



DÖKÜMHANE MAÇA ÜRETİM PROSESİNDE MAKİNE PARAMETRELERİ OPTİMİZASYONU İLE AMİN GAZI TÜKETİMİNİN AZALTILMASI

Onur ŞAHİN^{1*}, Müge Ensari ÖZAY¹, Rüstü UÇAN¹ Emine CAN²

¹Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

²İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler Öz

Döküm,
Maça,
Dimetiletilamin,
Makine
parametreleri,
Kesirli faktöryel
deney.

Dökümhane maça üretim sürecinde en önemli tehlikelerden biri dimetiletilamin gazıdır. DMEA (Dimetiletilamin) maça sertleştirmede kullanılan aşırı uçucu bir bileşik olup kansere ve göz hasarına sebep olduğu bildirilmiştir. Ayrıca proses güvenliğini riske sokmaktadır. Bunun önüne geçmek için DMEA miktarının maça kalitesine negatif etki yapmadan maçaya enjekte edilen miktarının azaltılması gerekir. Bunu yapabilmeyen yolu da maça üretimi sırasında kullanılan makine parametrelerinin optimum değerlere ayarlanması ile minimum miktarda DMEA ile istenen maça sertliğinin elde edilmesidir. Bu makalede faktöryel deney tasarımı metodu kullanılarak deneysel araştırma ile DMEA miktarının azaltılması için maça sertliğine etki eden parametrelerin optimizasyonu elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla bir dökümhanenin maça üretim bölümünde 10 adet maça üretim parametresinin iki seviyesi ile 32 adet maça üretim reçetesi oluşturulmuştur. Üretilen maçaların batma sertlikleri ölçülmüş ve kayıt edilmiştir. Ortaya çıkan sonuçların Minitab 22 paket program ile analizleri yapılmıştır. Sertlik çıktısının faktörlere bağlı regresyon eşitliği elde edilmiştir. En önemli bulgulardan biri istenen maça sertliğini olumsuz etkilemeden gaz sıcaklığının artırılması ve gazlama süresinin düşürülmesi ile kullanılan DMEA miktarının azaltılabileceği olmuştur. Ayrıca, işletme verimliliği açısından da gazlama süresinin düşürülmesi birim zamanda üretilen maça sayısını artıracaktır. Amin gazının daha az kullanılması ile de döküm parça kalitesine olumlu yansımalar olacaktır.

REDUCING AMINE GAS CONSUMPTION IN FOUNDRY CORE PRODUCTION PROCESS BY OPTIMIZATION OF MACHINE PARAMETERS

Keywords

Casting,
Core,
Dimethylethylamine,
Machine parameters,
Fractional factorial
test.

Abstract

One of the most important hazards in the foundry core production process is dimethylethylamine gas. DMEA (Dimethylethylamine) is an extremely volatile compound used in core hardening and has been reported to cause cancer and eye damage. It also risks process safety. In order to prevent this, the amount of DMEA injected into the core should be reduced without negatively affecting the core quality. The way to do this is to adjust the machine parameters used during core production to optimum values and to obtain the desired core hardness with the minimum amount of DMEA. In this article, it is aimed to obtain the optimization of the parameters affecting the core hardness in order to reduce the amount of DMEA by experimental research using the factorial design of experiments. For this purpose, 32 core production recipes were created with two levels of 10 core production parameters in the core production department of a foundry. The indentation hardness of the produced cores was measured and recorded. The results were analyzed with the Minitab 22 package program. The regression equation of the hardness output depending on the factors was obtained. One of the most important findings was that the amount of DMEA used could be reduced by increasing the gas temperature and reducing the gassing time without adversely affecting the desired core hardness. In addition, in terms of operational efficiency, reducing the gassing time will increase the number of cores produced per unit time. Less use of amine gas will also have positive effects on the quality of the casting part.

Alıntı / Cite

Şahin, O., Özay, E., Uçan, R., Can, E., (2025), Dökümhane Maça Üretim Prosesinde Makine Parametreleri Optimizasyonu ile Amin Gazı Tüketiminin Azaltılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 306-324.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

O. Şahin, 0000-0003-0712-2978
M.E.Özay, 0000-0002-4785-5503
R.Uçan, 0000-0003-2389-8231
E.Can, 0000-0003-1192-2994

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 04.10.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date 04.03.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date 13.03.2025
Yayın Tarihi / Published Date 20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: onursahin6677@gmail.com +90 224 573 42 63

REDUCING AMINE GAS CONSUMPTION IN FOUNDRY CORE PRODUCTION PROCESS BY OPTIMIZATION OF MACHINE PARAMETERS

Onur ŞAHİN^{1†}, Müge Ensari ÖZAY¹, Rüştü UÇAN¹ Emine CAN²

¹Uskudar University, Graduate School of Health Sciences, Occupational Health and Safety Department, İstanbul, Türkiye

²Istanbul Medeniyet University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, İstanbul, Türkiye

Highlights

- In this study, the effects of the factors (parameters) affecting the core hardness were investigated.
- Machine parameters were optimized to reduce the core curing gas (DMEA).
- It was shown that cores can be produced with low curing gas by adjusting the machine parameters without adversely affecting the core hardness.
- Machine parameters can be adjusted for the desired hardness values with the obtained regression model.

Graphical Abstract

In this article, productions were made with the experimental plan consisting of the factors affecting the core hardness and the hardness values were recorded. Fractional factorial experimental design was used as the method. The obtained results were analyzed. The hardness equation (1) and optimization of factors affecting hardness value consisting of the factors affecting the core hardness is given below.

$$\text{Core hardness} = 8,412 - 0,1047(\text{pre DMEA dosing, cc}) - 0,676(\text{final DMEA dosing, cc}) - 0,0325(\text{gassing time, s}) - 0,2328(\text{shooting pressure, bar}) - 1,898(\text{gasket}) - 0,0174(\text{DMEA temp. } ^\circ\text{C}) + 0,2451(\text{vent hole area, mm}^2) + 0,0257(\text{final DMEA cc} * \text{gassing time, s}) + 0,0226(\text{gasket} * \text{DMEA temp. } ^\circ\text{C}) + 0,2319(\text{gasket} * \text{vent hole area, mm}^2) \quad (1)$$



Figure. Optimization of factors affecting hardness value

Purpose and Scope

The aim of this study is to reduce the amount of amine gas (DMEA) by optimizing the machine parameters of the core production process in foundries. By obtaining optimum core hardness with the machine parameters, the amount of DMEA will be reduced and the health of the workers will be protected.

Design/methodology/approach

The study is an experimental study and fractional factorial experimental design method was used. The target is to reduce DMEA gas. For this target, core production parameters were optimized and optimum core hardness was obtained with min DMEA. Analyses were made with Minitab 22 package program.

Findings

One of the most important findings obtained from the experiment is the gassing time-final dosage interaction. When the final dosage is selected high, increasing the gassing time parameter significantly affects the hardness output. However, if the final dosage is selected low, the effect of the gassing time level on the output becomes insignificant. This relationship shows that there is an option that will reduce the gassing time without disrupting the hardness output.

Research limitations/implications

In this study, experiments were conducted by keeping some core parameters constant. Researchers can also investigate the effects of the parameters kept constant on the core hardness.

Practical implications

With this study, foundries can review core production processes and production parameters and determine the optimum hardness value for each product type and reach this hardness value by using minimum chemicals.

Social Implications

With this study, the amount of chemicals in core production will be reduced, providing benefits to both employee health, productivity and the environment.

Originality

Although there are many studies in the literature with similar methods, it will be the first experimental study that optimizes parameters especially for the purpose of protecting employee health. The article will be useful for foundries.

[†] Corresponding author: onursahin6677@gmail.com +90 224 573 42 63

1. Giriş (Introduction)

Döküm, metallerin ocaklarda ergitilip hazırlanan kalıplara dökülmesi ve kalıbın şeklini alması, soğuduktan sonra çıkarılarak temizlenmesi prosesine verilen isimdir (Krishnaraj, 2015; Treyger, 2018). Döküm işlemi, hammadde hazırlama, ergitme, maça yapımı, kalıp hazırlanması, döküm ve dökülen parçayı temizleme proseslerinden oluşur (Barot vd., 2020). Metal döküm, Kanicki tarafından "bileşen tasarımından üretime giden doğrudan ve en kısa yol" olarak tanımlanmıştır (Kanicki, 1994).

Dökümhane operasyonları, yüksek seviyede döküm kalitesi sağlamak ve sürdürmek için beceri, teknik ve dikkat gerektiren, doğası gereği karmaşık olan birçok birbirine bağlı dinamik süreçlerden oluşur. Çok sayıda işlem parametresi değişkenine sahip bu tür metodolojik olarak karmaşık işlemler, aynı zamanda bazı sağlık ve emniyet problemlerini ortaya çıkarır. Ergitme, kalıplama ve taşlama operasyonlarının yanında maça üretim operasyonları da sağlık ve emniyet açısından en riskli faaliyetlerdendir (Pandit ve Deshpande, 2021). Yapılan araştırmalar sonucunda Amerikan demir dökümhanelerinde kaydedilebilir iş kazası oranı 6.4 olarak kayıtlara geçmiştir (Schorn, 2020). Türkiyede ise 2022 yılı SGK verilerine göre anametal sanayiinde toplam 22.775, metal döküm sanayiinde 7.081 ve demir döküm tesislerinde ise 4.382 iş kazası meydana gelmiştir. Bunun yanı sıra ana metal sanayiinde çalışan toplam 42 kişi, metal döküm sanayiinde 22 ve demir döküm tesislerinde ise 15 kişi meslek hastalığına yakalanmıştır (SGK, 2022). Rakamlara bakıldığında döküm sektörünün hem iş kazaları bakımından hem de kimyasal maddelere maruziyet açısından riskli tesisler olduğu görülmektedir.

Birçok döküm yöntemi mevcut olup en yaygın olarak kullanılan yöntem kum kalıba yapılan döküm yöntemidir. Metal döküm için birçok yeni ileri teknoloji olmasına rağmen kum döküm, hammaddelerin düşük maliyeti, boyut ve bileşim açısından çok çeşitli dökümler sunması ve kalıplamanın geri dönüşüm olasılığı nedeniyle günümüzde en yaygın kullanılan döküm yöntemlerinden biri olmaya devam etmektedir (Saikaew ve Wiengwiset, 2012). Kum döküm işlemi, demir, bakır ve nikel gibi yüksek erime sıcaklıklarına sahip çoğu metal ve alaşımın dökümünde kullanıldığı için imalattaki en yaygın yöntemdir. Döküm yöntemi ile üretim yapmanın en büyük avantajı maça kullanılmasıdır. İç boşlukları oluşturan maça sayesinde çok karmaşık döküm parçalar üretilebilir (Bargaoui vd., 2017).

Döküm parçanın iç boşluklarını oluşturan maça dökümden hemen önce kalıba yerleştirilen ve üç fazdan oluşan heterojen bir malzemedir. İçeriğinde yüksek sıcaklıklara dayanıklı kum, bağlayıcı reçine ve kürleşmeyi hızlandıran gaz (amin gazı) bulunur. Dökülen parçaya bağlı olarak birçok proses ve reçine bağlayıcı kullanılmaktadır. En çok kullanılan yöntem cold-box (soğuk kutu)'tur (Bargaoui vd., 2017).

Soğuk kutu yöntemi ile üretilen maçaların üretimi sırasında bir çok farklı kum çeşidi ve kimyasal madde kullanılmaktadır. Kullanılan kimyasal maddeler, kumların birbirine yapışması ve kumun en optimum sertlik düzeyine ulaşabilmesini sağlamaktadır (Rodríguez, 2019). Her kimyasal madde gibi maça üretimi sırasında kullanılan kimyasal maddelerin kontrolsüz kullanımı sonucu çalışanlara ve çevreye zararları olabilmektedir. Özellikle maçanın sertleştirilmesi sırasında kullanılan amonyak bazlı kimyasal maddeler mutajen özellikte olup maça üretimi yapılan işletmeler için tehlike ihtiva etmektedir (Türk, 2022). Dökümhanelerde meslek hastalıkları içinde en yaygın olanı akciğer hastalıkları olup toza ve gazlara maruziyet sonucu oluştuğu bildirilmiştir (Zhang vd., 2010). Bu riskin de en yaygın görülebileceği proses maça üretim prosesidir. Maça üretim süreci, bir dökümhanenin en çok ve en tehlikeli kimyasal madde kullanılan prosesidir (Mirer, 1989).

