



## Robot kontrollü indüksiyon sertleştirme parametrelerinin sac metal kalıp yüzey sertliğine etkilerinin Taguchi metodu ile incelenmesi

### Investigation with Taguchi method of the effects of the robot-controlled induction hardening parameters on surface hardness of sheet metal moulds

Ensar YILDIRIM<sup>1</sup>, Halit CEBİ<sup>1</sup>, Murat ŞEN<sup>1\*</sup>, Erkan Serdar YILMAZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yıldız Kalıp Sanayi ve Ticaret AŞ, Hadımköy, İstanbul

ensar.yildirim@yildizkalip.com, halit.cebi@yildizkalip.com, murat.sen@yildizkalip.com, serdar.yilmaz@yildizkalip.com

Geliş Tarihi/Received: 07.01.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 27.04.2016

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.24540

Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Otomotiv sektörü için üretilen sac şekillendirme kalıplarında kullanılan ve %0.35 oranına kadar varan düşük miktarda karbon bulunan çeliklerin yüzeyleri indüksiyon yüzey sertleştirme yöntemi ile manuel olarak ta sertleştirilebilir. Bu çalışmada, sac büküm kalıplarının imalatında sık kullanılan 1.2333 (G59CrMoV18-5) ve EN-JS 2070 küresel grafitli dökme demir iş parçalarının yüzeylerinin geliştirilen bir robot kontrollü indüksiyon sistemi ile sertleştirilmesinde ısı işlem parametrelerinin yüzey sertliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İş parçası malzemesi, ısı işlem uygulama/sertleştirme sıcaklığı ve ilerleme miktarı kontrol faktörleri olarak seçilmiş ve L18 Taguchi ortogonal dizisine göre deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda; yüzey sertliği üzerinde en etkili parametreler sırasıyla; iş parçası malzemesi\*uygulama sıcaklığı etkileşimi (%36.193), ilerleme miktarı (%33.92) ve uygulama sıcaklığı (%12.655) olmuştur. Tüm ısı işlem şartlarında 1.2333 (G59CrMoV18-5) malzemenin yüzey sertliği daha yüksek elde edilmiştir. İlerleme miktarının azaltılmasıyla her iki malzeme içinde yüzey sertlik değerlerinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Uygulama sıcaklığının artmasına bağlı olarak yüzey sertlik değerlerinin EN-JS 2070 malzemesi için azalırken, 1.2333 malzemesi için arttığı görülmüştür. Ayrıca, seçilen şartlarda yüzey sertlik değerlerinin tahmini için ikinci dereceden tahminsel denklem geliştirilmiş ve bu denklemin korelasyon katsayısı  $R^2=0.81$  hesaplanmıştır.

**Araştırma kelimeleri:** Yüzey sertleştirme, Sac metal şekillendirme kalıpları, İndüksiyonla sertleştirme, Taguchi metodu

#### Abstract

The surfaces of the steels which are used in the sheet metal forming moulds produced for the automotive industry and which include carbon in a low amount up to 0.35% by ratio can be hardened manually through induction surface hardening method. The effects of heat treatment parameters on surface hardness in the hardening of the surfaces of workpieces made of 1.2333 cast tool steel often used in the production of sheet metal bending moulds and EN-JS 2070 spheroidal graphite cast iron using a robot-controlled induction system developed were investigated in this study. Workpiece material, heat treatment/hardening temperature, and feed rate were selected as the control factors and experiments were conducted according to L18 Taguchi orthogonal array. As a result of the experimental study, the most effective parameters on surface hardness were the interaction between workpiece material and treatment heat (36.193%), feed rate (33.92%) and treatment heat (12.655%) respectively. Under all heat treatment conditions, the surface hardness of the 1.2333 (G59CrMoV18-5) material was obtained higher. By reducing the feed rate it has been concluded that surface hardness of both materials are increased. Depending on increasing application temperature while surface hardness value decreased for EN-JS 2070 material, increased for 1.2333 material. Moreover, a predictive quadratic equation was developed to predict the surface hardness values under the selected conditions and the correlation coefficient of this equation was calculated as  $R^2=0.81$ .

**Keywords:** Surface hardening, Sheet metal forming mould, Induction hardening, Taguchi method

## 1 Giriş

Çelik, sanayinin en çok ihtiyaç duyduğu bir malzemedir. Çelik malzemenin sert bir yapıda, buna bağlı olarak da aşınmaya karşı dayanıklı olması istenir. Çelik malzemelerin sertliği, kullanılacakları yere göre farklılık gösterir. Örneğin, bir otomobilin teker hareketini sağlayan milin sertliği ile tren raylarının hareketini sağlayan milin sertliği farklıdır. Malzemenin hem sert hem de dayanıklı olması amacıyla gerçekleştirilen yüzey sertleştirme işlemi endüstride çelik malzemelerin içyapılarına dokunmadan, genellikle yüzeysel olarak aşınmaya veya zorlanmaya maruz kalan malzemelere uygulanır. Ayrıca diğer sertleştirme yöntemleri uygulandığında şekil bozulmaları oluşabilecek parçalara da uygulanmaktadır.

İndüksiyon yüzey sertleştirme yöntemi ile içerisinde %0.35'e varan düşük miktarda karbon bulunan çelikler sertleştirilebilir. Diğer yöntemlerle bu kadar düşük oranda karbonlu çelikleri sertleştirmek mümkün değildir. Bunun sebebi; bünyelerinde az miktarda karbon bulunmasından dolayı martenzit yapıya

geçerek karbür oluşturmamalarıdır. Otomotiv devleri için üretilen kalıp imalatlarında kalite standardizasyonu oldukça önemlidir. Kalıp yüzeylerinde farklı operasyonlarda farklı sertlikler oluşturmak ve bağdaşık (homojen) sertlikte yüzeyler elde edebilmek için bir otomasyona ihtiyaç duyulmaktadır.

Kalıp imalat sektöründe kalıp yüzeyleri hem alevle hem de indüksiyon bobinli manuel olarak sertleştirilebilmektedir. Alevle kalıp yüzeylerinin sertleştirilmesi pek tercih edilen bir uygulama türü değildir. Çünkü düşük karbonlu çeliklerde indüksiyon sertleştirme yöntemiyle ulaşılan değerlere, alevle sertleştirme yöntemiyle ulaşamaz. Yüksek karbonlu çeliklerde ise yüzeyden çekirdeğe kadar martenzit yapı oluşacağından keskin kenar ve köşeli parçalarda çatlama tehlikesi meydana çıkar. İndüksiyonlu manuel olarak yapılan yüzey sertleştirmede ise sertleştirilmiş yüzeyin sertliği ve kalitesi tamamen operatörün bilgi, beceri ve tecrübesi ile sınırlıdır. Manuel indüksiyonlu sertleştirmenin en büyük dezavantajı elektrik tüketimi ve sürekli ayarlama gerektiren operasyonlarının oldukça masraflı oluşudur. Sargıların imal edilmesi ve geliştirilmesi oldukça pahalıdır, komplike sargıların

gerektiği durumlarda ve bunun yanında parça sayısı da çok az ise sertleştirme maliyeti çok artar. Keskin kenar ve köşeli parçaların bu bölgelerinde aşırı ısınmalar meydana geleceği için güçlükler oluşur, kalifiye işçiye ihtiyaç duyulur. Sayılan bu dezavantajlar otomasyon uygulaması ile giderilerek avantajla dönüştürülebilir.

Kalıp imalatı yapan ve otomotiv firmaları gibi ana firmalar için kendi bünyelerindeki preslerle sac büküm işlemlerini de gerçekleştiren firmaların imalatlarının yıllık kapasiteleri göz önünde bulundurulduğunda indüksiyonla yüzey sertleştirme uygulamasının otomasyonla birleştirilmesi kalite açısından çok büyük katkı sağlayacaktır. Bu aşamada robot teknolojileri bu amaca büyük hizmet edecektir. Otomasyonla beraber iş parçalarındaki keskin köşelerde yaşanan problemler akımın çok hassas olarak kontrol edilmesinin sağlanmasıyla ve ısıtma süreleri, mesafe ayarları gibi parametrelerin de otomatik kontrol edilmesiyle giderilmiş olacaktır. Daha homojen sertlikte yüzeyler elde edilebilecektir. Aynı zamanda prosesin ekonomik olmasını da beraberinde getirecektir.

