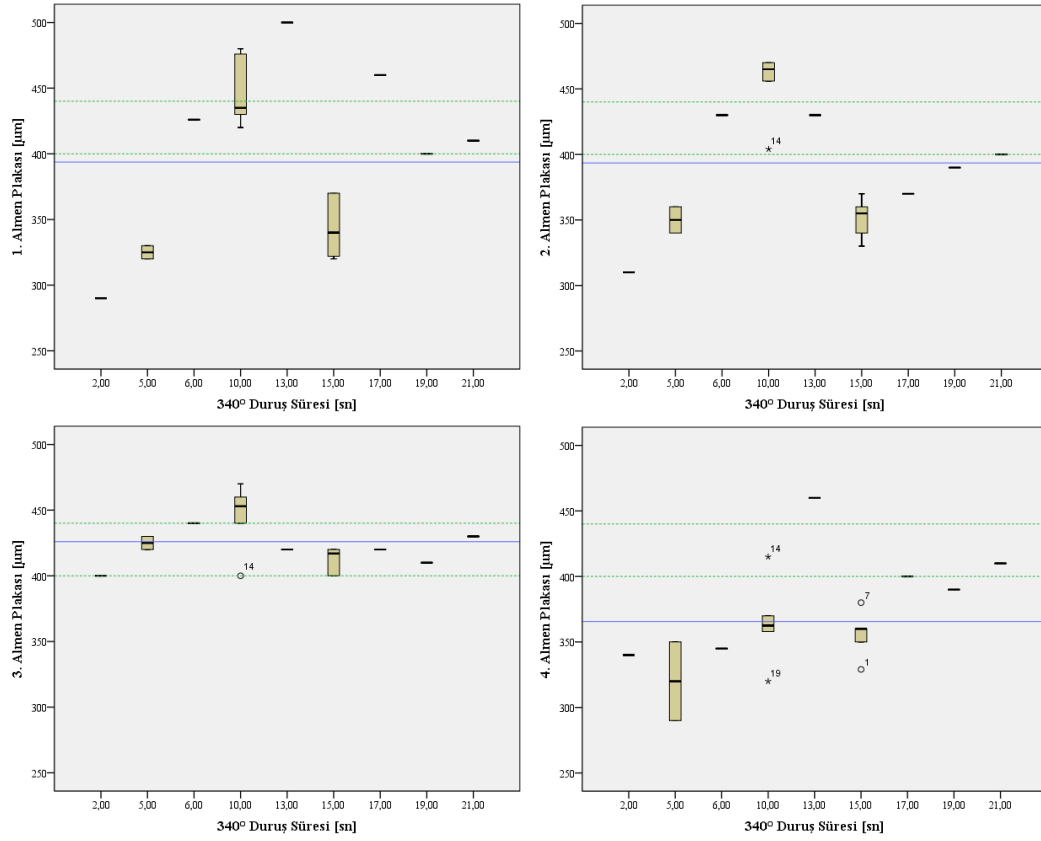
30°'deki uygulama süresi hiçbir plaka ile önemli düzeyde ilişkili değildir. 340°'deki uygulama süresi ise 4 nolu plaka ile ilişkili görünmektedir. Sol alt plaka olan 4 nolu Almen plakasının, 340°'deki uygulama süresi değişimiyle net ilişkili sonuçlar vermiş olduğu söylenebilir. Bununla birlikte diğer plakalarda korelasyon bulunmamasından hareketle 340°'deki uygulama süresi değişiminin diğer plakalar üzerinde bir etkisi olmadığı yorumu yapılabilir.

Eşleştirilmiş plakaların Almen testi sonuç ortalamaları arasındaki farkların önemli olup olmadığına dair yapılmış olan T-Testi sonuçları Tablo 8'de verilmiştir. Görüldüğü gibi 1 ve 2 nolu plakaların kendi aralarında ortalamaları arasında önemli bir fark gözlenemezken diğer tüm eşleşmelerde ortalamalar arasında önemli bir fark söz konusudur. Dolayısıyla sürecin uygulandığı parça üzerinde, ortalamalar açısından önemli farklar içeren sonuçlara yol açtığı söylenebilir.

### 3. SONUÇLAR

Yapılan deneylerle elde edilen temel sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Almen plaka sonuçları arasındaki farklılıklardan yola çıkılarak, bilyeli dövme sürecinin uygulama parçasının tüm bölgelerinde istenen düzeyde bir homojen etki göstermediği söylenebilir.
- İkinci set deneylerde, başlangıçta belirlenmiş olan bağımsız değişkenlerin birbiriyle korelasyona sahip olduğu netleşmiştir. Yeni belirlenecek bağımsız değişkenlerle deneylerin sürdürülmesinde fayda görülmektedir.