Maça üretimi, silis kumu, bağlayıcı reçine ve reçine katalizörünün bir mikserde karıştırılması ardından hava ile kalıp içine sürüklenmesi ile yapılır. Kürleşmeyi hızlandırmak ve maçaya sertlik kazandırmak için katölizör gaz enjekte edilir (Tong vd., 2019). Tüm bu işlemler maça üretim makinesine ürüne göre kaydedilmiş maça parametrelerine göre yapılır (Gyarmati vd., 2021). Maçanın kalıba yerleştirilmeden önce uygun olup olmadığına karar verilen en önemli kontrol kriterlerinden birisi de maçanın çizilme sertliğidir (Pandit ve Deshpande, 2021). Optimum bir sertlik değeri taşıyan maça hem döküm sırasında yüksek sıcaklığa dayanacak hem de katılaşmadan sonra kolaylıkla dağılarak parçanın içinden çıkacaktır. Bu yüzden maça üretimi sırasında kullanılan makine parametrelerinin ayarlanması ile minimum kimyasal malzeme kullanılarak optimum sertlik elde edilmesi ile maça üretim tesislerinde gereksiz amin gazı kullanımının önlenmesi son derece önemlidir. Eğer maça imalatı sırasında reçetede belirtilen miktardan fazla reçine kullanılırsa döküm sırasında maça yanacağı için ortama atık reçine gazı çıkacaktır. Aynı şekilde aşırı aktivatör amin gazı kullanımı hem ortamda kimyasal uçuşmasına sebep olacak hem de proses güvenliğini riske sokacaktır (Udayan vd., 2021).

Maça sertliği yanında diğer bir belirleyici özelliğide maçanın mükavemetidir. Sertlik ve mukavemet (dayanıklılık) birbiri ile ilişkilidir ancak farklı özelliklerdir. Sertlik, bir maçanın çizilme veya çatlama direncini ifade ederken, dayanıklılık ise maçanın uygulanan bir kuvvete karşı kalıcı bir şekilde dayanabilme veya şekil değiştirmeden direnme yeteneğini ifade eder. Sertlik katalizör gaz tarafından sağlanır. Mukavemet ise reçine miktarı ile doğru orantılıdır (Beeley, 1972).

Maçada ki reçine miktarının etkisi de son derece önemlidir. Deney yapılan tesiste genellikle ağırlıkça %0,7-0,8-0,9 bağlayıcı yüzdeleriyle üretim yapılmaktadır. Tesisin laboratuvarındaki mukavemet değerleri incelendiğinde dört nokta bükme test sonuçları, yüksek reçine içeriği durumunda maçanın daha güçlü olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlara dayanarak, daha yüksek bir reçine yüzdesinin daha iyi mekanik özellikler sağladığı görülmektedir. Ancak tam tersine, bu durum, çekirdeğin soğutulmuş metalik parçadan çıkarılması sırasında zorluklara neden olur ve reçinenin ayrışması nedeniyle döküm sırasında daha fazla gaz yayılır. Bu gazlar döküm parçanın içinde sıkışabilir ve nihai üründe kusurlara neden olabilir (Bargaoui vd., 2017). Nihayi üründe peynir gözeneği hatası ile karşılaşmamak için minimum gaz sağlayan bir bağlayıcı sistemi seçmek ve bunu minimum düzeyde dozajlamak gerekir (Primafound, 2023).

Hem maça sertliği hem de maça dayanıklılığı, döküm süreci sırasında maçanın bütünlüğünü ve performansını sağlamak için önemlidir. Bunları optimize etmek çeşitli faktörleri dikkate almayı ve uygun test ve kalite kontrol önlemlerini uygulamayı gerektirir. Bu sebeple deneysel olarak üretimi yapılacak maçanın üretim reçetesindeki kullanılan reçinenin %0,7 oranı korunarak ve sabit tutularak deneyler yapılmış, bu çalışmada sadece katalizör gaz (DMEA) miktarının azaltılabilmesi için formüller aranmıştır.

Bu çalışma ile maça üretim reçetesine giren özellikle kimyasal malzemelerin minimum miktarda kullanılması ile ortama yayılan kimyasal madde miktarının kaynağında önlenmesi amaçlanmıştır. Maça sandığına (kalıp) giren malzemelerin kalıba girmeden önce makine üzerinden basınç, sıcaklık, süre gibi parametrelerin kombinasyonları ile deneme üretimi yapılarak bir anlamda maça üretim formülü (reçetesi) elde edilmeye çalışılacaktır.

Literatürde bulunan ve benzer yöntemlerle araştırılmış çalışmalar genellikle maça veya kalıp kalitesini etkileyen parametreler üzerinde durmuştur. Bu çalışma ile maça kalitesi ve üretim verimliliğinin yanında çalışan sağlığını etkileyen kimyasal maddelerin daha az kullanımına olanak sağlayacak formüller elde edilmesinden dolayı literatürde ki boşluğa katkı sağlaması amaçlanmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Maça sertliğinin döküm kalitesini olumsuz etkilemeyecek seviyede tutularak diğer makine parametrelerinin ayarlanması ile kimyasal madde miktarının azaltılmasına benzer çalışmaların literatürde araştırması yapılmış ve benzer çalışmalara rastlanmıştır.

Bargaoui ve arkadaşları 2017 yılında "Thermomechanical behavior of resin bonded foundry sand cores during casting" adlı makalede maça kalitesine reçine oranının etkisini araştırılmıştır. Yapılan deneysel üretimlerde kuma ağırlıkça sırasıyla %0,8, %1 ve %1,3'lük toplam bağlayıcı katılmıştır. Numuneler, 0,5 °C/dak ve 2 °C/dak ısıtma hızlarında 200 °C'ye kadar dört nokta bükülme altında test edilmiştir. Yüksek reçine içeriği durumunda kum çekirdeğin daha güçlü olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlara göre, daha yüksek reçine yüzdesinin daha iyi mekanik özellikler sağladığı görülmektedir (Bargaoui vd., 2017). Makalede çeşitli sıcaklık değerleri kıyaslanırken bu çalışmada da makine parametreleri ile optimum sertlik elde edilmeye çalışılmıştır.

Stauder ve arkadaşları tarafından 2016 yılında "Foundry sand core property assessment by 3-point bending test evaluation" adlı çalışmalarında dört bağlayıcı sistem deneysel çalışmalar ile test edilmiş ve mukavemet özellikleri incelenmiştir. Cold box sistemindeki mukavemet değerlerinin hot box sistemlere göre düşük olduğu tespit edilmiştir. (Stauder vd., 2016). Makalede bağlayıcı sistemleri kıyaslanırken bu çalışmada da makine parametreleri ile optimum sertlik elde edilmeye çalışılmıştır.

Chate ve arkadaşları 2014 yılında "Process parameter setting for core shooter" adlı yayınladıkları bir makalede maça kalitesi ve kimyasal madde tüketimi açısından maça üretimlerinde makine parametrelerini araştırmışlardır. Kumdaki reçine oranı, kum hazırlama süresi, gazlama süresi, amin gazını basınçlı hava ile yıkama süresi parametrelerinin maça kalitesine etkisini araştırmışlardır. Maça sertlik değeri 70 mm batma derinliği kabul edilirken bazı deneylerde 82-93 mm arasında sertlik değerleri elde etmişlerdir. Chate ve arkadaşlarının çalışması ile makale çalışmamız yöntem ve araştırma parametreleri açısından benzerlik göstermektedir (Chate vd., 2014). Burada maça içine katılan kimyasallardan dolayı döküm parçada sıvı metalle buluşma sırasında sıcaklıktan dolayı gaz çıkışının minimize edilmesi için çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada ise gereğinden çok kimyasal kullanımı ve yaratacağı tehlikeler belirtilmiştir.

2021 yılında Pandit ve Deshpande en iyi kalıp kum dayanımı elde etmek için çeşitli döküm parametreleri ile deney seti oluşturmuş, deneyler gerçekleştirmiş sonuçlar için regresyon analizi yapmış ve bir formül elde etmişlerdir. Çeşitli kum proses parametrelerinin tahmini için çoklu regresyon analizi ile sonuçlar gösterilmiştir. Tane inceliği sayısı, kil yüzdesi gibi beş kalıp özelliğinin girişiyle yeşil kum kalıp sisteminin modellenmesi için MINITAB 15 yazılımını kullanarak toplanan örnek verileri çoklu regresyon analizi için test etmişlerdir. Çıktı olarak nem, öğütme

süresi, numunenin sertliği ve ham basınç dayanımı elde edilmiştir (Pandit ve Deshpande, 2021). Bizim çalışmamızda ise aynı şekilde en optimum kimyasallar ile ideal sertlik için deneysel çalışmalar yapılmış olup sonuçlar tıpkı Pandit ve Dasphane'nin yaptığı gibi istatistiksel yöntemlerle analiz edilmiş ve reçeteler elde edilmiştir. Bu yönüyle literatürde ki bu çalışma yapılan amin gazı azaltma çalışması ile benzerlik içermekte olup kalıp özellikleri yerine maça formülü ortaya çıkaracağı için bu konudaki boşluğu da doldurmaya katkı sağlayacaktır. Bu çalışmada en iyi kum dayanımı elde etmek için regresyon analizi yapılmış ve bir formül elde edilmiştir. Bu çalışmada da aynı şekilde en optimum kimyasallar ile ideal sertlik için analizler yapılmıştır.

Danko ve arkadaşları 2023 yılında Sustainable Materials and Technologies dergisinde yayınlanan "Development of inorganic binder systems to minimise emissions in ferrous foundries" adlı makalelerinde döküm esnasında kalıptan yayılan emisyonları ölçmüşler ve inorganik bağlayıcı kumların döküm sırasında diğer kumlara göre daha az emisyon yaydığını tespit etmişlerdir (Danko vd., 2023). Bu makalede kalıp kumu özelliklerinin bağlayıcılar ile nasıl değiştiği araştırılmıştır. Bu yönüyle bizim çalışmamıza benzerlik göstermektedir.

Schneider ve Stevenson 2012'de yaptıkları bir çalışmada bir maçanın nihai kalitesinin etkileşimde bulunan çok sayıda değişkenden kaynaklandığını, maça üfleme prosesinde atış nozullarının ve havalandırma deliklerinin toplam sayısı ve ayrıca kullanılan nozüllerin ve havalandırma deliklerinin boyutu ve konumları çoğu zaman bir maçanın nihai kalitesi üzerinde çarpıcı bir etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, maça üfleme sırasında uygulanan basınç miktarı, toplam atış süresi ve kum/bağlayıcı oranı gibi proses parametreleri de maça sandığını doldurulmasında etkileyebildiğini, maça kutusu doldurulduktan sonra, maçaya yeterli mukavemeti kazandırmak için bağlayıcının kürlenmesi veya sertleştirilmesi gerektiğini ve maça kürlenme süreci aynı zamanda maçanın nihai kalitesini etkileyecek birçok değişkeni olduğunu bildirmişlerdir (Schneider ve Stevenson, 2012). Makale çalışmasında da maça sandıklarındaki hava kanallarının alanı bağımsız değişken olarak ele alınmış ve daha bir çok parametrenin analizi yapılmıştır.

Gyarmati ve arkadaşları 2021 yılında "The effect of sand quality on the bending strength and thermal distortion of chemically bonded sand cores" adlı çalışmalarında iki maça kumunun çeşitli reçine sistemleri ile mukavemet özelliklerini kıyaslamışlardır. Araştırmacılar yeni kum ve rejenere kumun stabilitesini incelemiş ve yeni kumun daha iyi mukavemet değerleri verdiğini bulmuşlardır (Gyarmati vd., 2021). Makalede maça kumları kıyaslanırken bu çalışmada makine parametreleri ile optimum sertlik elde edilmeye çalışılmıştır.

Behara ve arkadaşları, bağlayıcı içeriğinin, kum tanecik inceliğinin ve sertleşme süresinin, pişmeyen kimyasal olarak bağlanmış kum kalıp maçalarının sıkıştırma mukavemeti, maça sertliği ve kesme mukavemeti üzerindeki etkisini değerlendirmek üzere deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. 50 tane inceliği, 2,4 bağlayıcı yüzdesi ve 3 saatlik kürlenme süresinin maksimum faktör ayarı olduğu bulunmuştur. Sertleşme süresinin en etkili ve önemli faktör olduğunu göstermişlerdir (Behara vd., 2022). Bu çalışmada da benzer şekilde en ideal sertlik değeri için maça üretim formülü elde edilmiştir.

Kumar ve Prakash 2015'de yaptıkları bir deneysel çalışmada döküm kusurlarına sebep olan parametreleri araştırmışlardır. Çalışma büzülme, kum hatası, kum üfleme delikleri, kabuklanma, iğne delikleri gibi döküm kusurlarını Taquchi optimizasyon tekniği kullanılarak en aza indirilmeyi amaçlamışlardır. Hesaplanan parametreler için optimum koşullar; sıkıştırma dayanımı 1300 g/cm², nem İçeriği %3,5) geçirgenlik 163 ve kalıp sertlik sayısını 95 olarak tespit etmişlerdir (Kumar ve Prakash, 2015). Bu çalışma yöntem olarak benzerlik içermektedir.