Literatürde özellikle otomotiv parçaları ve kalıp sektöründe sık kullanılan malzemelerin farklı yöntemlerle sertleştirilmesinde yüzey sertliği ve derinliğinin araştırılması, kontrolü ve değerlendirilmesi üzerine teorik ve deneysel olarak yapılan çalışmalar önemini korumaktadır. Kochure ve Nandurkar [1], EN8 D çelik malzemesinin indüksiyon sertleştirme işlemine optimum proses parametrelerinin belirlenmesi için Taguchi metodundan yararlanmışlardır. Çalışmada L9 ortogonal matrisini, sinyal-gürültü oranını ve ANOVA tekniğini kullanmışlardır. Kalite karakteristiği olarak sertlik esas alınmıştır. Proses parametreleri olarak sertleştirme işlemine ait güç ve süre dikkate alınmıştır. ANOVA' dan proses parametrelerinin sonuca etki oranları bulunmuştur. Çalışmayı desteklemek amacıyla regresyon analizi ve doğrulama testleri gerçekleştirilmiştir. Kohli ve Singh [2], normal ve haddelenmiş AISI 1040 malzemesinin indüksiyon sertleştirme proses parametrelerinin optimum değerlerini bulmak için yüzey cevap metodunu kullanmışlardır. Proses parametreleri olarak ilerleme miktarını, akımı ve iş parçası ile indüksiyon bobini arasındaki boşluğu dikkate almışlardır. Çalışmada kalite karakteristiği olarak sertlik esas alınmıştır. Optimum proses parametreleri deneysel olarak incelenmiştir. İyapı ve elektron mikroskop analizi ile de çalışma onaylanmıştır. Misra ve diğ. [3], çekici aks millerinin indüksiyon sertleştirilmesinde optimum proses parametrelerinin kombinasyonunu bulmak için araştırmalarda bulunmuşlardır. Kalite karakteristiği olarak sertlik ve sertleşme derinliğini esas almışlardır. Proses parametreleri olarak ise güç frekansını, ilerleme miktarını, su verme basınç ve sıcaklığını dikkate almışlardır. Proses parametrelerinin kalite karakteristikleri üzerine etki oranlarını belirleyebilmek amacıyla ANOVA' dan yararlanmışlardır. Ayrıca çalışmada regresyon analizi yapılmış olup 0.969 oranı elde edilmiştir. Shen ve diğ. [4], kalıp dolguları veya kanalları için indüksiyon sertleştirme işlemi robotik çevrimdışı programlama sistemi ile incelemişlerdir. Bu işlem düzensiz yüzeyler dâhil olmak üzere tüm sertleştirilecek yüzeylerde uygulanabilmektedir. Robotik çevrimdışı programlama sisteminin geçerliliğini deneyler ile doğrulamışlardır ve indüksiyon sertleştirme işlemi analiz etmişlerdir. Qi ve diğ. [5], elektrik teması ile dayanımı arttırılmış bir katmanın sıcaklık alanını ANSYS yazılımı ile simüle ederek tabakanın derinliğini ve genişliğini hesaplamışlar ve ayrıca dayanımı arttırılmış bu katmanda ana işlem parametrelerinin etkilerini simüle etmişlerdir. Çalışmada, elektrik akımı, iş parçasının

dönme hızı ve temas kuvveti ile dayanımı arttırılmış bölgenin genişlik ve derinliğinin kontrol edilebileceği belirtilmiştir. Elektrik akımının artması ile temas yüzeyindeki sıcaklık artmış ve bunun sonucunda dayanımı arttırılmış bölgenin genişliği ve derinliği de artmıştır. Lee ve diğ. [6], nükleer buhar türbinlerinde kullanılan 12 Cr çeliğinin sertlik, sertleştirme derinliği ve artık gerilme özelliklerini alevle sertleştirme modifikasyonundan sonra incelemişlerdir. Alevle sertleştirme işleminden sonra sertlik 420-550 HV<sub>0.2</sub>'ye kadar olarak önemli derecede arttırılmıştır. Sertleşme derinliği ve iş parçası-alev etkileşim süresi arasında doğrusal korelasyon tespit edilmiştir. Çalışmada, oto temperleme soğutma sistemini etkilediği için daha hızlı soğutma oranlarından dolayı daha yüksek yüzey sertlik değeri ve sertleşme derinliği artışları elde edilmiştir. Kayacan ve Colak [7], indüksiyonla yüzey sertleştirmenin belirlenmiş bazı parametrelerinin optimizasyonunu bulanık yaklaşımla sağlayarak ve bu parametreleri kullanarak sertliği kontrol etmişlerdir. Çalışmada farklı frekans, bobin boyutu, ısıtma süresi gibi parametrelerin sertlik üzerindeki etkileri incelenmiştir. İndüksiyon sertleştirmenin optimize edilmiş bulanık çözümü ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve sertleştirme işleminde bulanık çözümün etkileri tartışılmıştır. Pantleon ve diğ. [8], sert kaplamalı çeliklerin özelliklerini iyileştiren kimyasal buhar emdirme (CVD) yönteminin uygulanması sonucu artan yüksek sıcaklık nedeniyle yüzeyde meydana gelen negatif etkinin giderilmesi için gereken ısı işlem üzerinde çalışmalarda bulunmuşlardır ve bu amaçla AISI 4140 yüzeylerinde TiN kaplamanın ardından ısı işlem olarak indüksiyonla yüzey sertleştirme uygulamışlardır. Isıl işlemin kaplama ve yüzey özellikleri üzerindeki etkilerini indüksiyon parametreleri açısından ele almışlardır. İşlem süresi, işlem ortamı ve güç kaynağı gibi parametrelerin etkisi incelenmiş ve bu parametrelerin uygun değerlerinin seçimi ile CVD sonrası indüksiyon işlemi optimize edilmiştir. İndüksiyon ile sertleştirilmiş parçaların yorulma davranışlarının büyük oranda sertleştirme derinliğine, kalıntı basma gerilmelerin dağılımına ve büyüklüğüne bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Kristoffersen ve Vomacka [9] yaptıkları çalışmada indüksiyon ile sertleştirilmiş silindirik numunelerin yüzeylerindeki kalıntı gerilmeleri deneysel olarak incelemişlerdir. Sürekli penetrasyon derinliği vermek için indüksiyon proses parametreleri değiştirilmiştir. Frekans ve güç parametreleri değiştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kalıntı gerilmeler X-ışını kırınım yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. İncelenen indüksiyonla sertleştirilmiş numune yüzeylerinde sürekli iki eksenli kalıntı gerilme durumları görülmüştür. Sarı ve Yılmaz [10] yaptıkları çalışmada mevcut teknolojide tarım, madencilik, çimento gibi endüstriyel alanda çalışan makine parçalarının aşınma dayanımlarının arttırılmasında sadece yüzey ve yüzey altı özelliklerini iyileştiren geleneksel ısıl işlemlerin aksine AISI 1050 çelik numunelerini indüksiyon sertleştirme ve borlama, nitrürleme, termal püskürtme gibi termokimyasal işlemlere tabi tutmuşlardır. Aşınma testleri sonucunda, uygulanan ısıl ve termokimyasal işlemlerin malzemenin aşınma dayanımı üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Kobayashi ve diğ. [11], manyetik histerezis tekniğini kullanarak indüksiyon ile sertleştirilmiş çelik çubukların sertleşme durumunu incelemişlerdir. Malzeme olarak SCM435 ve S45C çeliklerine ait indüksiyon ile sertleştirilmiş çubuklar kullanılmışlardır. Wang [12], sıkıştırma basıncı ve karbon içeriği parametrelerinin sinterlenmiş ve indüksiyonla sertleştirilmiş Fe-C-Cu ve kükürt ilaveli Fe-C-Cu-P alaşımlarının sertlikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Alaşım bileşimindeki karbon içeriği ve sıkıştırma