Şekil 8:

340° konumda uygulama sürelerine göre Almen plakası sonuçlarına ait kutu grafikleri

Tablo 7. İkinci deney setine ait korelasyon tablosu

Değişken		30° Uygulama Süresi	340° Uygulama Süresi	1. Almen Plakası	2. Almen Plakası	3. Almen Plakası	4. Almen Plakası
30° Uyg. Süresi	Pearson Korelasyonu	1	<b>0,664**</b>	-0,159	-0,316	-0,390	0,183
	Önem (çift yönlü)		0,001	0,502	0,174	0,089	0,441
	N	20	20	20	20	20	20
340° Uyg. Süresi	Pearson Korelasyonu	<b>0,664**</b>	1	0,153	-0,064	-0,207	<b>0,486*</b>
	Önem (çift yönlü)	0,001		0,519	0,790	0,381	0,030
	N	20	20	20	20	20	20
1. Almen Plakası	Pearson Korelasyonu	-0,159	0,153	1	<b>0,798**</b>	0,418	<b>0,630**</b>
	Önem (çift yönlü)	0,502	0,519		0,000	0,067	0,003
	N	20	20	20	20	20	20
2. Almen Plakası	Pearson Korelasyonu	-0,316	-0,064	<b>0,798**</b>	1	<b>0,802**</b>	0,209
	Önem (çift yönlü)	0,174	0,790	0,000		0,000	0,376
	N	20	20	20	20	20	20
3. Almen Plakası	Pearson Korelasyonu	-0,390	-0,207	<b>0,418</b>	<b>0,802**</b>	1	-0,156
	Önem (çift yönlü)	0,089	0,381	0,067	0,000		0,510
	N	20	20	20	20	20	20
4. Almen Plakası	Pearson Korelasyonu	0,183	<b>0,486*</b>	<b>0,630**</b>	0,209	-0,156	1
	Önem (çift yönlü)	0,441	0,030	0,003	0,376	0,510	
	N	20	20	20	20	20	20

\*\*Korelasyon 0,01 seviyesinde önemlidir (2-tailed). \*Korelasyon 0,05 seviyesinde önemlidir (2-tailed)

**Tablo 8. İkinci deney setinde elde edilen plaka sonuçlarına ait eşleştirilmiş iki örnek T-Testi sonuçları**

Eşleştirilmiş Plakalar	Çift Yönlü Farklar					t	df	Sig. (2-tailed)
	Ortalama	Std. Sapma	Std. Ort. Hata	95% Güvenilirlik Aralığı				
				Alt	Üst			
1-2	0,20000	37,86347	8,46653	-17,52065	17,92065	0,024	19	0,981
1-3	-32,30000	57,19137	12,78838	-59,06638	-5,53362	-2,526	19	0,021
1-4	28,10000	48,74628	10,90000	5,28604	50,91396	2,578	19	0,018
2-3	-32,50000	37,58989	8,40536	-50,09261	-14,90739	-3,867	19	0,001
2-4	27,90000	57,40337	12,83578	1,03439	54,76561	2,174	19	0,043
3-4	60,40000	45,38769	10,14900	39,15791	81,64209	5,951	19	0,000

- 30° konumda uygulama süresinin süreç sonuçları üzerinde daha fazla etki yaptığı gözlenmiştir. 340° konumundaki süre kısmen aşağıya çekilerek optimizasyona gidilebilir.

Deney sonuçları, iki deney seti süresince gerçekleştirilen iyileştirmelerin süreç sonuçlarında istenen aralık açısından fayda sağladığını doğrulamıştır.

Daha sonraki çalışmalarda, bağımsız değişkenlerin artırılarak yeni deneysel tasarımların yapılması, gerçekleştirilecek olan konstrüktif iyileştirmeler sonrasında deneylerin tekrarlanması, ele alınan ve proje kapsamında geliştirilmiş olan makinenin, muadil bir makineyle aynı deney seti üzerinden kıyaslanması ve sonuçların doğrulanması planlanmıştır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Teknoloji ve Yenilik Destek Programları Başkanlığı (TÜBİTAK TEYDEB) tarafından Sanayi AR-GE Projeleri Destekleme Programı kapsamında 3140906 numaralı ve “Otomotiv Seri İmalat Uygulamalarında Shot Peening Metodu Kullanımının Araştırılması ve Sürece İlişkin Makine Geliştirilmesi” adlı proje kapsamında desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

1. Bagherifard, Ghelichi, S.R. ve Guagliano M. (2012) On the shot peening surface coverage and its assessment by means of finite element simulation: A critical review and some original developments, *Applied Surface Science* 259, 186– 194. doi: 10.1016/j.apsusc.2012.07.017
2. Gangaraj, S.M.H., Guagliano, M. ve Farrahi, G.H. (2014) An approach to relate shot peening finite element simulation to the actual coverage, *Surface & Coatings Technology* 243, 39–45. doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.03.057
3. Guechichi, H., Castex, L. ve Benkhettab, M. (2013) An analytical model to relate shot peening almen intensity to shot velocity, *Mechanics Based Design of Structures and Machines* 41, 79–99. doi:10.1080/15397734.2012.703607
4. Larose, G.S., Perron C., Bocher, P. ve Le’vesque M. (2013) On the effect of the peening trajectory in shot peen forming, *Finite Elements in Analysis and Design* 69, 48–61. doi.org/10.1016/j.finel.2013.02.003
5. Reilley, M. (2013) *Product Design & Development*, Advantage Business Media.