Singh ve Kumar 2016'da yaptıkları bir deneysel araştırmada çeşitli deneyler ve test teknikleri uygulandıktan sonra, döküm sıcaklığının optimum değerinin 1340, geçirgenliğin 150, kum parçacık boyutunun 42 AFS olduğu sonucuna varmışlardır (Singh ve Kumar, 2016). Makale çalışmasında da benzer bir yaklaşımla her bir parametrenin maça sertliğine etkileri araştırılmıştır.

Upadhye ve Keswani, 2012 yılında yaptıkları bir çalışmada döküm kalitesini etkileyen parametreleri araştırmışlar ve optimum değerlerini nem:3,5, sıkıştırma mukavemeti:900, geçirgenlik:185, dökme sıcaklığı:1420°C olarak tespit etmişlerdir (Upadhye ve Keswani, 2012). Bu makalede de 10 adet parametre test edilmiş ve en ideal değerler elde edilmiştir.

Chaudhari ve Aloni 2022 yılında yayınladıkları bir makalede varyans analizinde, çoklu performans özelliklerini önemli ölçüde etkileyen proses parametrelerin; karbon eşdeğeri, döküm sıcaklığı, çelik hurdası, ham sıkıştırma mukavemeti, geri dönüş kumu sıcaklığı ve sıkma basıncının olduğunu belirlemişler ayrıca bu parametrelerin kalıp kalitesine toplamda %86 civarında bir katkı sağladığını belirtmişlerdir (Chaudhari ve Aloni, 2022). Bu makalede de benzer yöntem kullanılmış ve ideal maça parametreleri belirlenmiştir.

Literatür taraması sonucunda elde edilen bu araştırmalar incelendiğinde araştırmaların ürün kalitesi ile ilgili

olduğu görülmektedir. Çalışmalar maça sertliği, maça kalitesi, döküm parça ile optimizasyonu gibi konuları ele almıştır. Literatürde genelde kalıplama prosesi ve döküm hatalarına etki eden parametreler incelenmiş ve üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Maça parametreleri ile yapılmış çalışmalar çok az olduğu için buraya katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Gerçekleştirilen bu çalışma ile maça üretim makinelerine ait parametrelerin değiştirilerek ürün kalitesinin artırılmasının yanı sıra kullanılan kimyasal maddeler minimum seviyeler ile optimum kullanımının sağlanması ve çalışan ile çevre sağlığının olumsuz olarak etkilenmesinin önüne geçilmesi amaçlanmaktadır. Bununla birlikte ilerki zamanlarda yapılacak benzer çalışmalarda maça üretimi sırasında hangi parametrenin hangi değişken üzerinde etkili olduğu ile ilgili bir rehber kaynak niteliğinde olacaktır. Dökümhane ve benzer sektörlerde maça ve kalıp gibi kimyasal maddeler ile oluşturulan yardımcı ürünlerin ortaya çıkarılmasında hem çalışana hem de çevreye oldukça zararlı olan kimyasal maddelerin daha az kullanılmasını sağlayacaktır. Maça üretiminde kimyasal madde kullanımı gerektirmeyen, veya minimum miktarda kimyasal madde kullanımı sağlayarak makine parametrelerinin düzenlenebilecek ve en uygun şartların oluşturulması sağlanabilecektir. Araştırmada maça sertliğine etki eden 10 adet parametrenin durumu incelenecektir. Maça kum tanelerinin birbirine bağlanması için kullanılan sıvı fazdaki reçine ve izosiyanat bu araştırmada sabit parametre olarak belirlenmiştir. Maçanın gerekli mukavemetini sağlayane en önemli bileşen reçine ve izosiyanattır ancak dimetiletiamin gazına göre insana ve çevreye zarar verme potansiyeli gerek havalandırma olanakları ile gerekse kapalı sistemler ile maçaya ilave edildiği için ve sıvı fazda işlem gördüğü için sabit parametre olarak ele alınıp aşırı uçucu gaz olan dimetiletiamin miktarının düşürülmesi amaçlanmıştır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu makalede ki çalışma, deneysel bir çalışma olup deneysel tasarım metodlarından biri olan kesirli faktöryel deney tasarımı metodu kullanılarak yapılmıştır. Kesirli faktöryel deney tasarımı her bir girdi değişkeninin diğer tüm girdi değişkenleriyle etkileşimi tahmin edebilen bir metottur. Çoğu zaman deney yapan araştırmacıların tam faktöryel deneyleri gerçekleştirmek için yeterli zamanı, kaynakları veya bütçesi olmayabilir. Eğer deneyi yapanlar belirli yüksek dereceli etkileşimlerin (üçüncü derece ve daha yüksek) önemli olmadığını makul bir şekilde varsayabilirlerse, o zaman ana etkiler ve iki dereceli etkileşimler hakkındaki bilgiler, tam faktöryel deneyin yalnızca bir kısmını çalıştırarak elde edilebilir. Deneycilerin ana etkileri ve istenen etkileşim etkilerini minimum sayıda deneme veya deneysel çalıştırmada incelemesine olanak tanıyan bir tür ortogonal dizi tasarımına kesirli faktöryel tasarım adı verilir. Bu kesirli faktöryel tasarımlar endüstride en yaygın ve yaygın olarak kullanılan tasarım türleridir (Antony, 2003). Deneysel çalışmalar 4 bölümden oluşmaktadır. Bunlar; planlama aşaması, tasarım aşaması, yürütme aşaması ve analiz aşaması'dır (Antony, 2003). Çalışmada izlenecek adımlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Deney aşamalarında uygulanacak adımlar
(Steps to be applied in the experimental stages) (Rekab ve Shaikh 2005)

ADIM		YAPILACAK ÇALIŞMA
PLANLAMA ADIMLARI	Adım-1	Deney ekibini oluşturulması. Ekibi oluştururken, ekip üyelerinin teknik olarak yetkin ve aynı zamanda anlaşılması kolay olduğundan emin olunmalıdır.
	Adım-2	Hedeflerin belirlenmesi. Başlangıçta, deney için gerçekçi hedefler belirlenmelidir.
	Adım-3	Çıktının belirlenmesi. Bu adım, deneycinin hangi çıktı değişkenini incelemek istediğiyle ilgilidir. Bu, sonraki iki adımı etkilediği için önemli bir adımdır.
	Adım-4	Giriş faktörlerinin (parametrelerinin) seçilmesi. Bu adım, tepkiyi etkileyen faktörleri dikkatlice belirlemekle ilgilidir. Bir faktörün atlanması veya alakasız bir faktörün dahil edilmesi sonuçları olumsuz yönde etkileyebilir.
TASARIM ADIMLARI	Adım-1	Faktörlere değerlerin atanması. Planı yapılmış olan deneyde tasarımcı, her gözlem için faktörlere değerler atmalıdır. Bu değerler birkaç seviyede olabilir.
	Adım-2	Deneysel tasarım metodunun seçilmesi ve deney planı oluşturulması
YÜRÜTME ADIMLARI	Adım-1	İlk başlatma. Testleri yürütmedeki bu adım, birkaç deneme çalıştırması ve ilk çalıştırmalardan kaynaklanan sorunları gidermek için deneyin kurulmasını içerir. Bu, gerçek deneyin sorunsuz bir şekilde yürütülmesini sağlar.
	Adım-2	Deneysel çalıştırmalar. İlk başlatmadan sonra, bu adımda tasarım planına göre çalıştırmalar yapılır.
	Adım-3	Deneysel çalıştırmaların tamamlanması. Bu adım, tüm sonuçların düzgün bir şekilde belgelenmesini ve deneysel kurulumun ve ekipmanın gelecekteki deneyler veya başkaları tarafından kullanım için orijinal durumlarına geri getirilmesini sağlar.
ANALİZ ADIMLARI	Adım-1	Çıktıyı etkileyen önemli faktörleri belirlenmesi.
	Adım-2	Faktörlerin test edilmesi ve regresyon eşitliğinin bulunması

3.1. Planlama Adımları (Planning Steps)

- **Deney ekibi belirlenmesi:** Deneysel çalışma yapılmadan önce maça üretim tesisinde çalışan mühendis ve teknisyenlerden oluşan ekip kuruldu.
- **Hedefler:** Çalışmanın hedefi; maça üretim parametrelerinden oluşan ve amin gazı miktarını azaltmaya imkan verecek sertlik formülünün elde edilmesidir. Bu hedef ekip ile paylaşıldı.
- **Çıktının belirlenmesi:** 10 adet maça üretim parametresinden oluşan deneysel çalışmanın çıktısı maça sertliğidir. Sertlik parametresi maçanın kalıp içinde ki döküm sırasında basınca ve sıcaklığa dayanmasını sağlayan parametrelerden biridir.
- **Giriş faktörlerinin (parametrelerinin) seçilmesi:** Maça sertliğini etkilediği düşünülen 10 adet parametre seçilmiş ve aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Giriş faktörleri (parametreler) (Input factors (parameters))

SIRA	PARAMETRELER	BİRİM	AÇIKLAMA
1	Kürleme gazı (DMEA) ön dozaj miktarı	cc	DMEA pompasının kalıp içine enjekte edeceği gaz miktarı
2	Kürleme gazı (DMEA) son dozaj miktarı	cc	DMEA pompasının kalıp içine enjekte edeceği gaz miktarı
3	Gazlama (yıkama) süresi	saniye	Amin gazının kalıba enjekt eedilme süresi
4	Gazlama basıncı	bar	DMEA'nın kalıba verileceği basınç
5	Üfleme basıncı	bar	Kumun kalıba iletileceği hava basıncı
6	Max. basınca çıkma süresi	saniye	Seçilen basınç değerine ulaşma süresi
7	Kalıp kapanma yüzeylerinde sızdırmazlık conta varlığı	var/yok	Kalıp öpüşme yüzeyinde conta ihtiyacı
8	Kürleme gazı (DMEA) sıcaklığı	°C	DMEA'nın enjekte edilme sıcaklığı
9	Kaçıncı maça (kanal temizliği sonrası ölçüm sırası)	sıra	Kalıp hava ve gaz tahliye kanalları temizliği sonrası kaçıncı maçadan ölçüm alınacağı
10	Filtre giriş/çıkış alanı oranı	mm ²	DMEA'nın tahliye olacağı ftrelerin açıklık değeri

Deneysel tasarım aşamasında maça sertliğini etkilediği düşünülen bazı parametreler sabit tutulmuştur. Bunlar; maça kumu bağlayıcısı (reçine) ve katalizör oranı, maça kumu (rejenere edilmiş silis), sertlik ölçüm noktası, maça makinesi operatörü, maça makinesi tipi, amin gazı yıkama havası basıncı (3 bar)'dır. Bu faktörlerin de elbette sertlik üzerinde etkiler vardır ancak tamamından oluşan bir deney planı yapmak hem yüksek maliyet oluşturacağı hem de zaman alacağı için sabit tutulmuşlardır. Gelecekte yapılacak araştırmalarda bu faktörler ile de çalışma yapılabilecektir.

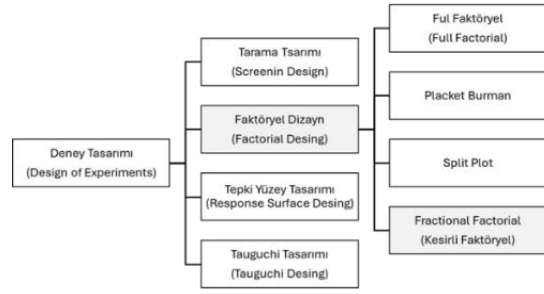
3.2. Tasarım Adımları (Design Steps)

- **Giriş faktörlerinin (parametrelerinin) alt ve üst seviyelerinin belirlenmesi:** Maça sertliğini etkilediği düşünülen 10 adet parametrenin alt ve üst seviyeleri seçilmiş ve tablo 3'de verilmiştir. Bu değerler seçilirken literatürden (Hunter vd., 2005; Antony, 2003) ve deneysel çalışma yapılan maça üretim tesisinin üretim reçetelerinden faydalanılmıştır.