basıncının artmasına bağlı olarak sertlik değerinin yükseldiği görülmüştür. Ayrıca kükürt içermeyen Fe-C-Cu alaşımının aynı sıkıştırma basıncı ve karbon oranında Fe-C-Cu-P alaşımından daha düşük sertlik değeri gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Yang [13] yüzey sertleştirme konusunda yeni bir yöntem olan plazma ark üzerine çalışmalarda bulunmuştur. Taguchi metodu ile plazma ark makinesini kullanarak 6 mm kalınlığındaki ASSAB 760 çelik numunelerinin maksimum sertleşme derinliğini sağlamak için proses parametrelerinin optimizasyonu üzerine çalışmıştır. Maksimum sertleşme derinliği sağlamak için ark akımı, ilerleme hızı, gaz akış debisi ve ark boşluğu gibi kontrol faktörleri kullanılmıştır. Ark akımının ve gaz akış debisinin artmasına, ilerleme hızının azalmasına bağlı olarak sertleştirme derinliğinin optimum değerlere ulaştığı sonucuna varılmıştır. Pashby ve diğ. [14], 080M40 ve 817M40 malzemelerini kullanarak yüksek güçte diyet lazer ile yüzey sertleştirme işlemi üzerine çalışmalarda bulunmuşlardır. Çalışmalarında farklı proses parametrelerini kullanarak elde edilen sertlik sonuçlarını her iki malzeme için karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmalar farklı lazer gücü ve ilerleme hızı değerleri ile elde edilen sonuçlar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Shin ve Yo [15], kalıp parçalarının yorulma dayanımını arttırmak ve aşınma karakteristiğini geliştirmek için kullanılan lazer yüzey işleme teknolojisini esas alarak sıcak iş takım çelikleri için lazer yüzey işleme karakteristiği üzerine lazer gücü ve odaklanmamış spot pozisyonu gibi proses parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda farklı yöntemlerle yüzeyleri sertleştirilmiş malzemelerin yüzey sertliği, alanı ve derinliğinin simülasyon yöntemleri ve deneysel yöntemlerle değerlendirildiği görülmektedir.

Bu çalışmada, büyük otomotiv firmalarına sac bükme kalıpları üreten ve aynı zamanda firmaların sac büküm işlerini de gerçekleştiren bir fabrikada bir Ar-Ge projesi kapsamında geliştirilmiş, CNC robot kontrollü, 7 eksene sahip indüksiyonlu yüzey sertleştirme istasyonunda, sac şekillendirme kalıplarında kullanılan iki adet kalıp malzemesi için gerçekleştirilen yüzey sertleştirme işleminde ısı işlem parametrelerinin yüzey sertliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Böylelikle orta karbonlu çeliklerin de kullanılmış olduğu bükme kalıpları ve pres parçalarının yüzeylerine uygulanan yüzey sertleştirme işlemi performansı optimize edilmiştir. Elde edilen bu deneysel çalışmanın sonuçları ile iki farklı malzeme kalitesi için seçilen yüzey sertleştirme parametrelerinin (uygulama sıcaklığı ve ilerleme hızı) en uygun seviyeleri belirlenerek hazırlanacak bir robot otomasyonu programıyla bu malzemelerin yüzeyleri en iyi şekilde sertleştirilecektir. Bu çalışmanın devamında, otomotiv kalıp çeliklerinin kullanım yerlerine göre istenen yüzey sertlikleri belirlenerek, çeliklerin içyapılarına göre robot kontrollü indüksiyon ile yüzey sertleştirmede proses parametrelerinin en uygun seviyeleri belirlenerek zengin bir veritabanı oluşturulacaktır.

## 2 Malzeme ve metot

Bu deneysel çalışmada aşağıda belirtilen malzemeler ve yöntemler kullanılmıştır.

### 2.1 İş parçası malzemeleri

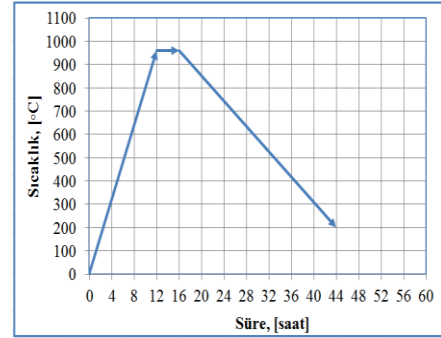
Bu çalışmada, otomotiv sac şekillendirme kalıplarında oldukça yaygın olarak kullanılan 1.2333 (*G59CrMoV18-5*) dökme takım çeliği ve EN-JS 2070 küresel grafitli dökme demir deneysel iş parçası malzemesi olarak seçilmiştir. İş parçası malzemelerinin kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. 1.2333

(*G59CrMoV18-5*) dökme takım çeliğinin C oranı %0.59 iken EN-JS 2070 küresel grafitli dökme demirin C oranı %3.6'dır.

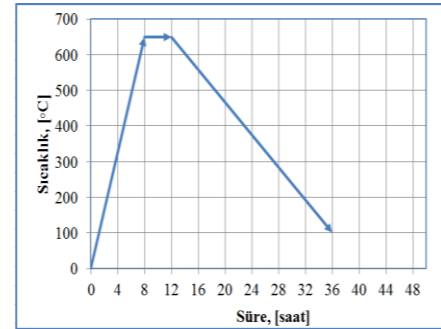
Tablo 1: İş parçalarının kimyasal analiz sonuçları (% hacim).

a): 1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> ) dökme takım çeliği							
C	Si	S	P	Mn	Mo	Cr	V
0.59	0.32	0.01	0.02	0.81	0.51	4.54	0.17
b): EN-JS 2070 küresel grafitli dökme demir							
C	Si	S	P	Mn	Cr	Mo	Cu
3.6	2.45	0.01	0.02	0.62	0.75	0.43	0.67

Şekil 1'da sunulan sıcaklık-süre diyagramındaki ısı işlem prosesi takip edilerek tam tavlama işlemine tabi tutulmuş 1.2333 (*G59CrMoV18-5*) dökme takım çeliğinin sertliği 205-215 HRB (Brinell Sertlik Değeri) olarak ölçülmüştür. Diğer iş parçası malzemesi EN-JS 2070 küresel grafitli dökme demir ise Şekil 1b'de verilen sıcaklık-süre diyagramındaki prosese göre gerilim giderme tavlama uygulanmış halde temin edilmiş ve sertlik değeri 255-265 HRB olarak ölçülmüştür. Bu işlem sonrasında yapılan mikroyapı incelemelerinde mikroyapının %5 ferrit ve %95 perlit fazından oluştuğu, küreselleşmenin %90 ve küre sayısının minimum 100 olduğu tespit edilmiştir. EN-JS 2070 küresel grafitli dökme demirin çekme dayanımı 660 N/mm<sup>2</sup>, akma sınırı 380 N/mm<sup>2</sup> ve uzaması minimum %1 olarak ölçülmüştür.



(a): 1.2333 (*G59CrMoV18-5*) dökme takım çeliği için tam tavlama ısı işlemi.



(b): EN-JS 2070 küresel grafitli dökme demir için gerilim giderme ısı işlemi.

Şekil 1: İş parçası malzemeleri için ısı işlem sıcaklık-süre diyagramları.

### 2.2 Metot

Otomotiv sektöründe kullanılan yüksek dayanıma sahip sac malzemeler sac bükme kalıplarının hızlı bir şekilde aşınmasına neden olmaktadır ve bu yüzden aşınan kalıp parçalarının belirli periyotlarla değiştirilmesi ya da revize edilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla kalıbın efektif çalışma süresi azalmaktadır.