Tablo 3. Giriş faktörlerinin alt ve üst seviyeleri (Lower and upper levels of input factors)

SIRA	PARAMETRELER	BİRİM	ALT SEVİYE	ÜST SEVİYE
1	Kürleme gazı (DMEA) ön dozaj miktarı	cc	3	9
2	Kürleme gazı (DMEA) son dozaj miktarı	cc	1	3
3	Gazlama (yıkama) süresi	s	10	23
4	Gazlama basıncı	bar	1	2,5
5	Üfleme basıncı	bar	3	5
6	Max. basınca çıkma süresi	s	4	8
7	Kalıp kapanma yüzeylerinde sızdırmazlık conta varlığı	var/yok	yok	var
8	Kürleme gazı (DMEA) sıcaklığı	°C	35	60
9	Sertlik ölçüm sıra maça	sıra	5	20
10	Filtre giriş/çıkış alanı oranı	mm ²	1,92	3,98

- **Deneysel tasarım metodu seçilmesi :** Deneysel çalışma DOE (Desing of Experiment) yöntemlerinden olan kesirli faktöryel dizayn metodu ile yapılacaktır (Şekil 1). Yöntem Minitab 22 paket programından faydalanılarak kullanılacaktır.



Şekil 1. Deney tasarım metodları (Experimental design methods) (Antony, 2003)

3.2.1.Minitab DOE Tasarım Adımları (Minitab DOE Design Steps)

Seçilen parametreler (faktörler) Minitab çalışma sayfasına işlendikten sonra program üzerinde DOE (Design of Experiment) adımları takip edilerek “DOE, Factorial, Create Factorial Analysis” ile model tasarımı yapılmıştır. Çözünürlük tablosundan 10 faktör ve 32 deneye karşılık gelen IV çözünürlük seçilmiştir. Bu aşamadan sonra bağımsız değişkenler (faktörler) düşük (low) ve yüksek (high) seviyeleri ile sisteme işlenmiştir. Faktörlerin seviyeleri sisteme girildikten sonra programda deney planı (Tablo 4) oluşturulmuştur.

Tablo 4: Deney planı (Experiment plan)

Deney no	Ön dozaj (cc)	Son dozaj (cc)	Gazlama süresi (s)	Gaz basıncı (bar)	Üfleme basıncı (bar)	Max. basınca çıkma süresi (s)	Conta	Gaz sıcaklık (°C)	Filtre alanı (mm ²)	Sertlik maça sıra
1	3	1	10	1	3	8	yok	60	3,82	20
2	9	1	10	1	3	4	var	35	1,92	20
3	3	3	10	1	3	4	var	35	3,82	5
4	9	3	10	1	3	8	yok	60	1,92	5
5	3	1	23	1	3	4	var	60	1,92	5
6	9	1	23	1	3	8	yok	35	3,82	5
7	3	3	23	1	3	8	yok	35	1,92	20
8	9	3	23	1	3	4	var	60	3,82	20
9	3	1	10	2,5	3	4	yok	35	1,92	5
10	9	1	10	2,5	3	8	var	60	3,82	5
11	3	3	10	2,5	3	8	var	60	1,92	20
12	9	3	10	2,5	3	4	yok	35	3,82	20
13	3	1	23	2,5	3	8	var	35	3,82	20
14	9	1	23	2,5	3	4	yok	60	1,92	20
15	3	3	23	2,5	3	4	yok	60	3,82	5
16	9	3	23	2,5	3	8	var	35	1,92	5
17	3	1	10	1	5	8	var	35	1,92	5
18	9	1	10	1	5	4	yok	60	3,82	5
19	3	3	10	1	5	4	yok	60	1,92	20
20	9	3	10	1	5	8	var	35	3,82	20
21	3	1	23	1	5	4	yok	35	3,82	20
22	9	1	23	1	5	8	var	60	1,92	20
23	3	3	23	1	5	8	var	60	3,82	5
24	9	3	23	1	5	4	yok	35	1,92	5
25	3	1	10	2,5	5	4	var	60	3,82	20
26	9	1	10	2,5	5	8	yok	35	1,92	20
27	3	3	10	2,5	5	8	yok	35	3,82	5
28	9	3	10	2,5	5	4	var	60	1,92	5
29	3	1	23	2,5	5	8	yok	60	1,92	5
30	9	1	23	2,5	5	4	var	35	3,82	5
31	3	3	23	2,5	5	4	var	35	1,92	20
32	9	3	23	2,5	5	8	yok	60	3,82	20

3.3. Yürütme ve Analiz Adımları

Deney planı oluşturulduktan sonra deneysel üretimlerin yapılacağı maça makinesinde hazırlıklar tamamlanıp ve deney planındaki parametreler test edilmiştir. Herhangi bir olumsuzluk ile karşılaşılmadan deneysel üretimlere başlanmıştır. Deney planında ki parametre değerleri makineye girilip maça üretimleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen maçaların üzerinde çizik sertlik ölçme aleti ile sertlik değerleri ölçülerek kayıt edilmiştir. Yürütme aşaması şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Deneysel üretim uygulama aşaması (Experimental production implementation phase)

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Elde edilen sertlik değerleri (Tablo 5) Minitab 22 paket programına girildikten sonra program üzerinden ilgili komutlar ile model özeti, ANOVA ve regresyon eşitlikleri elde edilmiştir.

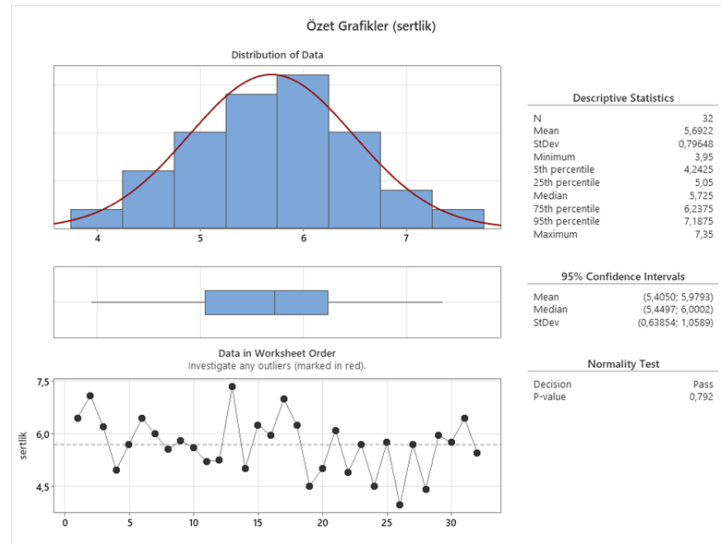
Tablo 5: Sertlik değerleri (Hardness values)

DENEY NO	SERTLİK DEĞERİ	DENEY NO	SERTLİK DEĞERİ
1	6,45	17	7,00
2	7,10	18	6,25
3	6,20	19	4,50
4	4,95	20	5,00
5	5,70	21	6,10
6	6,45	22	4,90
7	6,00	23	5,70
8	5,55	24	4,50
9	5,80	25	5,75
10	5,60	26	3,95
11	5,20	27	5,70
12	5,25	28	4,40
13	7,35	29	5,95
14	5,00	30	5,75
15	6,25	31	6,45
16	5,95	32	5,45

4.1. Model özeti, ANOVA ve Regresyon Denklemi (Model summary, ANOVA and Regression Equation)

Deneyimiz 10 faktörlü, her bir faktörde 2 seviyeli 1 tekrarlı ve maça sertliğini faktörlere göre optimize etmek amaçlıdır. Kesirli faktöryel tasarımı kullanılarak 32 farklı deney yapılmıştır. Bunun için maça üretim proses parametreleri ele alınarak, bunların değişiminin çıktı üzerindeki etkisi ölçülmeye çalışılmıştır. Çalışmada, kontrol edilemeyen faktörleri en aza indirmek amacıyla bazı değişkenlerin deney boyunca aynı tutulması sağlanmıştır. Öncelikle temel etkenlerden biri olan reçine miktarı değişkeni sabitlenmiştir. Çalışan operatörün aynı kalmasının sağlanması amacıyla deneyler hep aynı vardiyada yapılmıştır. Yine çalışma şartlarını etkileyebileceğini düşündüğümüz ortam sıcaklığının sabit kalması için deneyler aynı vardiyalarda aralıksız yapılarak, toplam 32 deney tamamlanmıştır.

Elde edilen çıktılar Minitab 22 programına girildikten sonra, *Stat - Doe - Factorial - Analyze Factorial Design* aşamaları seçilerek analiz safhasına geçilmiştir. Çıktı olarak sertlik seçilmiştir. *Terms* sekmesi işaretlenerek, tüm değişkenler seçilmiştir. *Prediction* sekmesinde güven aralığı 95 olarak tanımlanmıştır. Grafiklerde normal ve pareto grafikleri seçilmiştir.



Şekil 3. İstatistik sonuçları (Statistical results)

Şekil 3'de ki grafikte verildiği gibi 32 deney sonucunda ortalama sertlik 5,6922 olarak hesap edilmiştir. Standart sapma 0,769'dur. Elde edilen minimum sertlik 3,95, maksimum sertlik ise 7,95'tir. Tasarımın özeti tablo 6'da verilmiştir. Model tasarımı 10 faktör ve 32 adet deneyden oluşmaktadır. Çözünürlük IV'tür.

Tablo 6: Tasarım modeli özeti (Design summary)

DİZAYN BİLGİLERİ	AÇIKLAMA
Factors (Faktörler)	10
Runs (Deney sayısı)	32
Blocks (Bloklar)	1
Base Design (Dizayn)	10:32
Replicates (Tekrarlar)	1
Center pts (total)	0
Resolution (Çözünürlük)	IV
Fraction (Kesir)	1/32

Model özeti tablosu oluşturulmuştur (Tablo 7). Buna göre S değeri 0,391222, R-sq değeri %83,66 olarak elde edilmiştir. Hem S değeri hem de R-sq değeri modelin oldukça iyi kurgulandığını ve çıktığı etkileyen faktörlerin çıktı üzerinde etkili olduğu kanıtlanmıştır.

Tablo 7: Model S ve R değerleri (Model S and R values)

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,391222	83,66%	75,87%	62,05%

Tablo 8: Varyans analizi (ANOVA) Analysis of variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	16,4514	1,6451	10,75	0,000
Linear	7	11,4443	1,6349	10,68	0,000
Ön dozaj	1	3,1563	3,1563	20,62	0,000
Son dozaj	1	2,0251	2,0251	13,23	0,002
Gazlama süresi	1	0,4876	0,4876	3,19	0,089
Üfleme basıncı	1	1,7345	1,7345	11,33	0,003
Conta	1	0,797	0,797	5,21	0,033
Gaz sıcaklık	1	1,5095	1,5095	9,86	0,005
Filtre alanı	1	1,7345	1,7345	11,33	0,003
2-Way Interactions	3	5,0071	1,669	10,9	0,000
Son dozaj*gazlama süresi	1	0,8945	0,8945	5,84	0,025
Conta*gaz sıcaklık	1	2,5595	2,5595	16,72	0,001
Conta*filtre alanı	1	1,5532	1,5532	10,15	0,004
Error	21	3,2141	0,1531		
Total	31	19,6655			

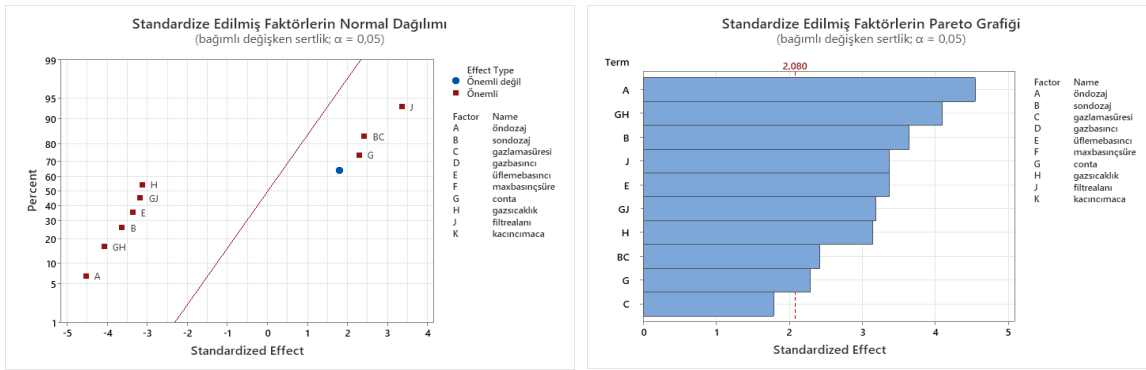
Elde edilen varyans analizi tablosuna (Tablo 8) göre gazlama süresi hariç diğer tüm faktörlerin P değerlerinin $\alpha < 0,05$ sağladığı %95 güven aralığı içinde olduğu görülmektedir. Model, 7 ana faktörden ve 3 adet ikili etkileşimden oluşmaktadır. Bu faktörler ile elde edilen regresyon formülü (2) aşağıda verilmiştir.