Bu nedenle kalıpların aşınmaya en fazla maruz kalan yüzeylerinin sertleştirilmesi gerekmektedir. Burada amaç homojen yüzey sertliğinin elde edilmesi, yeterli sertlik derinliğinin sağlanması ve ısı işlem sonrasında yüzey kusurlarının bertaraf edilmesidir. Bu amaca ulaşmak için Yıldız Kalıp A.Ş. kalıp imalat atölyesinde alevle ve operatör tarafından manuel kontrollü olarak gerçekleştirilen sac bükme kalıplarının yüzey sertleştirme işlemlerinin yerini alacak TÜBİTAK TEYDEB destekli Ar-Ge projesi kapsamında robot kontrollü indüksiyonla yüzey sertleştirme ünitesi/sistemi tasarlanmış ve imal edilmiştir (Şekil 2). Şekil 2'de görüleceği üzere ünite genel olarak; 7. eksenli oluşturan kayar düzener (1), robot kol (2), otomasyon kumanda panoları (3), indüksiyon bobini (4), soğutma alt sistemi (5), hareketli tabla (6), PC manuel ve SCADA kontrol panosundan (7) oluşmaktadır. Aynı zamanda, bu sistem, yaklaşım, çarpma, sıcaklık, titreşim, hava basınç kontrol, su basınç kontrol ve su sıcaklık kontrol sensörleri, güvenlik kafesi, ışık bariyeri ile donatılarak güvenlik altına alınmıştır. Geliştirilen bu sistemin indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemlerindeki uygulamaları avantajları şunlardır:

- Üç boyutlu, düz, eğrisel ve karmaşık yüzey yapılarına ısı işlem uygulanabilmekte,
- Farklı kalıp malzemeleri için istenen yüzey sertlik değerlerine ısı işlem parametrelerinin optimal seviyeleri belirlenerek ulaşılabilmekte,
- Yüzey sertleştirme sonrası oluşan yüzey hasarları bertaraf edilmektedir.

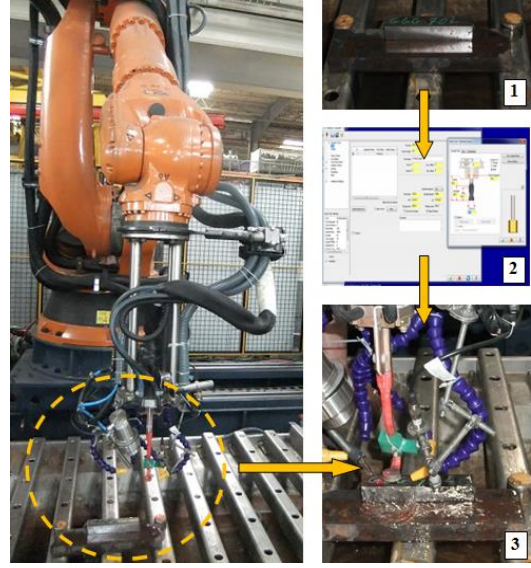


1: 7. eksen hareket mekanizması, 2: Robot kol, 3: Otomasyon kontrol panelleri,  
4: İndüksiyon bobini, 5: Soğutma sistemi, 6: Hareketli tabla, 7: PC, manuel ve SCADA kontrol panelleri.

Şekil 2: Robot kontrollü indüksiyonla yüzey sertleştirme sisteminin temel elemanları.

Robot kontrollü indüksiyonlu sertleştirme ünitesinde otomotiv sektörü için sac şekillendirme kalıplarında sık kullanılan 1.2333 (*G59CrMoV18-5*) dökme takım çeliği ve EN-JS 2070 küresel grafitli dökme demir malzemeleri hareketli tablaya bağlanmış, seçilen ısı işlem şartlarında ve deneysel tasarıma uygun olarak robot kolun istenilen hareketleri ve eylemleri gerçekleştirilmesi için RobotMaster'da program yazılmış ve sisteme yüklenmiştir. Daha sonra iş parçası referans noktası belirlenerek indüktörlerin takım yoluna göre hareketleri boşa kontrol edilmiş, hiç problemin tespit edilmemesi üzerine deney

tasarımındaki sıralama takip edilerek yüzey sertleştirme ısı işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3: Deneysel prosedür.

### 2.3 Kontrol faktörleri ve deneysel tasarım

İndüksiyonla yüzey sertleştirmede iş parçası malzemesinin tipi, indüksiyon ilerleme hızı, uygulama sıcaklığı, indüktör tipi, indüktörün iş parçası yüzeyine mesafesi, soğutma suyu sıcaklığı, soğutma sıcaklığı debisi vb. faktörler yüzey sertliğini ve derinliğini etkilemektedir. Bu çalışmada, kontrol faktörleri olarak; iş parçası malzemesi (M), sertleştirme uygulama sıcaklığı (T), ve indüktör ilerleme hızı (f) seçilmiştir ve bu faktörlerin seviyeleri Tablo 2'de sunulmuştur. Seçilen deneysel parametreler indüksiyon ile yüzey sertleştirme uygulamasında en çok tercih edilen değerler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tabloda görüldüğü üzere kontrol faktörlerinden biri 1 diğeri ise 2 seviyeye sahiptir ve kontrol faktörlerinin toplam serbestlik derecesi 7'dir [16],[18]. Bünyesinde %0.35-%0.60 C ihtiva eden çelikler ve küresel grafitli dökme demirler otomotiv sac bükme kalıplarında çok yoğun bir şekilde kullanıldığından iki farklı iş parçası malzemesi olarak seçilmiş olup her iki malzemenin de istenilen yüksek yüzey sertliklerine ulaşabilmesi için gerekli sıcaklıkların tespiti indüksiyon robotunda yapılan ön testlerle belirlenerek yüzey sertleştirme uygulama sıcaklığının üç seviyesi belirlenmiştir (Tablo 2). 20 mm çapında indüktör kullanılmış, soğutma suyu debisi 1.75 l/min, indüktörün iş parçası yüzeyine mesafesi 0.5 mm sabit olarak belirlenmiştir.

Daha az sayıda deney ile daha sistematik bir yaklaşımla kontrol faktörlerinin etkileri ve optimal seviyeler belirlenebildiğinden ve tahmin yeteneğinin yüksek olmasından dolayı Taguchi metodu tercih edilmiştir [16]-[18]. Optimal kesme parametrelerini (EN-JS 2070 için  $f=2$  mm/s de 52.33 [HRC], 55.00 [HRC] ve 49.67 [HRC]'dir. 1.2333 (*G59CrMoV18-5*) için  $f=2$  mm/s de 48.67 [HRC], 52.00 [HRC] ve 54.67 [HRC]) ve bu kesme parametrelerinin etkilerini belirlemek amacıyla kontrol faktör grubunun toplam serbestlik derecesi de göz önünde bulundurularak en uygun ortogonal dizi olarak  $L_{18}(2^4 \times 3^3)$  seçilmiş ve bu dizinin deney düzenine göre deneyler gerçekleştirilmiştir [16]-[18] (Tablo 3).

Seçilen malzemelerin sertleştirme işlemi sonrası yüzey sertlik (Hs) değerlerinin yüksek olması istendiğinden dolayı bağımlı değişkenin kalite karakteristiği sinyal/gürültü (S/N) oranları

dB cinsinden 1 No.lu denklem ile “Daha büyük daha iyi” seçeneğine göre hesaplanmıştır [16],[18].

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

Bu denklemde,  $n$  deney sayısını,  $y_i$  ise elde edilen  $i$ . veriyi ifade etmektedir [16]. “Daha büyük daha iyi” kalite karakteristiğine göre hesaplanmış  $S/N$  oranları değerleri Tablo 3’te sunulmuştur. Her bir kontrol faktörünün seviyelerinin etkileri  $S/N$  oranları kullanılarak analiz edilmiştir. Bu etkiler deneysel ölçüm sonuçlarının ya da  $S/N$  oranları değerlerinin ortalamalarının toplamına göre hesaplanmıştır. Kontrol faktörünün yüzey sertliği üzerindeki ana etkileri Varyans

Analizi (ANOVA) ile belirlenmiştir. ANOVA’ da yer alan katkı oranı kalite karakteristiği üzerinde kontrol faktörünün etkisini temsil etmektedir. Gerçekleştirilen deneysel çalışma %95 güven seviyesinde değerlendirilmiştir. ANOVA tablosundan anlamlı etkileri tespit edilen kontrol faktörlerinin optimal seviyeleri ile tahminsel optimal kalite karakteristiği belirlenmiştir.