Regresyon Formülü

(2)

$$\begin{aligned} \text{sertlik} = & 8,412 - 0,1047 \text{ öndozej} - 0,676 \text{ sondozej} - 0,0325 \text{ gazlamasüresi} - 0,2328 \text{ üflemebasıncı} \\ & + 1,898 \text{ conta} - 0,01738 \text{ gazsıcaklık} + 0,2451 \text{ filtrealanı} \\ & + 0,0257 \text{ sondozej} * \text{gazlamasüresi} - 0,02262 \text{ conta} * \text{gazsıcaklık} - 0,2319 \text{ conta} * \text{filtrealanı} \end{aligned}$$

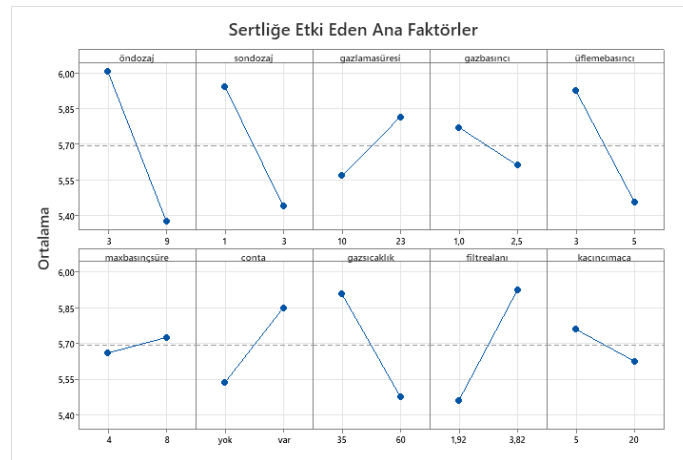
Standardize edilmiş faktörlerin etkilerine bakıldığında tüm faktörlerin çizginin sağında ya da solunda sıfırdan uzakta etki gösterdikleri sadece bir faktörün önemsiz olarak yer aldığı tespit edilmiştir (Şekil 8 (a)). Pareto analizine göre (Şekil 8(b)) hesaplanan 2,080 çizgisinin sağında 9 faktör yer almıştır. Bu faktörlerin tamamının çıktısı üzerinde etkili olduğu kanıtlanmıştır. Yedi parametre (öndozej, sondozej, gazlamasüresi, üflemebasıncı, conta, gazsıcaklık, filtrealanı) karşılaştırmalı olarak daha önemli olduğundan (Tablo 8), bu nedenle çoklu performans özellikleri için optimum işlem parametrelerini tahmin etmek üzere sadece bu parametreler dahil edilmiştir.



Şekil 8. (a) Standardize edilmiş faktörlerin dağılımı, (b) Standardize edilmiş faktörlerin Pareto grafiği ((a) Distribution of standardized factors, (b) Pareto chart of standardized factors)

4.2. Faktörlerin Etkileri (Effects of factors)

Deney 10 faktörün 2 seviyesi ile gerçekleştirilmiştir. Sertliğe etki eden faktörlerin etki değerleri Şekil 9'da verilmiştir. Buna göre sertlik çıktısı üzerinde etkili olan faktörler istatistiksel olarak kanıtlanmıştır. Faktörlerin ana etkileri grafiksel olarak gösterilmektedir. Amin gazı tüketimini belirleyen faktörler grafikte ortalama ile kesişim açısı daha fazla olarak yer almıştır. Max basınç süre ve kaçınıcı maça faktörleri görüldüğü gibi ortalama 5,70 sertlik çizgisini kesim açısı diğer faktörlere göre düşüktür.



Şekil 9. Sertliğe etki eden ana faktörler (Main factors affecting hardness)

4.2.1. İkili Etkileşimler (Interactions)

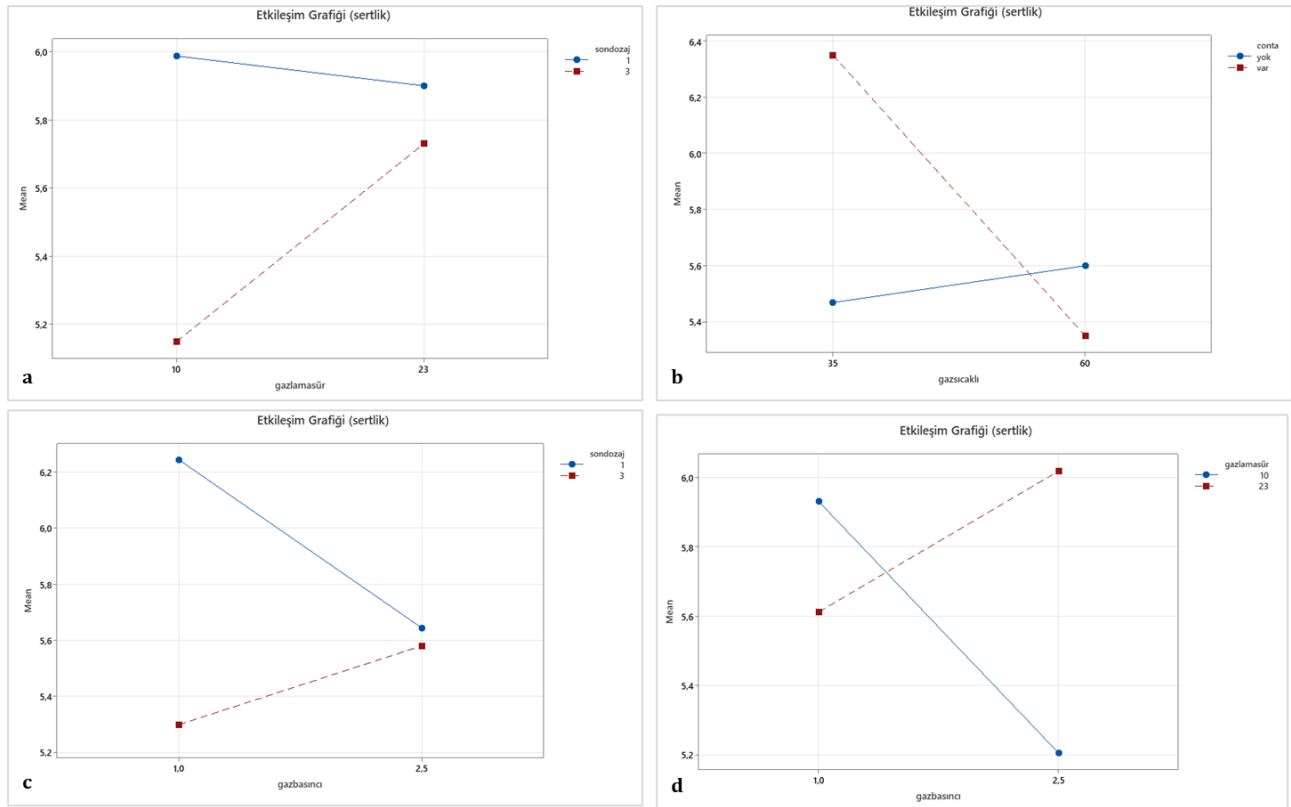
İki faktör birbirine paralel ise etkileşim olmadığı, birbirini dik olmayan açı ile kestiğinde güçlü etkileşim olduğu ve tam çapraz kestiğinde ise çok güçlü etkileşim olduğu belirtilmiştir. Çalışmada etkileşim içinde olan faktörlerden

bazıları aşağıda verilmiştir. Şekil 10'da verildiği gibi, deneyden elde edilen en önemli bulgulardan biri, gazlama süresi ile son dozaj etkileşimidir. Son dozaj yüksek seçildiğinde gazlama süresi parametresinin artırılması sertlik çıktısını belirgin olarak etkilemektedir. Ancak, son dozaj düşük seçilirse gazlama süresinin seviyesi çıktı üzerinde etkisi önemsiz hale gelmektedir. Bu ilişki, sertlik çıktısını bozmadan gazlama süresini düşürecek bir seçenek olduğu sonucunu göstermektedir (Şekil 10 a).

Gaz sıcaklığı ile conta etkileşimi de çıktı üzerinde önemli bir etkileşim olarak tespit edilmiştir. Contanın olmadığı durum, gaz sıcaklığının etkisini ortadan kaldırmakta ve çıktı kötüleşmektedir. Conta var olduğunda düşük gaz sıcaklığı istenen çıktıya ulaşmakta önemli etki göstermektedir (Şekil 10 b).

Şekil 10 (c)'de son dozaj ile gaz basıncı etkileşimi verilmiştir. Son dozaj 1 cc iken gaz basıncının 2,5 bar seçilmesinde sertlik 5,64 olurken son dozaj 3'e çıkarıldığında 2,5 bar basınçta 5,58 olmaktadır. Dolayısıyla sertlikteki 0,06'lık fark anlamsız hale gelmektedir. Son dozajı 3 cc seçmek yerine 1 cc seçerek makinaın gazı kalıba 2,5 bar'da ilemesi ile hem gaz tasarrufu sağlanmış olacak hem de ortama DMEA yayılımı azaltılmış olacaktır.

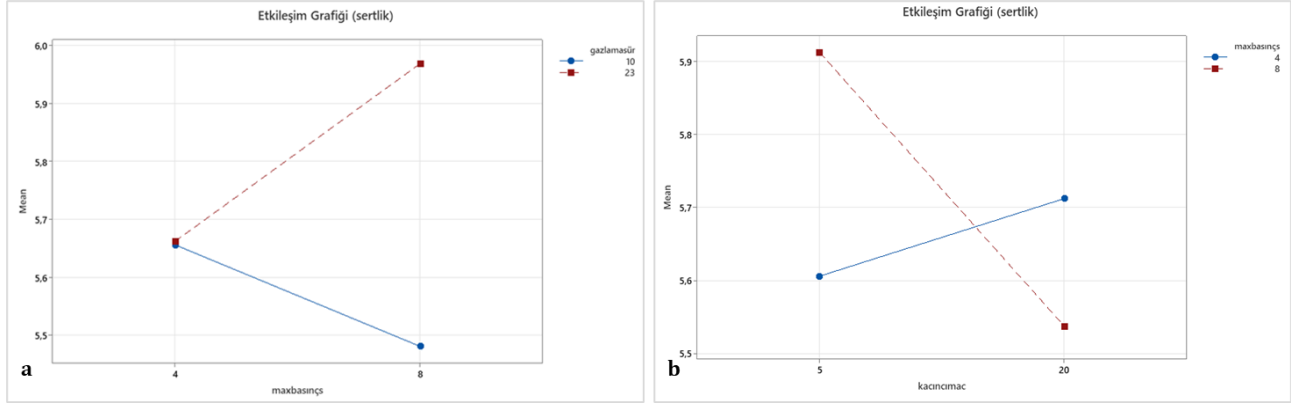
Gazlama süresi ile gaz basıncı etkileşimi şekil 10 (d)'de verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere iki faktör arasında oldukça güçlü bir etkileşim vardır. Gazlama basıncı 1 olarak seçildiğinde sertlik değerleri sırasıyla 10 saniye için 5,93, 23 saniye için 5,61 olmaktadır. Aralarında ki fark 0,32 (%5) çıkmaktadır. Ancak gazlama basıncı 2,5 bar seçildiğinde gazlama süresinin 10 ile 23 saniye arasında seçilmesi etkileşimi artırmakta ve sertlik değerleri arasında yaklaşık olarak %15'lik bir fark yaratmaktadır. Seri üretim şartlarında hem üretim verimliliği açısından hem de çalışan ve proses güvenliği açısından 10 saniye gazlama süresi seçilmesi ve DMEA gazının 2,5 bar ile kalıba enjekte edilmesi son derece faydalı olacaktır. Sert maça tercih edildiğinde 10 saniye ve 2,5 bar için elde edilebilecek sertlik değeri 5,2 olacaktır.



Şekil 10. Sertliğe etki eden ana faktörlerin ikili etkileşimleri a) gazlamasüresi-sondozaj, b) conta-gazsıcaklık, c) sondozaj-gazbasıncı, d) gazbasıncı-gazlamasüresi (The interactions of the main factors affecting the hardness are a) gassing time-final dosage, b) seal-gas temperature, c) final dosage-gas pressure, d) gas pressure-gassing time)

Şekil 11'de gazlama süresi ile maxbasıncısüre etkileşimi verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere iki faktör arasında güçlü bir etkileşim vardır. Max basınca ulaşılacak süre 4 saniye olarak seçildiğinde gazlama süresinin etkisi ortadan kalkmaktadır. Max basınca ulaşma süresi 8 saniye olarak seçildiğinde ise 10 saniyelik gazlama süresinde sertlik değeri 5,48 ile etkileşimde ki en iyi değerini almaktadır. Seri üretim şartlarında eğer maça sertlik değeri 5,6 ile 5,7 arasında olması isteniyorsa max basınca ulaşma süresinin 4 saniye seçilmesi üretim verimliliği açısından iki kat karlılık sağlayacaktır.