Yüzey sertleştirme ısıl işleminden sonra sertleştirilen bölgelerin yüzeylerinden 10 adet sertlik ölçümü alınmıştır. Bu ölçümlerden birbirine en yakın üçü kaydedilerek değerlendirmeye alınmıştır (Tablo 3). Sertlik ölçümleri HARTIP 3000 portatif sertlik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri öncesi kalibrasyon bloğu kullanılarak cihaz kalibre edilmiştir.

Tablo 2: Kontrol faktörleri ve onların seviyeleri.

Kontrol Faktörleri	Birimi	Sembol	Seviyeler			Serbestlik Derecesi (DoF)
			Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	
İş Parçası Malzemesi	-	$M$	EN-JS 2070	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	-	1
Sertleştirme Sıcaklığı	°C	$T$	886 (0.73)	1000 (0.83)	1128 (0.94)	2
İlerleme Miktarı	mm/s	$f$	1	2	4	2

Tablo 3: L18 ( $1^2 \times 2^3$ ) ortogonal diziyeye göre deneysel tasarım, yüzey sertlik ölçüm sonuçları ve  $S/N$  oranları.

Deney No	Kodlanmış Değerler			Kontrol Faktörleri			Yüzey Sertlik Ölçümleri				Sinyal-Gürültü Oranı $S/N$ [dB]
	$M$	$T$	$f$	$M$	$T$ [°C]	$f$ [mm/s]	$H_s_1$ [HRC]	$H_s_2$ [HRC]	$H_s_3$ [HRC]	Sertlik ortalaması, $H_{s\_ave}$ [HRC]	
1	1	1	1	EN-JS 2070	886 (0.73)	1	53.00	53.50	52.50	53.00	34.5
2	1	1	2	EN-JS 2070	886 (0.73)	2	52.00	52.50	52.50	52.33	34.4
3	1	1	3	EN-JS 2070	886 (0.73)	4	50.50	52.50	51.00	51.33	34.2
4	1	2	1	EN-JS 2070	1000 (0.83)	1	56.75	56.50	56.30	56.52	35.0
5	1	2	2	EN-JS 2070	1000 (0.83)	2	56.00	55.00	54.00	55.00	34.8
6	1	2	3	EN-JS 2070	1000 (0.83)	4	54.00	55.00	54.00	54.33	34.7
7	1	3	1	EN-JS 2070	1128 (0.94)	1	50.00	49.00	55.00	51.33	34.2
8	1	3	2	EN-JS 2070	1128 (0.94)	2	53.00	44.00	52.00	49.67	33.8
9	1	3	3	EN-JS 2070	1128 (0.94)	4	40.70	40.20	40.30	40.40	32.1
10	2	1	1	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	886 (0.73)	1	53.00	53.50	55.00	53.83	34.6
11	2	1	2	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	886 (0.73)	2	49.00	47.00	50.00	48.67	33.7
12	2	1	3	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	886 (0.73)	4	40.30	40.20	40.10	40.20	32.1
13	2	2	1	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	1000 (0.83)	1	56.00	57.00	55.00	56.00	35.0
14	2	2	2	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	1000 (0.83)	2	50.00	52.00	54.00	52.00	34.3
15	2	2	3	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	1000 (0.83)	4	51.00	49.00	49.00	49.67	33.9
16	2	3	1	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	1128 (0.94)	1	58.00	59.00	58.00	58.33	35.3
17	2	3	2	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	1128 (0.94)	2	53.00	55.00	56.00	54.67	34.7
18	2	3	3	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	1128 (0.94)	4	52.00	54.00	53.00	53.00	34.5

$\bar{T}_{Hs}$ , Genel yüzey pürüzlülük ortalaması = 51.68 HRC.

### 3 Deneysel sonuçlar ve tartışma

#### 3.1 Taguchi metodu değerlendirmeleri

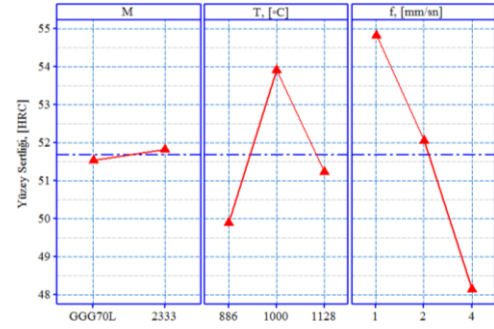
EN-JS 2070 küresel grafitli dökme demir ve 1.2333 (*G59CrMoV18-5*) dökme takım çeliğinin robot kontrollü indüksiyonla yüzey sertleştirilmesi işleminde ölçülen yüzey sertlik sonuçları Minitab 16.0 paket programında çözümlenmiş ve analiz edilmiştir. Grafiklerin çiziminde ve kontrol faktörleri etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılacak olan çözümlenme ve analiz çalışmalarlarıyla elde edilen sayısal sonuçlar ( $H_s$ ,  $ave$ ,  $S/N$ ) Tablo 3'te verilmiştir. Yüzey sertleştirme işlemi sonrası EN-JS2070 malzemesi için 40.40-56.52 HRC, 1.2333 (*G59CrMoV18-5*) malzemesi için ise 40.2-58.33 HRC aralığında yüzey sertlik değerleri elde edilmiştir. Yüzey sertliği ( $H_s$ ) üzerinde her bir kontrol faktörünün etkilerinin analizi  $S/N$  yanıt tablosu ile belirlenmiştir (Tablo 4). Kontrol faktörlerinin analizi, seçilen şartlar altında bu malzemelerin robot kontrollü indüksiyonla yüzey sertleştirme işleminin doğası hakkında önemli bilgiler vermiştir. Kontrol faktörlerinin her birinin farklı seviyelerinde elde edilen en yüksek ve en düşük  $H_s$  değerleri arasındaki farkların büyüklüğüne göre  $H_s$  üzerindeki etki dereceleri belirlenmiştir (Tablo 4). Bu tablodan yüzey sertliği üzerinde etkili parametrelerin sırasıyla ilerleme miktarı ( $f$ ), uygulama sıcaklığı ( $T$ ) ve iş parçası malzemesi ( $M$ ) olduğu görülmektedir. Her iki iş parçasının da indüksiyonla yüzey sertleştirilmesinde en yüksek yüzey sertlik değerlerine ulaşmak için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri  $M_2T_2f_1$  olarak belirlenmiştir.

Tablo 4: Yüzey sertliklerinin ortalaması ve sinyal-gürültü oranı için yanıt tablosu.

Seviye	Yüzey Sertliklerinin Ortalaması			Sinyal-Gürültü (S/N) Oranı		
	$M$	$T$	$f$	$M$	$T$	$f$
1	51.55	49.89	54.84*	34.19	33.92	34.77*
2	51.82*	53.92*	52.06	34.24*	34.62*	34.30
3	-	51.23	48.16	-	34.11	33.59
$\Delta$	0.27	4.03	6.68	0.05	0.71	1.18
Sıra	3	2	1	3	2	1

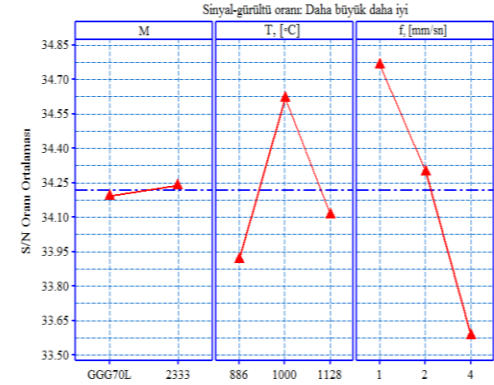
$\Delta$ : Maksimum-Minimum, \*: Optimum seviye.

Robot kontrollü indüksiyonla yüzey sertleştirmede  $H_s$ ,  $ave$  üzerinde kontrol faktörlerinin ana etkileri "Faktör Etkilerinin Grafikselsel Gösterimi" metodu kullanılarak gösterilmiş ve değerlendirilmiştir (Şekil 4) [17]. Şekil 4'te yer alan kontrol faktörlerinin farklı seviyelerinde elde edilen  $H_s$ ,  $ave$  değerlerinin değişimi incelendiğinde Tablo 4'te tespit edilen kontrol faktörü etkileri sıralamasını destekler nitelikte olduğu görülmektedir. Şekil 4'te görüleceği üzere, 1.2333 (*G59CrMoV18-5*) dökme takım çeliğinin yüzey sertleştirilmesinde belirgin olmasa da daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. 886 ve 1128 °C sertleştirme sıcaklıklarında düşük yüzey sertlik değerleri elde edilmiş iken en yüksek yüzey sertlik değerleri her iki iş parçası malzemesi için de 1000 °C'de elde edilmiştir. İlerleme miktarının artmasıyla yüzey sertlik değerleri belirgin bir şekilde düşmüş iken en yüksek yüzey sertliği en düşük ilerleme miktarı olan 1 mm/s'de elde edilmiştir. Şekil 5'te sunulan  $S/N$  oranları grafiği de elde edilen bu sonuçları destekler niteliktedir. Seçilen yüzey sertleştirme şartları altında en yüksek ortalama  $H_s$  yüzey sertlik değerini verecek kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri  $S/N$  hesabından, Şekil 4 ve Şekil 5 kullanılarak  $M_2T_2f_1$  olarak tespit edilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5'te görüleceği



Şekil 4: Yüzey sertlikleri ortalaması için ana etki grafiği.

üzere bu çalışmada, 1.2333 (*G59CrMoV18-5*) dökme takım çeliğinin, EN-JS 2070 küresel grafitli dökme demir malzemeye göre nispeten daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiş olup her iki malzeme türü için de 1000 °C uygulama sıcaklığı ve 1 mm/s en düşük ilerleme miktarı ile yapılan yüzey sertleştirmede en yüksek yüzey sertlik değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5: S/N oranı ortalamaları için ana etki grafiği.

"Daha büyük daha iyi" kalite karakteristiği seçeneğine göre  $S/N$  denkleminden  $M_2T_2f_1$  olarak tespit edilen optimal kontrol faktörü seviyeleri için tahminsel Taguchi Metodu sonuçları ise;  $H_s$ ,  $pre$ =55.978 HRC,  $S/N$ =34.95 dB olarak hesaplanmıştır. Kontrol faktörlerinin  $M_2T_2f_1$  şeklinde belirlenen optimum seviyelerinin Tablo 3'teki 13 No.lu deneyin parametre seviyeleri ile aynı olduğu görülmektedir. 13 No.lu deneyin yapılmasıyla elde edilmiş yüzey sertlik değerlerinin ortalaması  $H_s$ ,  $ave$ =56.000 HRC'dir. Tahminsel Taguchi Metodu sonucu elde edilmiş yüzey sertlik değeri ( $H_s$ ,  $pre$ =55.978 HRC) ile kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinde (13 No.lu deney şartları) yapılan robot kontrollü indüksiyonla yüzey sertleştirmede elde edilen ortalama yüzey sertlik değerleri ( $H_s$ ,  $ave$ =56.000 HRC) arasındaki fark 0.022 HRC olarak bulunmuştur.  $S/N$  hesaplamaları sonucu tespit edilen kontrol faktörlerinin optimal seviyeleri Tablo 3'te sunulmuş olan deneylerden birinin seviyesi ile uyduğundan optimum kontrol seviyelerinde ayrıca bir deney daha yapılmamıştır. Kontrol faktörlerinin farklı seviyelerinde EN-JS 2070 ve 1.2333 (*G59CrMoV18-5*) iş parçalarının yüzeylerinin sertleştirildiği bu çalışmada, sertleştirilmiş yüzeylerde ölçülmüş tüm yüzey sertlik değerlerinin aritmetik ortalaması 51.68 HRC'dir. Yani, her iki iş parçası için seçilen kesme şartları aralığında işlenmesinde genel olarak; 51.68 HRC ortalama değerinde yüzey sertlik değerleri elde edilebilmektedir. Ancak, bu çalışmada tespit edilen optimal kontrol faktörü seviyeleri ile

$Hs_{pre}=55.978$  HRC yüzey sertlik değeri elde edilerek yüzey sertliği iyileştirilmiştir.

Robot kontrollü indüksiyonla yüzeyleri sertleştirilmiş iş parçalarının yüzey sertliğini etkileyen kontrol faktörlerinin (tasarım parametrelerinin) ana etkilerinin ve etkileşimlerinin % etki derecelerini araştırmak amacıyla Varyans Analizi uygulanmıştır. Her bir kontrol faktörünün varyans oranı değerleri ve % etkileri hesaplanmıştır. Tablo 5'te ortalama yüzey sertlik değerleri için Varyans Analizi sonuçları sunulmuştur. Varyans tablosunda %95 güvenilirlik seviyesinde ortalama yüzey sertliği üzerinde en etkili olan parametreler sırasıyla;  $M^*T$  (%36.193),  $f$  (%33.920) ve  $T$  (%12.655) olmuş iken  $M$ 'nin (%0.084) ve diğer faktör etkileşimlerinin anlamlı bir etkisi gözlenmemiştir.

Tablo 5: Yüzey sertliği ortalaması için varyans analizi.

Kaynak	DoF	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F Oranı	P	% Katkı
$M$	1	0.333	0.3335	0.03	0.873	0.084
$T$	2	50.417	25.2084	2.21	0.226	12.655
$F$	2	135.143	67.5713	5.92	0.064	33.920
$M^*T$	2	144.199	72.0995	6.32	0.058	36.193
$M^*f$	2	10.758	5.3792	0.47	0.655	2.700
$T^*f$	4	11.906	2.9764	0.26	0.889	2.988
Artık Hata	4	45.656	2.9764			11.460
Toplam	17	398.412	11.4141			100.000

S=3.378; R<sup>2</sup>=% 88.5; DoF= Serbestlik derecesi.

### 3.2 Yüzey sertliği ile kontrol faktörleri arasındaki ilişkiler

EN-JS 2070 küresel grafitli dökme demir ve 1.2333 ( $G59CrMoV18-5$ ) dökme takım çeliğinin robot kontrollü indüksiyon ile yüzey sertleştirilmesinde parça yüzey sertliklerinin ilerleme miktarı ve uygulama sıcaklığına bağlı olarak değişimleri Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 6a'da ilerleme miktarına bağlı olarak iş parçalarının yüzey sertliklerinin değişimi incelendiğinde, üç farklı sıcaklıkta yapılan yüzey sertleştirmede de ilerleme miktarı arttırıldığında yüzey sertlik değerleri azalmıştır (Şekil 6a). Bunun sebebi artan yüksek ilerleme miktarından dolayı yüzeye nüfuz etmekte olan sıcaklığın faz dönüşümünü oluşturacak ısıya ulaşamaması olarak atfedilebilir. EN-JS 2070'nin yüzey sertleştirilmesinde en düşük sertlik değerleri 1128 °C'de en yüksek yüzey sertlik değerleri ise 1000 °C'de elde edilmiştir (Şekil 6a). Özellikle 1128 °C'de ilerleme miktarının  $f=4$  mm/s'ye arttırılmasıyla yüzey sertlik değerleri belirgin bir şekilde düşmüştür (Şekil 6a). 1.2333 ( $G59CrMoV18-5$ ) dökme takım çeliğinin üç farklı sıcaklıkta yüzey sertleştirilmesinde ilerleme miktarının daha etkili olduğu görülmektedir (Şekil 6b). 1.2333 ( $G59CrMoV18-5$ ) iş parçasının sertleştirilmesinde EN-JS 2070 iş parçasından farklı olarak  $T=1128$  °C'de sertleştirmede en yüksek yüzey sertlik değerleri elde edilmektedir. Dolayısıyla bu iş parçalarının yüzeylerinin sertleştirilmesinde maksimum yüzey sertlik değerleri elde etmek için EN-JS 2070 iş parçalarının  $T=1000$  °C'de, 1.2333 ( $G59CrMoV18-5$ ) iş parçalarının ise 1128 °C'de sertleştirilmelerinin daha uygun olacağı anlaşılmaktadır.