Şekil 11’de max basınç süresi ile kaçınıncıma etkileşimi verilmiştir. Bu etkileşim çok güçlü bir etkileşim olarak elde edilmiştir. Max basınca ulaşma süresi 8 saniye seçildiğinde filtre kanalı 20. maçada temizlenirse (tahliye kanalı çapı daralır) amin gazı daha fazla sürede ve yoğunlukta maçaya temas edecek ve böylece maça sertliği artacaktır. Max basınca ulaşma süresi 4 saniye seçildiğinde 5.maçadan sonra sertlik değeri 5,60 olmaktadır. Eğer bu sertlik değeri yeterli oluyor ise 8 saniye seçmek yerine 4 saniye seçilmesi işletme verimliliği açısından faydalı olacaktır.



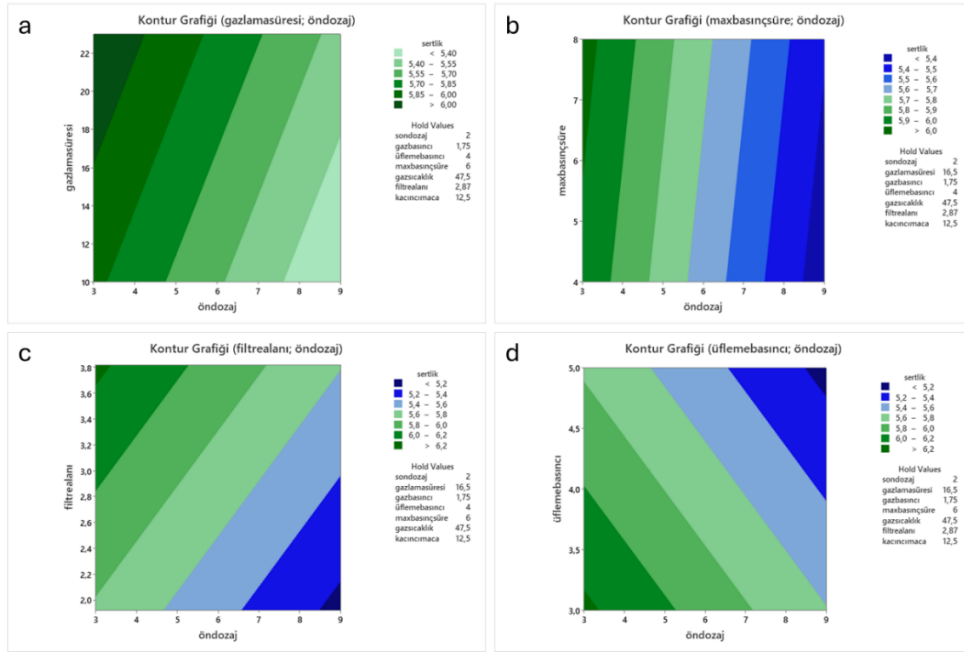
Şekil 11. Sertliğe etki eden ana faktörlerin ikili etkileşimleri a) gazlaması süresi-max basınca süre, b) kaçınıncıma-max basınca süre (The interactions of the main factors affecting the hardness are a) gassing time-max. pressure time, b) number of cores-max. pressure time)

4.3. Kontur Grafikleri (Counter Plots)

Ön dozaj ve son dozajla ilişkili parametrelerin sertlik değerleri kontur grafiklerinde verilmiştir.

4.3.1 Sertlik Çıktısının Ön Dozaj-Gazlama Süresi, Ön Dozaj-max Basınç Süre, Ön Dozaj-Filtrealanı ve Ön Dozaj-Üfleme Basıncı Faktörleri ile Değişimi (Change of Hardness Output with Pre-dosage-Aerating Time, Pre-dosage-Max Pressure Time, Pre-dosage-Filter Area and Pre-dosage-Blowing Pressure Factors)

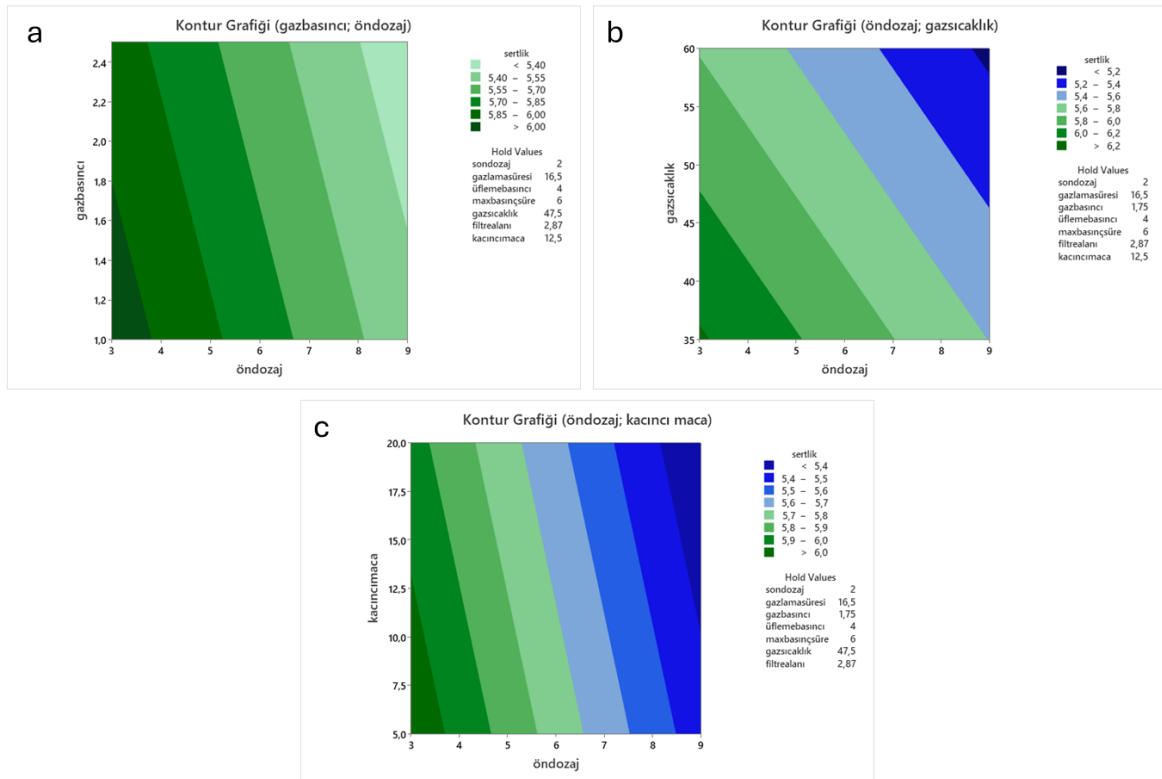
Şekil 12’de ön dozajın; (a) gazlama süresi, (b) max basınç süre, (c) filtrealanı, (d) üfleme basıncı parametreleri ile sertlik değişimi kontur grafiği verilmiştir. Sertlik değeri yeşil renkten mavi renge doğru ilerledikçe küçülmektedir (ölçü aleti batma derinliği azaldığı için maça sertleşmektedir). Şekil 12 (a)’da 5,5 sertlik değerleri ortalamasının altında olduğu için gazlama süresinin 10-12 saniye aralığında seçilmesi durumunda ön dozaj miktarı 5,5 cc olacaktır. Bu değerde 16-18 saniye seçilip 8-9 cc aralığında bir değer verilmesine göre tercih edilecektir. Ön dozaj ile gazlama süresinin değişimini gösteren grafikte (a) ön dozaj 5,5 cc ve son dozaj 2 cc (hold values) olduğu için bu seçenekte toplam gaz tüketimi 7,5 cc olmaktadır. Gaz tüketiminin azaltılması için gazlama süresinin mümkün mertebe düşük seçilmesi gerekmektedir. Şekil 12 (b)’de ön dozaj miktarı ile max basınca ulaşma süresi arasında güçlü bir ilişki olmadığı anlaşılmaktadır. Grafiğe bakıldığında sertlik değerini kodlayan renk şeritlerinin neredeyse dik olarak konumlandığı görülmektedir. Ancak bir miktar gaz tüketiminde azaltma sağlamak adına max basınca ulaşma süresi 4 seçilirse ve ön dozaj miktarı 5 cc seçildiğinde 5,5 seviyelerinde sertlik değeri elde edilmektedir. Bu sertliği elde etmek için son dozaj 2 cc olarak grafikte verilmiş. Toplam gaz miktarı 7 cc olmaktadır. Ön dozaj ve son dozajın max değerleri ile oluşturulacak reçeteye göre 5 cc daha düşük bir tüketim ortaya çıkmaktadır. Şekil 12 (c)’de ön dozaj ile tahliye kanalı (filtrealanı) arasında da güçlü bir ilişki vardır. Filtre alanı küçüldükçe maça sertliği düşmektedir. Ön dozajın 4,6 cc seçildiği durumda filtre alanı 2 mm² olursa sertlik değeri 5,4-5,6 (açık mavi bant) olmaktadır. Son dozajında 2 cc olması durumunda toplam enjekte edilen gaz miktarı 6,6 cc olmaktadır. Bu değer ile maksimum seviyelere göre %50 kazanç sağlanmaktadır. Şekil 12 (d)’de üfleme basıncı ile ön dozaj etkileşimine bakıldığında ise (d) üfleme basıncının yüksek seçilmesinin gaz tüketimini azalttığı görülmektedir. 5 barda üflenen kum ön dozaj 5 cc, son dozaj 2 cc (toplam 7 cc) ile 5,5 sertlik değerleri elde edilmektedir. Yüksek basınçta kalıba üflenen kum karışımının sertliğinin istenen seviyede olması (sert maça olması) kum tanelerinin yüksek basınç ile birbirine daha sıkı yapıştığı yorumu yapılabilir. Dolayısıyla gaz tüketiminin azaltılması için yüksek üfleme basınçları ile çalışmak gerekir.



Şekil 12. Ön dozaj (a) gazlama süresi, (b) max basınç süresi, (c) filtrealanı, (d) üfleme basıncı ile sertlik değişimi (Kontur grafiği) (Pre-dosage (a) gassing time, (b) max pressure time, (c) filter area, (d) hardness change with blowing pressure (Contour graph))

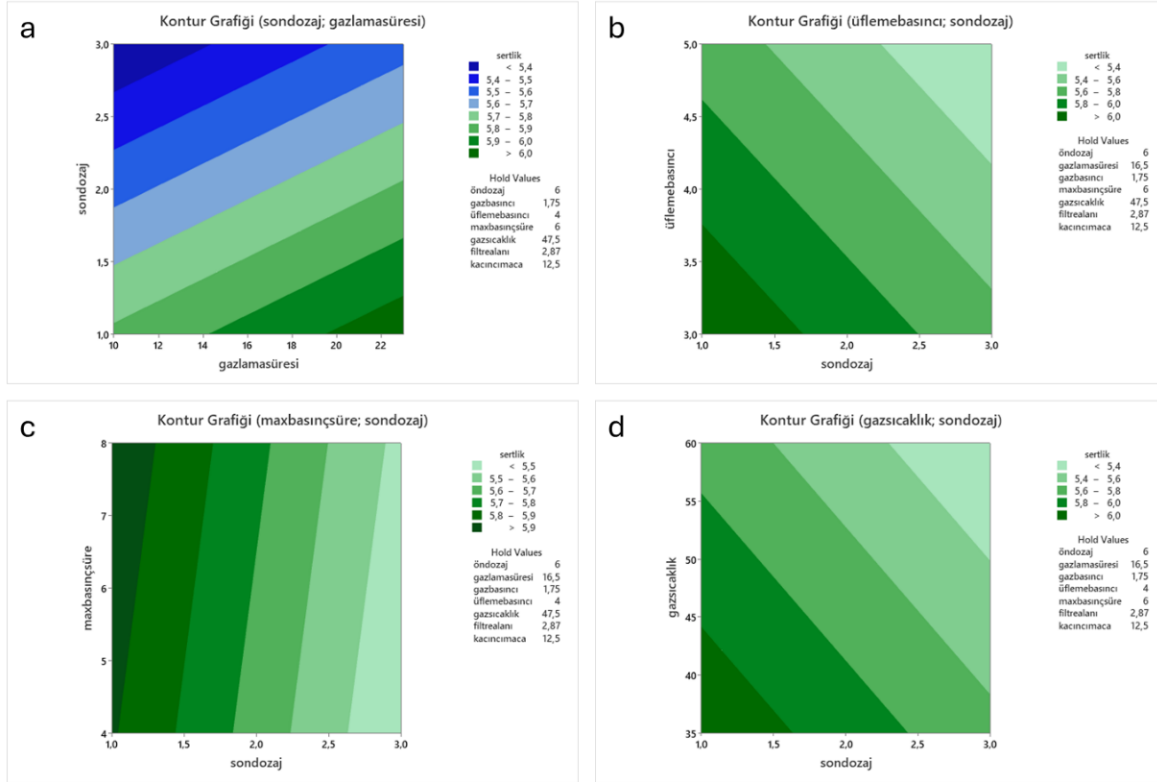
4.3.2. Sertlik Çıktısının Ön Dozaj-Gaz Basıncı, Ön Dozaj-Gaz Sıcaklığı, Ön Dozaj-Kacınıcı Maça Faktörleri ile Değişimi (Change of Hardness Output with Pre-dosage-Gas Pressure, Pre-dosage-Gas Temperature, Pre-dosage-Core Number Factors)

Şekil 13'te ön dozajın; (a) gaz basıncı, (b) gaz sıcaklığı ve (c) kaçınıcı maça parametreleri ile sertlik değişimi kontur grafiği verilmiştir.



Şekil 13. Ön dozaj; (a) gazlama basıncı, (b) gaz sıcaklığı, (c) kaçınıcı maça parametreleri ile sertlik değişimi (Kontur grafiği) (Pre-dosage; (a) gas pressure, (b) gas temperature, (c) hardness change with escape (Contour graph))

Şekil 13 (a)'da ön dozaj ile gaz basıncı arasında güçlü bir ilişki yoktur. Grafikteki (a) ön dozaj ekseninde 5 cc seçildiğinde 5,5-5,7 sertlik değerini içeren şerit içinde kalabilmek için 2,5 ve daha yüksek gazlama basıncı ile çalışmak gerektiği tespit edilmiştir. Şekil 13 (b)'de ön dozaj ile gaz sıcaklığı arasında güçlü bir ilişki vardır. Ortalama sertlik olan 5,7 yi elde edebilmek için 5 cc gaz verilmesi ve gaz sıcaklığının max (60 °C) seçilmesi gerekecektir. Yüksek ısıda buharlaştırılmış DMEA'nin uçuculuğu daha da artacağı için kalıptaki kum tanelerine yüzeysel olarak daha rahat temas edebilecektir. Bu da sertliğe olumlu yansıtacaktır. Şekil 13 (c)'de ön dozaj ile kaçınıcı maça arasında zayıf bir ilişki vardır. Ön dozaj 5 cc seçildiğinde ortalama sertlik değerini elde etmek için filtre kanallarının her yirminci maçada temizlenmesi gerekecektir (Tahliye kanalı daralırsa amin gazı daha fazla içeride kalacağı için sertliği artıracaktır).



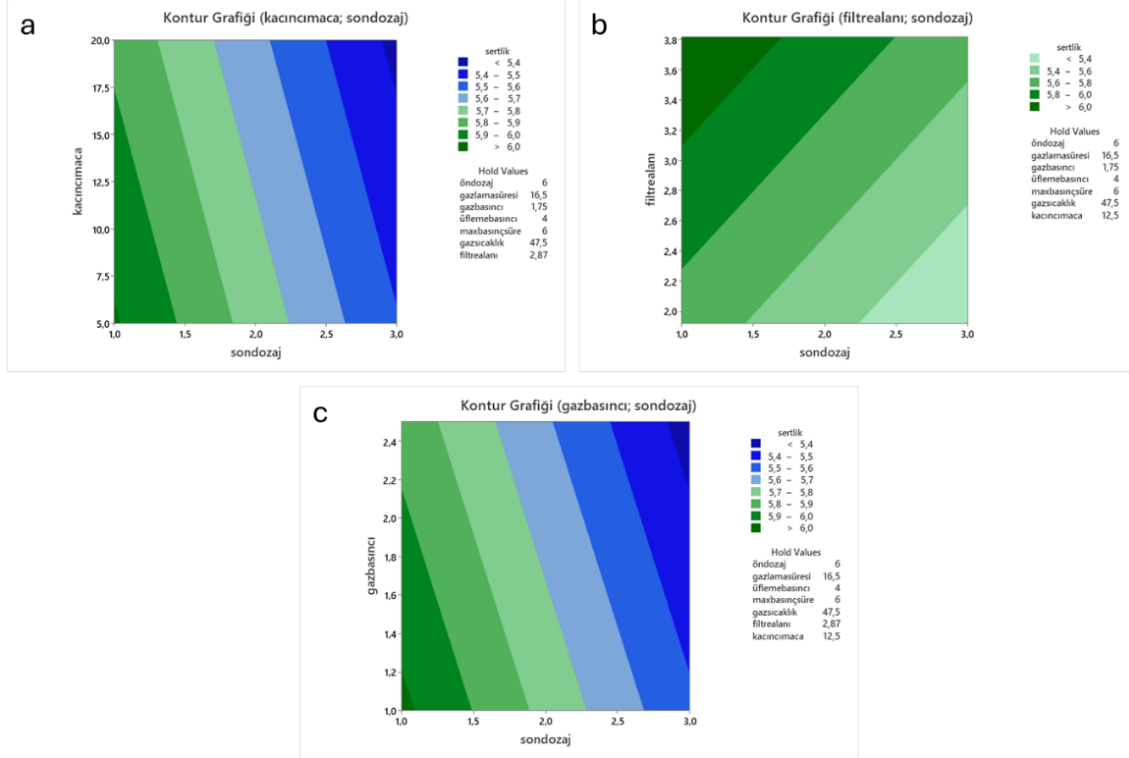
Şekil 14. Son dozaj; (a) gazlama süresi, (b) üfleme basıncı, (c) max basınç süre ve (d) gaz sıcaklık ile sertlik değişimi (Kontur grafiği) (Final dosage; (a) gassing time, (b) blowing pressure, (c) maximum pressure time and (d) hardness change with gas temperature (Contour graph))

4.3.3. Sertlik Çıktısının Son Dozaj-Gazlama Süresi, Son Dozaj-Üfleme Basıncı, Son Dozaj-Max Basınç Süre ve Son Dozaj Gaz Sıcaklık Faktörleri ile Değişimi

Şekil 14 (a)'da son dozaj ile gazlama süresi arasında güçlü bir ilişki vardır. Gazlama süresinin düşük seçilmesi sertlik çıktısını artırmaktadır. 10 saniye gazlama süresinde 1,5 cc gaz verilmesi ile 5,6 sertlik değeri elde edilebilmektedir. Ön dozaj 6 cc olarak verildiği için toplam gaz tüketimi 8 cc olmaktadır. Maksimum seviyeler (3+9 cc=12 cc) yerine 8 cc gaz ile sertlik değerinin elde edilmesi her maça üretiminde 4 cc gaz tasarrufu yapılması anlamını taşımaktadır. Şekil 14 (b)'de son dozaj ile üfleme basıncı arasında güçlü bir ilişki vardır. Üfleme basıncının max seviyesinin seçilmesi sertliği olumlu etkilemekte ve gaz tüketimini düşürmektedir. Şekil 14 (c)'de düşük gaz miktarı ile ideal sertlik elde edilmesi için süre parametresinin mümkün olduğu kadar yüksek seçilmesi gerekir. Şekil 14(d)'de grafikteki şeritler neredeyse 45 derecelik bir açıya sahip olduğu görülmektedir. Gaz sıcaklığı arttıkça gaz miktarında düşüş sağlanabilmektedir. 1,5-2 cc aralığında gazı 60 derece sıcaklıkta 5,5 sertlik değeri elde edilebilmektedir. 6 cc ön dozaj hesaba katıldığında 12 cc gaz yerine 8 cc gaz ile aynı sertlik değeri elde edilebilmektedir.

4.3.4. Sertlik Çıktısının Son Dozaj-Kaçınıcı Maça, Son Dozaj-Filtre Alanı, Son Dozaj-Gaz Basıncı Faktörleri ile Değişimi (Change of Hardness Output with Last Dosage-Core Number, Last Dosage-Filter Area, Last Dosage-Gas Pressure Factors)

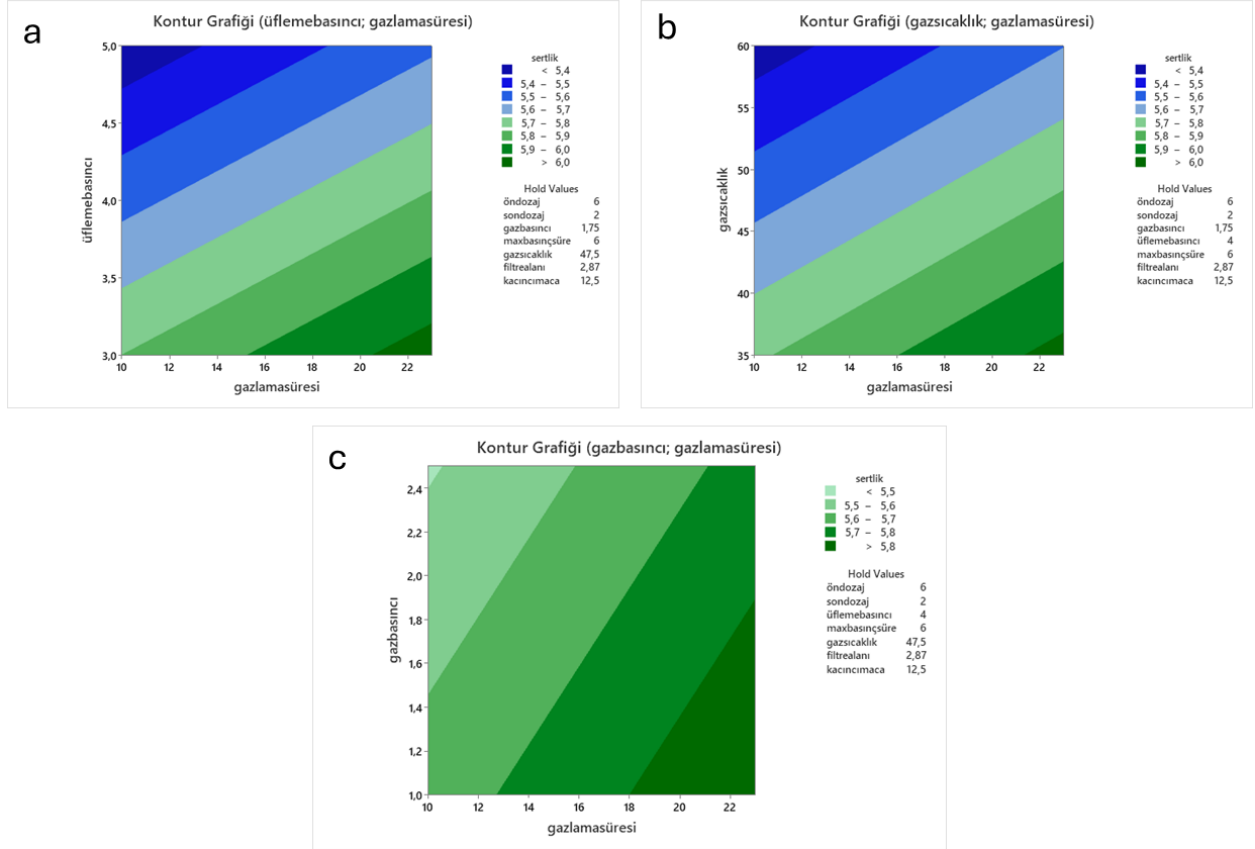
Şekil 15 (a)'da son dozaj faktörü ile kaçınıcımaca arasında güçlü bir ilişki mevcuttur. Son dozaj 1,5 cc seçildiğinde 20.maça üretiminden sonra kanal temizlenmesi ile maça sertliği 5,6-5,7 bandında gelmektedir (ortalama değer altında (5,69)). Tahliye kanalları daralması ile son dozajda verilen amin gazı daha fazla sürede kalıp içinde kaldığı için sertliğe olumlu etki etmektedir. Şekil 15 (b)'da son dozaj-kaçınıcımaca faktörlerinin etkileşimine benzer durum mevcuttur. Filtre alanı ne kadar daraltılırsa maça sertliği o kadar çok artmaktadır. Şekil 15 (c)'de son dozaj gaz basıncı faktörleri içimde etkileşim söz konusudur. DMEA son dozaj miktarı azaltılması için gaz basıncının artırılması gerekmektedir.