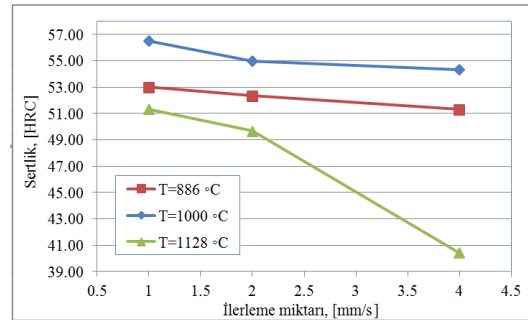
### 3.3 Geliştirilmiş tahminsel denklem

EN-JS 2070 küresel grafitli dökme demir ve 1.2333 ( $G59CrMoV18-5$ ) dökme takım çeliğinin robot kontrollü indüksiyonla yüzey sertleştirilmesinde oluşan yüzey sertliğini tahmin etmek için Lineer Regresyon Analizi ile kontrol faktörlerinin ana etkileri, karelerinin etkileri ve etkileşimlerinin etkilerini içeren ikinci dereceden tahminsel bir denklem geliştirilmiştir (Denklem 2). Bu denklemde de görüleceği üzere;  $M$ ,  $T^2$ ,  $f^2$ ,  $Mf$  ve  $Tf$  yüzey sertliği üzerinde ( $Hs$ )

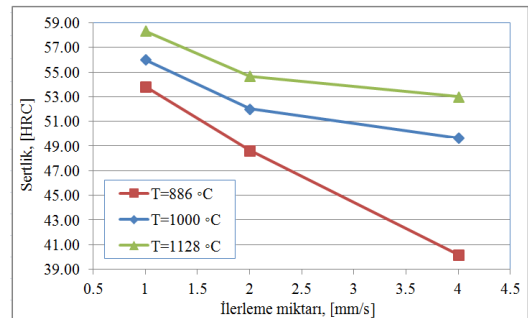
üzerinde negatif etkiye sahip iken  $T$ ,  $f$  ve  $MT$  pozitif etkiye sahiptir. İkinci dereceden tahminsel denklemin korelasyon katsayısı  $R^2=0.801$  hesaplanmış olup bu katsayının 1'e yakın olması geliştirilen denklemin güvenilirliğini, tahmin yeteneğini yansıtmaktadır. Bu denklemin kullanılmasıyla kontrol faktörlerinin farklı seviyelerinde tahminsel yüzey sertlik değerleri %80.1 doğrulukta hesaplanabilecektir.

$$Hs = 57.1 - 9.08 M + 4.69 T + 1.77 f - 3.36 T^2 - 0.56 f^2 + 6.43 MT - 1.75 Mf - 0.12 Tf \quad (2)$$

Tablo 6'da L18 ortogonal dizideki deney düzenine göre gerçekleştirilmiş deneysel yüzey sertliği sonuçları ile Taguchi Metodu çözümlenmeleri ve lineer regresyon denklemiyle elde edilen ikinci dereceden tahminsel denklemlerle elde edilmiş yüzey sertlik değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Deneysel sonuçlarla tahminsel sonuçlar arasındaki farklar % hata olarak ifade edilmiştir. % hatanın düşük olması o yöntemin tahmin kabiliyetini göstermektedir. % hataların ortalaması dikkate alındığında Taguchi yöntemiyle elde edilen tahminsel sonuçların % hatası (%2.6) ikinci dereceden tahminsel denklem ile elde edilen sonuçların hatasından (%3.5) daha düşük çıktığından Taguchi yöntemi ile elde edilen tahminsel sonuçların kısmen daha güvenilir olduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca her iki yöntem ile elde edilen tahminsel sonuçların hatası %5'ten düşük olduğundan bu iki yöntemle de sonuçların başarılı bir şekilde tahmin edilebileceği anlaşılmaktadır.



(a): EN-JS 2070 küresel grafitli dökme demir.

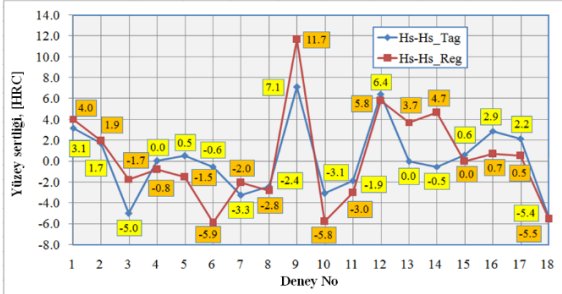


(b): 1.2333 ( $G59CrMoV18-5$ ) dökme takım çeliği.

Şekil 6: İlerleme miktarı ve sertleştirme sıcaklığına bağlı olarak yüzey sertliğinin değişimi.

Şekil 7'de toplam 18 deney için deneysel sonuçlarla Taguchi metodu tahminsel sonuçları ve ikinci dereceden tahminsel denklemlerle sonuçları arasındaki farkların/artıkların kıyaslaması görülmektedir. Her bir deney için deneysel sonuçlar referans (0) kabul edildiğinde, Tablo 6'daki sonuçları destekler şekilde, ikinci dereceden regresyon denklemi ile elde edilen tahminsel değerlerin artıklarının ( $Hs-Hs_{Reg}$ ) daha büyük değerlerde

olduğu görülmektedir. Lineer regresyon denklemi ile elde edilen tahminsel değerlerin artıkları ( $Hs-Hs_{Reg}$ ) +11.7 HRC ile -5.9 HRC arasında değişmekte iken Taguchi metodu ile elde edilen tahminsel değerlerin artıkları ( $Hs-Hs_{Tag}$ ) 7.1 HRC ile -5.4 HRC arasında değişmiştir. Deneysel çalışma sırasında kontrol edilemeyen faktörlerin artıkları arttırdığı düşünülmektedir.



Şekil 7: Deneysel sonuçlar ile tahminsel sonuçlar arasındaki farklar.

#### 4 Sonuçlar

Yıldız Kalıp AŞ'de TÜBİTAK tarafından desteklenen bir Ar-Ge projesi kapsamında robot teknolojisi kullanılarak indüksiyonlu sertleştirme işlemi gerçekleştiren bir sistem/ünite kurulmuş ve bu çalışmada otomotiv sektörü için sac şekillendirme kalıplarında sık kullanılan iki adet kalıp malzemesi için gerçekleştirilen yüzey sertleştirme işleminde ısı işlem parametrelerinin yüzey sertliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. EN-JS 2070 küresel grafitli dökme demir ve 1.2333 (*G59CrMoV18-5*) dökme takım çeliğinin robot kontrollü indüksiyonla yüzey sertleştirilmesinde, iş parçası malzemesi, sertleştirme sıcaklığı ve ilerleme miktarı kontrol faktörlerinin optimal seviyelerini belirlemek ve sertleştirilmiş yüzeylerin yüzey sertliği üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla yapılan bu deneysel çalışmada;

1. Kontrol faktörlerinin farklı seviyelerinde yüzey sertlik değerleri 40.20-58.33 HRC aralığında ölçülmüştür,
2. Deneysel yüzey sertlik değerleri ile Taguchi Metodu ile elde edilen tahminsel yüzey sertlik değerleri arasındaki farklar (artıklar) % hata olarak değerlendirildiğinde, hata ortalaması %2.6 olarak belirlenmiş iken bu hata oranı regresyon denklemi ile elde edilen ikinci dereceden tahminsel denklemin artıkları için %3.5 olarak hesaplanmıştır,
3. Yüzey sertliği üzerinde en etkili parametreler sırasıyla iş parçası malzemesi-sertleştirme sıcaklığı etkileşimi (%36.193), ilerleme miktarı (%33.920) ve sertleştirme sıcaklığı (%12.655) olmuş iken iş parçası malzemesinin (%0.084) ve diğer faktör etkileşimlerinin anlamlı bir etkisi gözlenmemiştir,
4. En yüksek sertlik değerini sağlayan yüzey sertleştirme parametre seviyeleri şu şekilde sıralanabilir; iş parçası malzemesinin ikinci seviyesi ( $M=1.2333$  (*G59CrMoV18-5*)) dökme takım çeliği), sertleştirme sıcaklığının ikinci seviyesi ( $T=1000$  °C) ve ilerleme miktarının birinci seviyesi ( $f=1$  mm/s),
5. İlerleme miktarının azaltılmasıyla yüzey sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir,
6. Yüzey sertlik değerlerinin EN-JS 2070 malzemesi için sıcaklıkla azalırken, 1.2333 (*G59CrMoV18-5*) malzemesi için sıcaklıkla arttığı görülmüştür.