Şekil 15. Son dozaj; (a) kaçınıcımaca, (b) filtrealanı, (c) gazbasıncı ile sertlik değişimi (Kontur grafiği) (Final dosage; (a) number of cores, (b) filter area, (c) hardness change with gas pressure (Contour graph))

4.3.5. Sertlik Çıktısının Üfleme Basıncı-Gazlama Süresi, Gazlama Süresi-Gaz Sıcaklığı, Gazlama Süresi -Gaz Basıncı Faktörleri ile Değişimi (Change of Hardness Output with Blowing Pressure-Gasing Time, Gasing Time-Gas Temperature, Gasing Time-Gas Pressure Factors)

Şekil 16 (a)'da gazlama süresi ile üfleme basıncı faktörleri arasında çok güçlü bir ilişki mevcuttur. Ön dozaj 6 cc, son dozaj 2 cc seçildiğinde gazlama süresinin 10-12 saniye aralığında, üfleme basıncının da 5 bar seçilmesi durumunda maça sertliği 5,4'den küçük olmaktadır (lacivert bölge). Her iki parametre de makineden yönetilebildiği için maça tipinin değişmesiyle oluşacak aşırı gaz tüketimleri gazlama süresinin düşürülmesi ve üfleme basıncının artırılmasıyla önlenir. Ayrıca gazlama süresinin düşürülmesi işletme verimliliği açısından olumlu bir durumdur. Şekil 16 (b)'de gazlama süresi ile gaz sıcaklığı faktörleri arasında çok güçlü bir ilişki vardır. DMEA tasarrufu için gaz sıcaklığı yüksek değerde seçilmelidir. Şekil 16 (c)'de ise gazlama süresi ile gaz basıncı faktörleri arasında da güçlü bir ilişki vardır. DMEA tasarrufu için gaz basıncı 2,5 ve mümkünse daha yüksek değerde seçilmelidir.



Şekil 16. Gazlama Süresi; (a) üfleme basıncı, (b) gaz sıcaklığı, (c) gaz basıncı sertlik değişimi (Kontur grafiği) (Gassing Time; (a) blowing pressure, (b) gas temperature, (c) gas pressure hardness change (Contour graph))

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada maça üretim tesislerinde hem çalışan sağlığını tehdit eden hem de proses güvenliğini riske sokan maça kimyasallarının kullanımı sırasında azaltılması araştırılmıştır. Maça sertleştirmek için kullanılan DMEA gazının miktarının azaltılması için yönetilebilir 10 adet parametre araştırılmış ve maça sertliğini oluşturan parametrelerden oluşan matematiksel denklem elde edilmiştir. Parametrelerin R sq değeri %83,66 olarak elde edilmiştir. Bu değer modelin oldukça başarılı kurgulandığını ve bağımsız değişkenler ile sertlik çıktısının yönetilebildiği sonucunu çıkarmıştır.

Yapılan deney tasarımı ve gerçekleştirilen deneylerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır. Sonuçların en önemlileri listelenmiştir:

- DMEA gazının kalıp içerisine enjekte edilme süresi küçük, üfleme basıncı büyük değer seçildiğinde DMEA miktarının dozajlanması azaltılabilmektedir.
- Deneysel sonuçlarda bir çok faktör etkileşimi vardır. En önemli etkileşimler aşağıda verilmiştir;
 - Gaz sıcaklığı ile conta varlığı parametrelerinin etkileşimi: Gaz sıcaklığı 60 °C ve conta var olarak seçildiğinde maça sertlik değeri 5,3 mm olmaktadır (Ortalama değer 5,7 mm)
 - Filtre alanı ile conta varlığı parametrelerinin etkileşimi: Filtre alanı 1,92 mm² ve conta yok olarak seçildiğinde maça sertliği 5,1 mm olarak çıkmaktadır (Ortalama değer 5,7 mm)
 - Son dozaaj ile gaz basıncı parametrelerinin etkileşimi: Son dozaaj değeri 1 cc (düşük seviye) ve gaz basıncı 2,5 bar seçildiğinde son dozaajın 3 cc seçilme değeri ile aşağı yukarı aynı değer çıkmaktadır (5,6 mm).
 - Gazlama süresi ile gaz basıncı parametrelerinin etkileşimi: Gazlama süresi 10 sn (düşük seviye), gaz basıncı da 2,5 bar seçildiğinde maça sertliği 5,2 mm olmaktadır. Gazlama süresinin 10 sn seçilmesi işletme verimliliği açısından olumlu bir değer olup tercih edilmesi birim zamanda üretilecek maça sayısını artıracaktır.
 - Deney parametrelerinden, gazlama süresi ile son dozaaj etkileşiminin sertlik çıktısı üzerinde etkili olduğu görülmektedir.
 - Son dozaaj seviyesi düşük seçildiğinde, aynı sertlik değeri farklı gazlama süresi ile elde edilebilmektedir. Son dozaaj doğru seviyeye ayarlanarak, sertlik çıktısı gazlama süresi parametresinin seviyesine duyarlı hale getirilebilir. Böylelikle, çıktıyı bozmadan, gaz tüketimi azaltılabilir.

Elde edilen bulgulara göre dakümhanelerin maça üretim birimlerinde değişik deneylerin yapılabilirliği gösterilmiştir. Çalışmanın amacı maçada kullanılan DMEA gazının azaltılması ve çalışan sağlığının korunmasıdır. Elde edilen regresyon eşitliği ve faktörlerin etkileşimlerine göre ürün kalitesine olumsuz etki etmeden kullanılan DMEA miktarı azaltılabilir. Deneye konu olan maçada her üretim adedi için yaklaşık 4 cc DMEA daha az kullanılabilirliği gösterilmiştir. Bu azaltma çalışanlar için daha az kimyasal içeren bir ortam yaratacağı gibi işletmenin verimlilik ve kalite standartlarına da katkı sağlayacaktır. Gelecekte çalışma diğer kimyasal maddelerin azaltılması amacı ile de tekrar edilebilecektir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma için deneylerin yapılmasında destek olan Döktaş Dökümcülük A.Ş. Orhangazi tesislerine teşekkür ederiz. We would like to thank Döktaş Dökümcülük Orhangazi facilities for their support in conducting the experiments for this study.

Bu çalışma Doç. Dr. Müge Ensari Özay danışmanlığında Mart 2025 tarihinde tamamladığımız "Dökümhane Maça Üretim Prosesinde Makine Parametreleri Optimizasyonu ile DMEA Gazı Azaltılması ve Akıllı Maçahane Tasarımı" başlıklı doktora tezi esas alınarak hazırlanmıştır (Doktora Tezi, Üsküdar Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2025). / This article is extracted from my doctorate dissertation entitled "DMEA Gas Reduction in Foundry Core Production Process with Machine Parameters Optimization and Smart Core Shop Design", supervised by Associate professor Dr.Müge Ensari Özay (Ph.D. Dissertation, Üsküdar University, İstanbul, Türkiye, 2025).

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Antony, J., 2003. Design of Experiments for Engineers and Scientists, Second Edition, ISBN 978-0-7506-4709-0
- Bargaouia, H., Azzouza, F., Thibault, D., Cailletaud, G., 2017. Thermomechanical behavior of resin bonded foundry sand cores during casting, *Journal of Materials Processing Technology* 246, 30–41.
- Barot, R.S., Patel, H., Devmurari, R., Shah, K., Sharma, B., Shah, J., 2020. IoT Feasibility Aspects Of Mold Temperature Monitoring and Casting Simulation For Smart Foundry, *Materials Today: Proceedings* 28, 1732–1738.
- Beeley, P.R., 1972. Foundry Technology, ISBN-100408703482.
- Behara, N.,C., Jeet, S., Nayak, C.,K., Bagal, D.,K., Panda, S.,N., Barua, A., 2022. Parametric Appraisal of Strength & Hardness of Resin Compacted Sand Castings Using Hybrid Taguchi-WASPAS-Material Generation Algorithm, *Materials Today: Proceedings* 50, 1226–1233
- Chaudhari, S.,S., Aloni, S.,N., 2022. Optimization Of Green Sand Process for Quality Improvement in Castings by Using Combination of Taguchi Techniques-GRA-PCA, *Materials Today: Proceedings* 62, 1115–1121.
- Chate, G.,R., Bhat, R.,P., Chate, U.,N., 2014. Process Parameter Settings For Core Shooter Machine by Taguchi Approach, *Procedia Materials Science* 5, 1976 – 1985.
- Danko, R., Kmita, A., Holtzer, M., Danko, J., Lehmus, D., Tapola, S., 2023. Development of Inorganic Binder Systems to Minimise Emissions in Ferrous Foundries, *Sustainable Materials and Technologies* 37 (2023) e00666.
- Gyarmati, G., Budavari, I., Fegyverneki, G., Varga, L., 2021. The Effect of Sand Quality on The Bending Strength and Thermal Distortion of Chemically Bonded Sand Cores, *Heliyon* 7, e07624.
- Hunter, J, S, Hunter, W,G, Box, G,E,P, 2005. *Statistics for Experiments*, Wiley Interscience
- Kanicki, D.,1994. Metal Casting's Versatility Offer Users a Competitive Edge. *Designers & Buyers, Guide to Selecting Casting Processes I. Casting World/Modern Casting Publication.* 5-10.
- Krishnaraj, R., 2015. Contemporary And Futuristic Views Of Pollution Control Devices In Foundries, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 120, 130–135
- Kumar,S., Prakash, J., (2015), Optimization of Casting Process Parameters Using Taguchi Analysis, *International Journal of Mechanical Engineering and Research*, ISSN 0973-4562 Vol. 5 No.1. 131-134.
- Mirer, F., E., 1989. *Encyclopaedia of Occupational Health and Safety*, 4th Edition-Part XIII, Metal Processing and Metal Working Industry, <http://www.ilocis.org/en/default.html> Erişim Tarihi:01 Şubat 2019.
- Pandit, H., Deshpande, A., 2021. Theory of Combined Imbalance for Quality Improvement in Green Sand Molded Castings, *Materials Today: Proceedings* 47, 2315–2321.
- Primafound, 2023. *Cores Manufacturing Secrets and Strategies from Design to Production*.
- Rekab, K., Shaikh, M., 2005. *Statistical Design of Experiments with Engineering Applications*, International Standard Book Number-13: 978-1-4200-5631-0 (eBook - PDF)
- Rodríguez, E., Pérez A., Mercado-Solis R. D., Abraham V., Jimenez O., Flores M., Gonzalez M.A., Ibarra J.(2019). China Foundry Research & Development, Erosion problem in tool steel using cold box core-making process, Vol. 16, No. 3, 204-210.
- Saikaew, C., Wiengwiset, S., 2012. Optimization Of Molding Sand Composition for Quality Improvement of Iron Castings, *Applied Clay Science* 67–68, 26–31.
- Schneider, M., Stevenson, R., 2012. *Simulation of the Entire Core Production Process*, American Foundry Society.
- Schorn, T,J., 2020. Enkei America Inc. (Columbus, Indiana), *Modern Casting*, January 2020
- SGK, Sosyal Güvenlik Kurumu İstatistikleri, sgkgov.tr, Erişim Tarihi:01.03.2022

- Singh, H., Kumar, A., 2016. Minimization of the Casting Defects Using Taguchi's Method, International Journal of Engineering Science Invention ISSN (Online): 2319 – 6734, ISSN (Print): 2319 – 6726 www.ijesi.org Volume 5 Issue 12, December 2016, PP. 06-10.
- Stauder, B.,J., Kerber, H., Schumacher, P., 2016. Foundry Sand Core Property Assessment by 3-point Bending Test Evaluation, Journal of Materials Processing Technology 237,188-196.
- Treyger, A., 2015. Overview of Foundry Processes and Technologies: Manufacturing Metal Castings, CED Engineering, Continuing Education and Development, Inc. 22 Stonewall Court Woodcliff Lake, NJ 07677.
- Türk, S.C., 2022. Döküm Tesislerinde Boya Kullanımı Sebebiyle Ortaya Çıkan Uçucu Organik Bileşiklerin Ölçümü ve İş Güvenliği Açısından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Üsküdar Üniversitesi, İstanbul.
- Tong, L., Shen X., Zhou J., Yin Y., Ji X., 2019. Numerical Investigation of Turbulent Flow Behavior of Sand Particles in Core Shooting Process, 9th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing (ICPNS'2019), Procedia Manufacturing 00 (2017) 000-000.
- Udayan N., Srinivasan M.V., Vignesh V R, Govindaraju M., 2021. Elimination of Casting Defects Induced by Cold Box Cores, Materials Today: Proceedings 46 ,5022-5026.
- Upadhye, R.,A., Keswani I.,P., 2012. Optimization of Sand Casting Process Parameter Using Taguchi Method in Foundry, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) Vol. 1 Issue 7, September – 2012 ISSN: 2278-0181.
- Zhang, M., Zheng, Y.,D., Du, X.,Y., Lu, Y., Li, W.,J., Qi, C., Wu, Z.,L., 2010. Silicosis in Automobile Foundry Workers: A 29-Year Cohort Study, Biomedical And Environmental Sciences 23, 121-129.