Bu çalışma sonucunda optimize edilmiş ısı işlem parametreleri EN-JS 2070 ve 1.2333 (*G59CrMoV18-5*) malzemelerinin kullanıldığı otomotiv sac büküm kalıplarının yüzeylerinin istenilen sertlik değerinde sertleştirilmesi için robot kontrollü indüksiyon sistemi programının giriş parametreleri olarak kullanılacaktır. Bu çalışmanın devamında firmada otomotiv sac büküm kalıp çeliklerinin kullanım yerlerine göre istenilen yüzey sertlikleri belirlenerek çeliklerin içyapılarına göre robot kontrollü indüksiyon ile yüzey sertleştirmede proses parametrelerinin hangi seviyelerinin kullanılması gerektiği belirlenerek bir malzeme ısı işlem kütüphanesi oluşturulacaktır.

Tablo 6: Deneysel sonuçlar ile tahminsel sonuçların karşılaştırılması.

Deney No	Kontrol Faktörleri			Deneysel Sonuçlar	Taguchi Metodu Tahminsel Sonuçları	İkinci Dereceden Denklem Tahminsel Sonuçları		
	M	T, [°C]	f, [mm/s]	Hs, [HRC]	Hs_Tag, [HRC]	Hata, [%]	Hs_Reg, [HRC]	Hata, [%]
1	EN-JS 2070	886 (0.73)	1	53.00	54.66	3.1	55.13	4.0
2	EN-JS 2070	886 (0.73)	2	52.33	53.24	1.7	53.35	1.9
3	EN-JS 2070	886 (0.73)	4	51.33	48.76	5.0	50.44	1.7
4	EN-JS 2070	1000 (0.83)	1	56.52	56.54	0.0	56.06	0.8
5	EN-JS 2070	1000 (0.83)	2	55.00	55.28	0.5	54.16	1.5
6	EN-JS 2070	1000 (0.83)	4	54.33	54.03	0.6	51.13	5.9
7	EN-JS 2070	1128 (0.94)	1	51.33	49.65	3.3	50.28	2.0
8	EN-JS 2070	1128 (0.94)	2	49.67	48.48	2.4	48.26	2.8
9	EN-JS 2070	1128 (0.94)	4	40.40	43.27	7.1	45.11	11.7
10	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	886 (0.73)	1	53.83	52.17	3.1	50.73	5.8
11	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	886 (0.73)	2	48.67	47.76	1.9	47.19	3.0
12	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	886 (0.73)	4	40.20	42.77	6.4	42.53	5.8
13	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	1000 (0.83)	1	56.00	55.98	0.0	58.09	3.7
14	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	1000 (0.83)	2	52.00	51.72	0.5	54.43	4.7
15	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	1000 (0.83)	4	49.67	49.97	0.6	49.65	0.0
16	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	1128 (0.94)	1	58.33	60.02	2.9	58.73	0.7
17	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	1128 (0.94)	2	54.67	55.85	2.2	54.96	0.5
18	1.2333 ( <i>G59CrMoV18-5</i> )	1128 (0.94)	4	53.00	50.13	5.4	50.06	5.5
Ortalama.						2.6		3.5



## 5 Teşekkür

TÜBİTAK TEYDEB 1501-Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında 3130603 No.lu proje ile bu deneysel çalışmanın finansal desteğini sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na teşekkür ederiz.

## 6 Kaynaklar

- [1] Kochure PG, Nandurkar KN. "Application of taguchi methodology in selection of process parameters for induction hardening of EN8 D Steel". *International Journal of Modern Engineering Research*, 2(5), 3736-3742, 2012.
- [2] Kohli A, Singh H. "Optimization of processing parameters in induction hardening using response surface methodology". *Indian Academy of Sciences*, 36(2), 141-152, 2011.
- [3] K. Misra M, Bhattacharya B, Singh O, Chatterjee A. "Optimization of the induction hardening process of tow axle spindle". *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2(11), 2278-0181, 2013.
- [4] Shen NY, Xu H, Tong L, Li J, Wu YZ. "A Study on robotic off-line programming system in induction hardening for fillets or chamfers of mould". *Shanghai University and Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 4(1), 89-96, 2016.
- [5] Qi X, Zhu S, Ding H, Xu M. "Theoretical and experimental analysis of electric contact surface hardening of ductile iron". *Applied Surface Science*, 288, 591-598, 2014.
- [6] Lee MK, Kim GH, Kim KH, Kim WW. "Control of surface hardnesses, hardening depths, and residual stresses of low carbon 12 Cr steel by flame hardening". *Surface and Coatings Technology*, 184, 239-246, 2004.
- [7] Kayacan MC, Colak O. "A fuzzy approach for induction hardening parameters selection". *Materials and Design*, 25(2), 155-161, 2004.
- [8] Pantleon K, Kessler O, Hoffann F, Mayr P. "Induction surface hardening of hard coated steels". *Surface and Coatings Technology*, 120-121, 495-501, 1999.
- [9] Kristoffersen, H, Vomacka P. "Influence of process parameters for induction hardening on residual stresses". *Materials & Design*, 22(8), 637-644, 2001.
- [10] Sari NY, Yılmaz M. "Investigation of abrasive+erosive wear behaviour of surface hardening methods applied to AISI 1050 steel". *Materials & Design*, 27(6), 470-478, 2006.
- [11] Kobayashi S, Takahashi H, Kamada Y. "Evaluation of case depth in induction hardened steels: magnetic hysteresis measurements and hardness-depth profiling by differential permeability analysis". *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 343, 112-118, 2013.
- [12] Wang WF. "Effect of alloying elements and processing factors on the microstructure and hardness of sintered and induction-hardened Fe-C-Cu alloys". *Materials Science & Engineering: A*, 402(1-2), 92-97, 2005.
- [13] Yang LJ. "Plasma surface hardening of assab 760 steel specimens with taguchi optimisation of the processing parameters". *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1-3), 521-526, 2001.
- [14] Pashby IR, Barnes S, Bryden BG. "Surface hardening of steel using a high power diode laser". *Journal of Materials Processing Technology*, 139(1-3), 585-588, 2003.
- [15] Shin HJ, Yoo YT. "Microstructural and hardness investigation of hot-work tool steels by laser surface treatment". *Journal of Materials Processing Technology* 201(1-3), 342-347, 2008.
- [16] Montgomery DC. *Taguchi's Contributions to Experimental Design and Quality Engineering, Design and Analysis of Experiment*. 3<sup>rd</sup> ed., Canada, USA, John Wiley and Sons, 1991.
- [17] Canıyılmaz E, Kutay F. "Taguchi metodunda varyans analizine alternatif bir yaklaşım". *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(3), 51-63, 2003.
- [18] Roy RK. *A Primer on the Taguchi Method*. 2<sup>nd</sup> ed. New York, USA, Van Nostrand Reinhold, 1990.